


**Министерство образования и науки**
**Российской Федерации**
**ФГБОУ высшего**
**профессионального образования**

**НОВИКОВА Н.А**

# Методическое руководство для выполнения расчетно-графических работ по курсу «Метрология, стандартизация и сертификация»

**для студентов направления бакалавриата:**
**15.03.01 «Машиностроение»**
***очного и заочного обучения***

**Екатеринбург**
**2019**

Министерство образования и науки Российской федерации
Уральский государственный горный университет

ОДОБРЕНО:
Методической комиссией
Горно-механического факультета
Председатель комиссии
_____ проф. В.П.Барановскиий

**Методическое руководство**

для выполнения расчетно-графических работ по курсу «Метрология, стандартизация и сертификация»

Издание УГГУ
*Новикова Н.А.* Методическое руководство для выполнения расчетно-графических работ по курсу «Метрология, стандартизация и сертификация» Екатеринбург, 2019

для студентов очного и заочного обучения специальности 150700- «Машиностроение» (МШС). Екатеринбург: Издательство УГГУ, 2014. 33 с.

В руководстве изложены методические указания, последовательность решения задач по допускам гладких цилиндрических соединений, цилиндрических зубчатых колес, подшипников качения и размерных цепей, приведены справочные данные, необходимые для решения задач.

Пособие рассмотрено на заседании кафедры эксплуатации горного оборудования, ----------. (протокол №-----) и рекомендовано к изданию в УГГУ.

© Новикова Н.А.,
© УГГУ 2014 г.

В целях закрепления основных положений по курсу «Метрология, стандартизация и сертификация» студенты самостоятельно выполняют две расчетно-графические работы.

## РАБОТА №1

Работа заключается в анализе допусков и посадок гладких соединений. Анализируются все стандартные посадки, образующиеся с основным валом заданного квалитета и заданного номинального размера и все стандартные посадки, образующиеся с основным отверстием заданного квалитета и размера.

Работа выполняется на специальном бланке и подлежит защите. Бланк заполняется карандашом, с соблюдением требований ГОСТ 2.307-68.

Для выполнения данной работы студенту необходим для определения полей допусков ГОСТ 25347-82 (СТ СЭВ 144-75).

### *1.Последовательность выполнения работы*

1.1. Для выполнения работы студент получает бланк с заданием.

1.2. Из таблицы ГОСТ 25347-82 выписать в графу 1 бланка работы все стандартные посадки, образующиеся с основным валом заданного квалитета, и все стандартные посадки, образующиеся с основным отверстием заданного квалитета.

1.3 Посадки записываются в соответствии с ГОСТ на условные обозначения полей допусков: предельные отклонения отверстия записываются в числителе, а вала – в знаменателе, например: 50 $\frac{H7}{e8}$ или 50 *H7/e8*. Где: 50 – номинальный размер соединения; *H7*- условное обозначение поля допуска отверстия; *e8*- поле допуска вала.

Аналогично по заданному квалитету и номинальному размеру выписываются все стандартные посадки в системе вала.

1.4. В графы 2 и 3 каждой системы (система отверстия, система вала) заносятся числовые значения предельных отклонений для всех полей допусков.

Числовые значения предельных отклонений принимаются по ГОСТ25347-82 (СТ СЭВ 144-75). При отсутствии указанного стандарта предельные отклонения находят расчетным путем с помощью ГОСТ 25346-82 (СТ СЭВ 145-75).

1.5. В графы 4 и 5 каждой системы посадок записываются исполнительные размеры для отверстий и валов с указанием условного обозначения предельных отклонений, а в графы 6 и 7 – исполнительные размеры, но уже в числовых величинах предельных отклонений, мм.

1.6. Проводится математический анализ зазоров и натягов для каждого сопряжения в обеих системах. Величины зазоров и натягов по абсолютной величине, в мкм, заносятся в графы отчета 8, 9, 10 и 11 соответственно каждой системы посадок.

Предельные зазоры и натяги определяются:

**посадки с зазором:**

$$S_{max} = ES - ei\ , \qquad S_{min} = EI - es\ ;$$

**посадки с натягом:**

$$N_{max} = es - EI, \qquad N_{min} = ei - ES ;$$

**переходные посадки:**

$$S_{max} = ES - ei, \qquad N_{max} = es - EI,$$

где $S_{max}$ и $S_{min}$ - наибольший и наименьший зазор;
$N_{max}$ и $N_{min}$ - наибольший и наименьший натяг;
$ES$ и $EI$ - верхнее и нижнее отклонение отверстия;
$es$ и $ei$ - верхнее и нижнее отклонение вала.

1.7. Определяется для посадок в системе отверстия и в системе вала допуск посадки исходя из предельных зазоров или натягов.

Для посадок с зазором $T_n = S_{max} - S_{min} = IT_D + IT_d$;
Для посадок с натягом $T_n = N_{max} - N_{min} = IT_D + IT_d$;
Для переходных посадок $T_n = S_{max} + N_{max} = IT_D + IT_d$;

При этом $IT_D$ – допуск отверстия,
$IT_d$ – допуск вала.

Результаты расчета заносятся в графу 12 бланка отчета соответственно каждой посадке, мкм.

1.8. Строятся схемы полей допусков для всех посадок в системе отверстия и в системе вала. Для построения полей допусков следует принять определенный масштаб.

1.9. Для одной (любой) посадки в системе отверстия и для одной посадки в системе вала оформляются эскизы сопряжений.

При этом на эскизах сопряжений указать исполнительные размеры на двух размерных линиях: на одной указать номинальный размер и условное обозначение предельных отклонений, на второй - номинальный размер с числовыми предельными отклонениями.

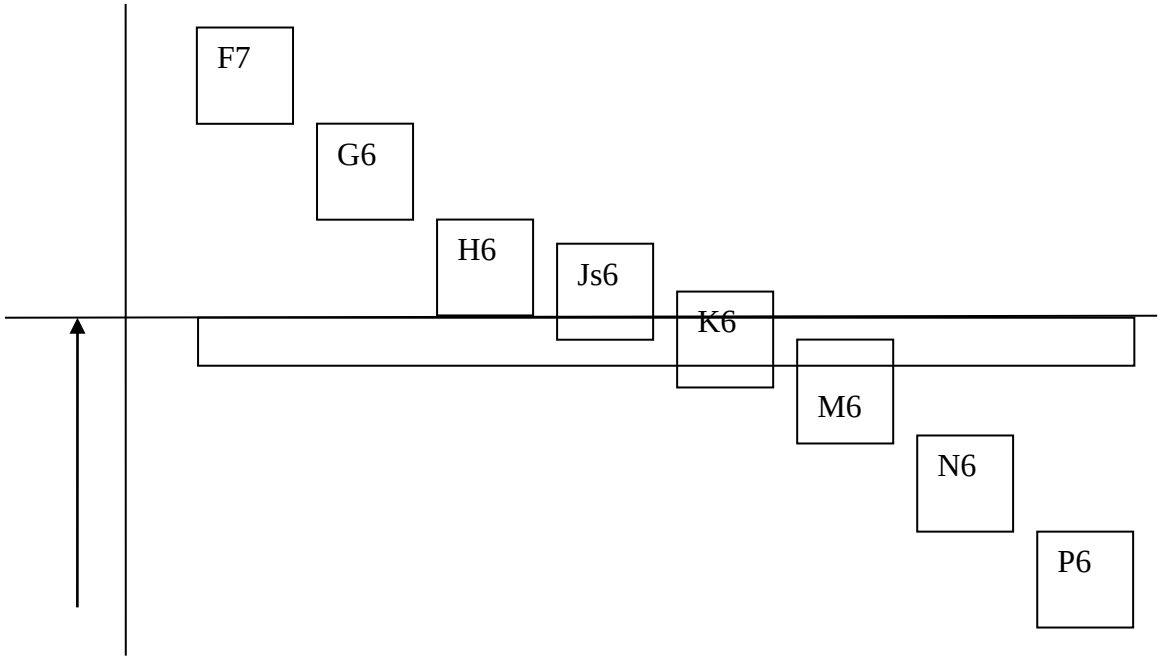
Образец контрольной работы №1 приведен в таблице 1.1 и Рис.1.1, Рис.1.2.

*Таблица 1.1*

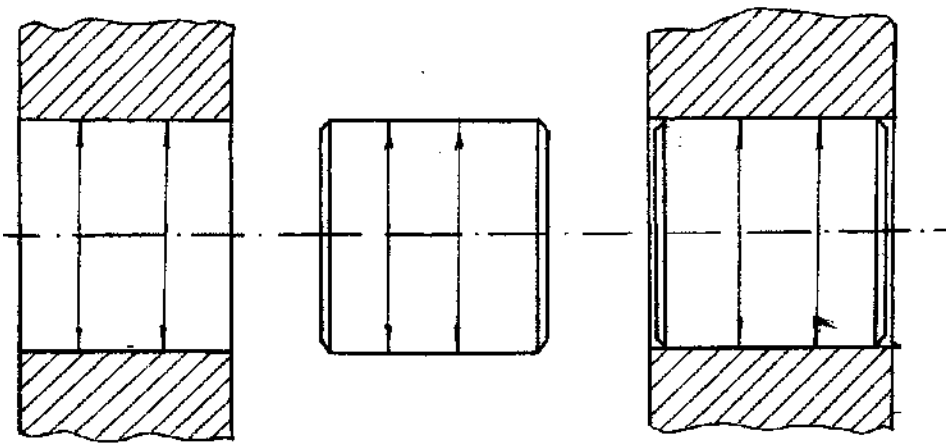
**Дать анализ всех стандартных посадок в системе вала с валом h5 номинального размера 20 мм**

| Посадка | Отклонение в мкм. | | Наносимый размер на чертежах деталей (в мм) | | | | Натяги в мкм | | Зазоры в мкм | | Допуск посадки в мкм |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Отв. | Вала | Условно | | С числовыми отклонениями | | max | min | max | min | |
| | ES EJ | es ej | Отв. | Вала | Отв. | Вала | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |

Схема полей допусков для размера 20 мм с полем допуска основного вала h5




Рисзы детапряжения садки с пуска h5 в вала



1.1 Эскилей и содля по-

полем досистеме

Рис.1.2.Схема обозначения посадок на чертежах

## РАБОТА №2

Работа включает в себя следующие расчеты:
- расчет и выбор посадки с зазором,
- расчет и выбор посадки с натягом,
- выбор посадок для подшипников качения,
- определение исполнительных элементов зубчатого колеса,
- решение размерных цепей.

Работа выполняется на бумаге формата А4.

Номера вариантов задаются студентам преподавателем.

### *2.1. Расчет и выбор посадки с зазором*

По заданным условиям работы подшипника скольжения студент должен рассчитать и выбрать стандартную посадку из ГОСТ 25347-82.

Последовательность расчета:

2.1.1. Определяется удельное давление на подшипник, Па

$$P = \frac{R}{D \bullet l},$$

где $R$ - радиальная нагрузка на цапфу, Н;
$D$ - номинальный диаметр сопряжения, м;
$l$ - длина сопряжения, м.

2.1.2. Определяется относительная длина подшипника

$$\lambda = \frac{l}{D}$$

2.1.3. Если рабочая температура подшипника отличается от температуры, при которой устанавливается вязкость масла, необходимо определить динамическую вязкость масла при рабочей температуре. Машинные масла испытываются при $t = 50^0$С, а тяжелые и моторные масла при температуре $t = 100^0$С

$$\mu_t = \mu_{50}\left(\frac{50}{t^0}\right)^x \quad \text{или} \quad \mu_t = \mu_{100}\left(\frac{100}{t^0}\right)^x$$

где $\mu_{50}$ и $\mu_{100}$ – динамическая вязкость масла, принятая по таблице 2.2, Па·с;
$t$ - рабочая температура подшипника;

$x$ – показатель степени, принимаемый в зависимости от вязкости масла по таблице 2.1.

*Таблица 2.1*

**Значение показателя степени**

| Вязкость св. масла, Па С от | 0,02 | 0,04 | 0,05 | 0,07 | 0,09 |
|---|---|---|---|---|---|
| до | 0,04 | 0,05 | 0,07 | 0,09 | - |
| Значение $x$ | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,9 | 3,0 |

*Таблица 2.2*

**Вязкость масел при температуре $t$ =50$^0$С**

| Марка масла | Вязкость, Па·с | Марка масла | Вязкость, Па·с |
|---|---|---|---|
| И-8А | 0,005…0,007 | ИГП-4 | 0,003…0,004 |
| И-12А | 0,009…0,012 | ИГП-6 | 0,004…0,006 |
| И-20А | 0,015…0,019 | ИГП-8 | 0,006…0,007 |
| И-25А | 0,021…0,023 | ИГП-18 | 0,014…0,017 |
| И-30А | 0,025…0,028 | ИГП-30 | 0,024…0,026 |
| И-40А | 0,031…0,039 | ИГП-38 | 0,030…0,034 |
| И-50А | 0,041…0,048 | ИГП-49 | 0,041…0,045 |
| И-70А | 0,057…0,066 | ИГП-72 | 0,062…0,066 |

*Таблица 2.3.*

**Коэффициент точности по квалитетам**

| Квалитеты | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| «а» | 7 | 10 | 16 | 25 | 40 | 64 | 100 | 160 | 250 | 400 | 640 | 1000 | 1600 |

*Таблица 2.4.*

**Единица допуска для размеров от 1 до 500 мм**

| Интервалы | 1 | 3 | 6 | 10 | 18 | 30 | 50 | 80 | 120 | 180 | 250 | 315 | 400 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

| диаметров | 3 | 6 | 10 | 18 | 30 | 50 | 80 | 120 | 180 | 250 | 315 | 400 | 500 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Единица допуска ι, мкм | 0,54 | 0,73 | 0,90 | 1.09 | 1,30 | 1,56 | 1,86 | 2,17 | 2,52 | 2,89 | 3.23 | 3,54 | 3,89 |

2.1.4. Вычисляется характеристика режима работы подшипника по зависимости

$$A = \frac{\mu \cdot \omega}{P},$$

где $\mu_t$ - динамическая вязкость масла при рабочей температуре подшипника, Па.с

$\omega$ - угловая скорость вращения вала, рад/с.

$P$ - удельное давление на подшипники, Па;

Если по условию задачи задана частота вращения вала, то угловую скорость можно определить по зависимости

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30},$$

где $n$ – частота вращения вала, об/мин.

2.1.5. Вычисляется оптимальный относительный зазор при относительном эксцентриситете $\chi$ =0,5.

$$\psi_{опт} = \sqrt{A \cdot C_{R1}},$$

где $C_{R1}$ – коэффициент несущей способности подшипника, соответствующий $\chi$ =0,5. Принимается по табл. 2.5.

*Таблица 2.5*

**Значение коэффициентов $C_{R1}$, $C_{R2}$, $C_{R3}$ в зависимости от относительного эксцентриситета**

| Относительный эксцентриситет $\chi$ | Значение $C_R$ при $\lambda$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
| 0,3 | 0,089 | 0,133 | 0,182 | 0,234 | 0,287 | 0,339 |
| 0,5 | 0,216 | 0,317 | 0,427 | 0,538 | 0,647 | 0,754 |
| 0,75 | 0,776 | 1,098 | 1,418 | 1,720 | 1,965 | 2,248 |
| $\chi$ | $C_R$ при $\lambda$ | | | | | |
| | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,5 | 2,0 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,3 | 0,391 | 0,440 | 0,487 | 0.529 | 0,610 | 0,763 |
| 0,5 | 0,853 | 0.947 | 1,033 | 1,111 | 1,248 | 1,483 |
| 0,75 | 2,469 | 2,664 | 2,838 | 2,990 | 3,242 | 3,671 |

2.1.6. Вычисляется минимальный относительный зазор при *относительном* эксцентриситете $\chi$ =0,3.

$$\psi_{minF} = \sqrt{A \cdot C_{R2}} \ ,$$

2.1.7. Вычисляется максимальный относительный зазор при относительном эксцентриситете $\chi$ =0,75.

$$\psi_{maxF} = \sqrt{A \cdot C_{R3}},$$

2.1.8. Зная относительные зазоры и номинальный диаметр соединения, определяют предельные диаметральные зазоры, мм

$$S_{opt} = \psi_{onm} \cdot D; \ S_{min\,F} = \psi_{minF} \cdot D; \ \ S_{maxF} = \psi_{maxF} \cdot D$$

где $D$- номинальный диаметр соединения, мм.

2.1.9. По предельным зазорам определяется допуск зазора, мкм

$$T_{sF} = S_{maxF} - S_{min\,F}$$

2.1.10. Устанавливается коэффициент точности по зависимости

$$a = \frac{T_{SF}}{2 \cdot i} \ ,$$

где $i$ – единица допуска, мкм, принимаемая по табл. 2.4.

В ГОСТ 25 346-82 (или табл.2.3).по величине $a$ определяется квалитет для сопрягаемых деталей.

2.1.11. Определяется оптимальная величина масляного клина из условия

$$h_{min\,opt} = 0{,}25\ S_{opt};$$

$$h_{min\,opt} = k(Rz_D + Rz_d + \gamma_g)$$

где $Rz_D$ и $Rz_d$ – шероховатость сопрягаемых поверхностей деталей, мкм;

$k$ - коэффициент запаса надежности по толщине масляного слоя, принимают $k \geq 2$;

$\gamma_g$ – добавка на неразрывность масляного слоя с учетом отклонений формы, расположения поверхности вала и прогиба вала.

При $\lambda \geq 1$, $\gamma_g = 2 \div 3$; при $\lambda < 1$, $\gamma_g = 1$.

2.1.12.Определяется оптимальная шероховатость сопрягаемых поверхностей, приняв $h_{\min\ opt}$ равной 0,25 от $S_{opt}$, мкм

$$Rz_{\ opt} = \frac{h_{\min opt} - K\gamma_g}{2K} \quad ,$$

Полученная величина $Rz_{\ opt}$ округляется до стандартной по ГОСТ 2789-73. (Таблица 2.6)

*Таблица 2.6*

**Ряды числовых значений шероховатости и базовых длин**

| ***L*, мм** | ***Ra*, мкм** | ***Rz*, мкм** | ***L*, мм** | ***Ra*, мкм** | ***Rz*, мкм** |
|---|---|---|---|---|---|
| 8 | 80 | 320 | 0,8 | 2,5 | 10,0 |
| | 63 | 250 | | 2,0 | 8,0 |
| | 50 | 200 | | 1,6 | 6,3 |
| | 40 | 160 | | 1,25 | 5,0 |
| | 32 | 125 | | 1,00 | 4,0 |
| | 25 | 100 | | 0,80 | 3,2 |
| | 20 | 80 | | 0,63 | 2,5 |
| | 16 | 63 | | 0,50 | 2,0 |
| | 12.5 | 50 | | 0,40 | 1,6 |
| 2,5 | 10,0 | 40 | 0,25 | 0,32 | 1,25 |
| | 8,0 | 32 | | 0,25 | 1,00 |
| | 6,3 | 25 | | 0,20 | 0,80 |
| | 5,0 | 20 | | 0,16 | 0,63 |
| | 4,0 | 16 | | 0.125 | 0,50 |
| | 3,2 | 12,5 | | 0,100 | 0.40 |

2.1.13. Учитывая шероховатость поверхностей определяются технологические зазоры в соединении, мм

$$S_{max\ t} = S_{max\ F} - 2(R_{zD} + R_{zd});$$

$$S_{min\ t} = S_{min\ F} - 2(R_{zD} + R_{zd}).$$

2.1.14. В таблицах ГОСТ 25347-82 выбирается стандартная посадка из условия

$$S_{mi\ n} \geq S_{min\ t};$$
$$S_{max} \leq S_{max\ t}.$$

где $S_{mi\ n}$ и $S_{max}$ - наименьший и наибольший табличные зазоры по ГОСТ 25347-82

При выборе посадки следует руководствоваться следующими условиями:

1. Посадка, по возможности, должна состоять из предпочтительных полей допусков, первого ряда предпочтительности;

2. Допускается применять стандартную посадку первого ряда предпочтительности, у которой $S_{min}$ будет меньше $S_{min\,t}$, но не более 15%;

3. Если окажется, что посадка должна быть 5-го квалитета или точнее, то в таком случае следует принять посадку более грубого квалитета (например, 6-го или 7-го) и назначить селективную сборку. Для такой посадки следует принимать поля допусков вала и отверстия одного квалитета. У принятой посадки средний зазор $S_m$ должен быть близким к $S_{opt}$;

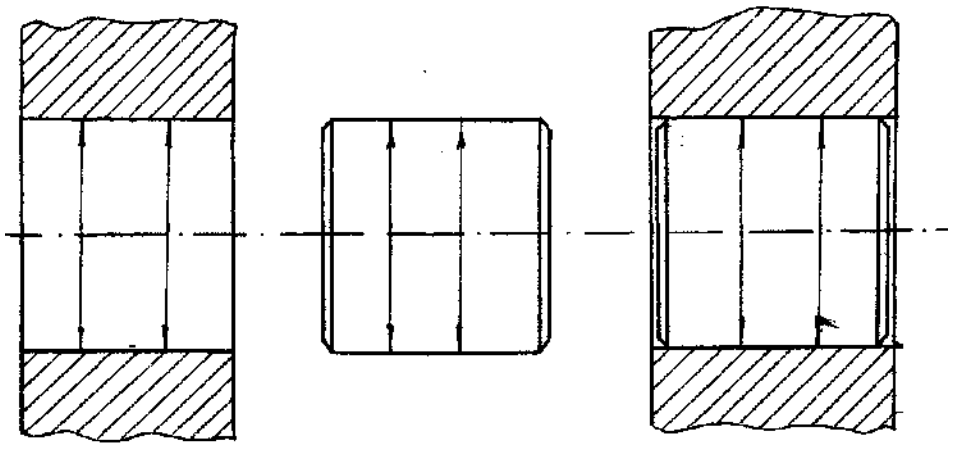
4. Количество групп сортировки определяется по зависимости:

$$n = \frac{T_s}{T_{sF}},$$

где $T_s$ - допуск у принятой стандартной посадки по ГОСТ 25347-82;

$T_{sF}$ - допуск посадки с зазором, полученный расчетом.

2.1.15. Выполнить эскиз вала, отверстия и вала в сборе, аналогично эскизов в работе №1. На эскизах нанести размеры с нанесением условных и числовых отклонений и нанести шероховатость по $R_a$.



## *2.2. Расчет и выбор посадки с натягом*

По заданным нагрузкам и размерам соединяемых деталей рассчитать и выбрать стандартную посадку с гарантированным натягом.

Для выполнения работы необходимо иметь ГОСТ 25347-82.

Последовательность расчета:

2.2.1. По заданным значениям внешних сил и размерам сопрягаемых деталей определяется наименьшее удельное давление на сопрягаемых поверхностях соединяемых деталей.

При действии на соединение только осевой силы $P_o$, наименьшее удельное давление определяется по зависимости, Па

$$P_{min} = \frac{P_o}{\pi \cdot D \cdot L \cdot f} \quad ,$$

При действии на соединение только крутящего момента $M_к$, $P_{min}$ находится из уравнения, Па:

$$P_{min} = \frac{2 \cdot M_к}{\pi \cdot D^2 \cdot L \cdot f} \quad ,$$

При действии на соединение одновременно $P_о$ и $M_к$ минимальное удельное давление $P_{min}$ определяется по равнодействующей сил, Па

$$P_{min} = \frac{R}{\pi \cdot D \cdot L \cdot f} \quad ,$$

где $R = \sqrt{P_0^2 + M^2}$ , н

$P_о$ – продольная осевая сила, стремящаяся сдвинуть одну деталь относительно другой, Н;

$M_к$ – крутящий момент, стремящийся повернуть одну деталь относительно другой, Н·м;

$D$ – диаметр соединения, м;

$L$- длина контакта сопрягаемых поверхностей, м

*f* - коэффициент трения при установившемся режиме распрессовки или проворачивания.

Коэффициент *f* зависит от материала сопрягаемых деталей, способа сборки, шероховатости поверхностей и других факторов.

В табл. 2.7. приведены коэффициенты трения при сборке деталей под прессом. Если детали будут собираться термическим способом, то коэффициент *f* следует увеличить в 1,8 раза, например, если обе сопрягаемые детали изготавливаются из стали, то при сборке деталей под прессом *f* = 0,008, а при термической сборке *f* = 0,14.

*Таблица 2.7*

**Значение коэффициентов трения**

| Материал сопрягаемых деталей | Коэффициент трения *f* |
|---|---|
| Сталь – сталь | 0,06 ÷ 0,12 |
| Сталь – чугун | 0,07 ÷ 0,12 |
| Сталь – алюминиевые сплавы | 0,03 ÷ 0,05 |
| Сталь – латунь | 0,05 ÷ 0,10 |
| Сталь - бронза | 0,06 ÷ 0,10 |

*Таблица 2.8*

**Допустимые пределы текучести и коэффициенты линейного расширения некоторых сплавов**

| Марка сплава | $\sigma_т$, МПа | $\lambda \cdot 10^6$ $1/^0C$ | Марка сплава | $\sigma_т$, МПа | $\lambda \cdot 10^6$ $1/^0C$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Сталь СТ 3 | 196 | 11,1 | Сталь 50Х | 880 | 13,4 |
| Сталь СТ 5 | 265 | 11,1 | Сталь 45Х | 850 | 13,4 |
| Сталь 08 | 190 | 11,1 | Сталь 40Х | 785 | 13,4 |
| Сталь 20 | 198 | 11,9 | Сталь 30Х | 687 | 11,3 |
| Сталь 30 | 245 | 11,1 | Сталь 20Х | 638 | 11,3 |
| Сталь 35 | 270 | 11,1 | Сталь 20Г | 275 | 12,3 |
| Сталь 40 | 275 | 11,3 | Сталь 30Г | 314 | 12,6 |
| Сталь 45 | 310 | 11,6 | Сталь 40Г | 353 | 9,4 |
| Сталь 50 | 314 | 11,2 | Сталь 50Г | 392 | 11,6 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Сталь 55 | 324 | 11,0 | Сталь 65Г | 432 | 11,6 |
| Алюминиевые сплавы | | | Чугуны СЧ 21-40 | 162 | 10,2 |
| Д-1 | 245 | 22,9 | СЧ 24-44 | 206 | 10,1 |
| Д-6 | 294 | 22,0 | СЧ 28-48 | 242 | 10,0 |
| В-95 | 540 | 23,1 | СЧ 32-52 | 267 | 10,0 |
| АЛ-12 | 118 | 22,0 | КЧ 35-10 | 215 | 10,2 |
| АЛ-13 | 98 | 20,0 | КЧ 37-12 | 226 | 10.0 |
| | | | ВЧ 40-10 | 294 | 10.0 |
| Бронзы | | | | | |
| БраЖМУ10-3-1,5 | 343 | 16,1 | | | |
| БрОЦС 6-6-3 | 145 | 17,1 | | | |
| Латунь | | | | | |
| ЛАЖМУ | 396 | 18,7 | | | |
| ЛМУСС | 343 | 17,0 | | | |

*Таблица 2.9*

**Значение модуля упругости и коэффициента Пуассона**

| Материал | Модуль упругости *E*, МПа | Коэффициент Пуассона $\mu$ |
|---|---|---|
| Сталь | 210000 | 0,3 |
| Чугун | 110000 | 0,25 |
| Бронза | 84000 | 0,35 |
| Латунь | 78000 | 0,38 |

2.2.2. Определяется коэффициент Ляме, исходя из размеров сопрягаемых деталей

$$C_1 = \frac{1+(d_1/D)^2}{1-(d_1/D)^2} - \mu_1; \quad C_2 = \frac{1+(D/d_2)^2}{1-(D/d_2)^2} + \mu_2;$$

где $D$ - диаметр соединения, мм;

$d_1$ - диаметр отверстия пустотелого вала, мм;

$d_2$ – диаметр наружной поверхности втулки, мм;

$\mu$ - коэффициент Пуассона.

2.2.3. Определяется наименьший допустимый натяг в соединении, мкм

$$N_{minF} = P_{min} \cdot D \left( \frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right) \cdot 10^6,$$

где $D$ – диаметр соединения, м;

$E_1$ и $E_2$ – модуль упругости материалов, соответственно для материала вала и материала втулки, Па;

$P_{min}$ – удельное давление, Па.

2.2.4. На основе теории наибольших касательных напряжений определяются максимальные допустимые удельные давления $P_{max}$, при котором отсутствуют пластические деформации на контактных поверхностях деталей. В качестве $P_{maxF}$ ,берется наименьшее значение $P_{max}$, Па.

$$P_{max1}= 0{,}58\ \sigma_{T1}\ [1- (d_1/D)^2];$$

$$P_{max1}= 0{,}58\ \sigma_{T2}\ [1- (D/d_2)^2];$$

где $\sigma_{T1}$ и $\sigma_{T2}$ - предел текучести материалов вала и втулки, Па. (Таблица2.8)

2.2.5. Определяется наибольший расчетный натяг, мкм

$$N_{maxF}= P_{max} \cdot D \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2}\right) \cdot 10^6$$

2.2.6. Определяется допуск посадки, мкм

$$T_N = N_{maxF} - N_{minF}.$$

2.2.7. Устанавливается степень точности соединяемых деталей

$$a = \frac{T_N}{2 \cdot i},$$

где $i$- единица допуска, мкм, принять по таблице 2.4.

По величине «а» в таблице 2.3. устанавливается квалитет сопрягаемых деталей. Если «а» равно 25 единицам и более, следует принимать посадки с натягом 8-го квалитета или точнее. Для посадки зубчатого колеса на вал квалитет для отверстия следует принимать по степени точности зубчатого колеса.

2.2.8.В зависимости от квалитета сопрягаемых поверхностей определяется оптимальная шероховатость, величину которой можно принимать в процентах от допуска на размер детали:

- для деталей 7 и 8-го квалитетов $Rz \approx 0{,}16\ T_p$;
- для деталей 5 и 6-го квалитетов $Rz \approx 0{,}2\ T_p$.

Полученные значения шероховатости округляются до стандартных по ГОСТ2789-73.(Таблица 2.6)

2.2.9. С учетом оптимальной шероховатости определяются технологические натяги, мм

$$N_{min\,t} = N_{minF} + 1{,}2(R_{z\,d} + R_{z\,D});$$

$$N_{max\,t} = [N_{maxF} + 1{,}2(R_{z\,d} + R_{z\,D})] \times 0{,}9.$$

2.2.10. В таблицах ГОСТ 25347-82 принимаются предельные отклонения основного отверстия, согласно принятого квалитета.

2.2.11. Нижнее технологическое отклонение вала находится по условию:

$$ei_t = N_{min\,t} + ES.$$

По нижнему отклонению вала в таблицах ГОСТ 25347-82 подбирается такое поле допуска вала, у которого

$$ei \geq ea_t, \quad \text{а} \quad es \leq N_{max\,t},$$

где $ei$ и $es$ – табличные значения нижнего и верхнего отклонений вала.

2.2.12. Дать эскизы сопрягаемых деталей в сборе и отдельно для вала и для втулки, аналогично, как в работе №1. На эскизах деталей нанести шероховатость по критерию $R_a$.

### *2.3. Выбор посадок для подшипников качения*

Данные для расчета задаются преподавателем.

Выбор посадок для поверхностей деталей машин, сопрягаемых с кольцами подшипников качения зависит от вида нагружения кольца подшипника. ГОСТ 3325-85 устанавливает три вида нагружения колец подшипников качения:

местное, циркуляционное и колебательное.

Местным нагружением кольца считается такой вид нагружения, при котором действующая на подшипник результирующая радиальная нагрузка постоянно воспринимается одним и тем же ограниченным участком дорожки качения этого кольца и передается соответствующему участку посадочной поверхности вала или корпуса.

Такой вид нагружения имеет место когда кольцо не вращается относительно действующей на него нагрузки или кольцо и нагрузка участвуют в сов-

местном вращении. В качестве примеров местного нагружения можно привести наружное кольцо в корпусе редуктора или внутреннее кольцо в катке гусеничного механизма.

Циркуляционным нагружением кольца считается такой вид нагружения, при котором действующая на подшипник результирующая радиальная нагрузка воспринимается и передается телами качения в процессе вращения дорожки качения последовательно всей посадочной поверхности вала или корпуса.

Такой вид нагружения возникает у вращающегося кольца при неподвижной нагрузке, например, внутреннее кольцо подшипника в редукторе, или наружное кольцо в катке гусеничного механизма.

Колебательным нагружением кольца считается такой вид нагружения, при котором неподвижное кольцо подшипника подвергается одновременному воздействию радиальных нагрузок постоянной по направлению $P_c$ и вращающей $P_\nu$ меньшей или равной по величине $P_c$.

Их равнодействующая $R$ совершает периодическое колебательное движение. Посадки на колебательно нагруженное кольцо назначают как для местно-нагруженного кольца если $P_c \geq P_\nu$ или как для циркуляционно-нагруженого кольца, если $P_\nu \geq P_c$.

Посадки для местно-нагруженных колец выбираются с небольшим гарантированным зазором из расчета, чтобы кольцо имело возможность за период эксплуатации совершить хотя бы один оборот. Для этой цели используются посадки с малым гарантированным зазором. Конкретную посадку можно выбрать согласно таблицы 2.10.

*Таблица 2.10*

**Поля допусков для поверхностей деталей, сопрягаемых с кольцами, имеющими местное нагружение**

| Номинальные размеры | | Поля допусков | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Для валов | | Для отверстий в корпусе | | | | Тип подшипников |
| | | | | Не разъемных | | разъемных | | |
| | | Класс точности и подшипников | | | | | | |
| | | P0; P6 | P4; P5 | P0; P6 | P5; P4 | P0; P6 | P5; P4 | |
| Св. | до | Нагрузка спокойная умеренная | | | | | | |
| - | 80 | h6 | h5 | H7 | H6 | H7 | H6 | Все типы кроме |
| 80 | 260 | g6 | g5 | G7 | G6 | H7 | H6 | штампованных |
| 260 | 500 | f6 | g5 | G7 | G6 | H7 | H6 | и упорных |
| 500 | 1600 | - | - | F7 | G6 | H7 | H6 | |
| | | Нагрузка с ударами и вибрацией | | | | | | |
| - | 80 | h6 | h5 | $I_S7$ | $I_S6$ | $I_S7$ | $I_S6$ | Все типы кроме |
| 80 | 260 | h6 | h5 | H7 | H6 | $I_S7$ | $I_S6$ | штампованных |
| 260 | 500 | g6 | g5 | H7 | H6 | $I_S7$ | $I_S6$ | и конических |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 500 | 1600 | - | - | H7 | H6 | IS7 | IS6 | |
| -<br>120 | 120<br>1600 | h6<br>g6 | h5<br>g5 | H7<br>H7 | H6<br>H6 | IS7<br>IS7 | IS6<br>IS6 | Для роликовых конических двухрядных |

Посадка циркуляционно-нагруженных колец должна осуществляться с гарантированным натягом. Для этой цели используются следующие поля допусков:

а) если наружное кольцо имеет циркуляционное нагружение, то отверстие в корпусе обрабатывают с полями допусков:

для подшипников класса *P0* и *P6 - K7; M7; N7; P7*;

для подшипников класса *P5* и *P4 - K6; M6; N6; P6*;

б) если внутренне кольцо имеет циркуляционное нагружение, то шейку вала следует обрабатывать с полями допусков:

для колец подшипников класса *P0* и *P6 – $j_s$ 6; к6; m6; n6; p6; r6*

для колец подшипников класса *P5* и *P4 - $j_s$ 5; к5; m5; n5*.

Конкретное поле допуска может быть определено расчетным путем.

Если внутреннее кольцо имеет циркуляционное нагружение, то посадку можно выбрать по величине наименьшего натяга, который можно определить из уравнения, мм

$$N_{minF} = \frac{13 \cdot R \cdot к}{b \cdot 10^6},$$

где $R$ – суммарная радиальная нагрузка, действующая на опоры, *Кн*;

$K$ – коэффициент, принимаемый для подшипников серии диаметров 9, 8, 7, 0, 1 ,2 или серии ширин 8, 7, 1, 0 (легкая серия) равным 2,8; для серии 1 диаметров 3, 5, 6 или серии ширин 2,3 (средняя серия) равным 2,3; для серии диаметров 4, 6 или серий ширин 4, 5, 6 (тяжелая серия) равным 2,0.

$b$ – активная часть кольца подшипника, м

$$b = B - 2 \cdot r$$

где B – ширина кольца, м

r – размер фаски кольца, м

Во избежание разрыва кольца выбранная посадка проверяется на максимальный натяг, допустимая величина максимального натяга определяется из зависимости, мм

$$N_{max\ F} = \frac{11{,}4 \cdot Kd[\sigma_D]}{(2K - 2)\ 10^3},$$

где $[\sigma_P]$ - допускаемое напряжение на растяжение, МПа
(для подшипниковой стали 400 МПа)
$d$ - диаметр внутреннего кольца подшипника качения, м

Поле допуска выбирается из условия $ei_t \geq N_{minF}$,, но принятое поле допуска не должно создавать натяг $N_{max} \leq N_{max\,F}$

При циркуляционном нагружении кольца подшипника выбор посадки на вал и отверстие корпуса можно производить по интенсивности нагружения на посадочной поверхности кольца подшипника качения. Величину интенсивности можно подсчитать по зависимости, кН/м

$$P_R = \frac{R}{b} K_1 K_2 K_3,$$

где $R$ - радиальная реакция опоры на подшипник, кН
$b$ - рабочая ширина посадочного места, м

$$b = B - 2 \cdot r$$

B - ширина кольца подшипника, м
r - радиус закругления или ширина фаски кольца подшипника, м
$K_1$ - динамический коэффициент посадки, зависящий от характера нагрузки, принимается по таблице 2.11.
$K_2$ - коэффициент, учитывающий степень ослабления посадочного натяга при полом вале или тонкостенном корпусе, принимается по таблице 2.12. Для сплошного вала $K_2 = 1$;
$K_3$ - коэффициент неравномерности распределения радиальной нагрузки E между рядами роликов в двухрядных конических роликоподшипниках или между сдвоенными шарикоподшипниками при наличии осевой нагрузки A на опору. Значение коэффициента $K_3$, зависящее от $A / R \cdot ctg\beta$ приведено в табл. 2.13 (угол $\beta$ - угол контакта тел качения с дорожкой качения наружного кольца зависит от конструкции подшипника $\beta = 12°; 26°; 36°$. Для однорядных подшипников $K_3 = I$.

*Таблица 2.11*

| Характер нагрузки | $K_1$ |
|---|---|
| Нагрузка с умеренными толчками и вибрацией | 1,0 |
| Нагрузка с сильными толчками и вибрацией, перегрузки достигают до 300% | 1,8 |

*Таблица 2.12*

**Коэффициент $K_2$**

| $d_0/d$ | $D/D_H$ | Значение коэффициента для | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | вала | | | корпуса |
| Св. | До | $D/d \le 1,5$ | $D/d>1,5$ | $D/d>2-3$ | |
| - | 0.4 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 0.4 | 0.7 | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.1 |
| 0.7 | 0.8 | 1.5 | 1.7 | 2.0 | 1.4 |
| 0.8 | - | 2.0 | 2.3 | 3.0 | 1.8 |

*Таблица 2.13*

**Коэффициент $K_3$**

| A/R ctg β | | $K_3$ |
|---|---|---|
| Св. | до | |
| - | 0.2 | 1.0 |
| 0.2 | 0.4 | 1.2 |
| 0.4 | 0.6 | 1.4 |
| 0.6 | 1.0 | 1.6 |
| 1.0 | | 2.0 |

По величине $P_R$ в табл. 2.14 выбирается поле допуска для поверхности детали, сопрягаемой с циркуляционно-нагруженным кольцом. Поля допусков принимаются для подшипников классов РО и Р6 для корпуса по 7-му квалитету, для вала по 6-му квалитету; для подшипников классов Р5 и Р4 принимаются для отверстия в корпусе по 6-му квалитету, а для вала по 5-му квалитету.

*Таблица 2.14*

**Допустимые интенсивности нагрузок на вал и корпус для подшипников качения**

| Диаметр, мм | | Допустимые значения $P_R$, кН/м | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Поля допусков вала | | | | |
| Св. | до | $j_s6$; $j_s5$ | k6; k5 | m6; m5 | n6; n5 | p6 |
| 18 | 80 | до 300 | 300-1350 | 1350-1600 | 1600-3000 | св. 3000 |
| 80 | 180 | 550 | 550-2000 | 2000-2500 | 2500-4000 | 4000 |
| 180 | 360 | 700 | 700-3000 | 3000-3500 | 3500-6000 | 6000 |
| 360 | 630 | 900 | 900-3400 | 3400-4500 | 4500-8000 | 8000 |
| Диаметр, мм | | Поля допусков корпуса | | | | |
| Св. | до | К7; К6 | М7; М6 | N7; N6 | Р7; Р6 | |
| 50 | 180 | до 800 | 800-1000 | 1000-1300 | 1300-2500 | |
| 180 | 360 | 1000 | 1000-1500 | 1500-2000 | 2000-3300 | |
| 360 | 630 | 1200 | 1200-2000 | 2000-2600 | 2600-4000 | |
| 630 | 1600 | 1600 | 1600-2500 | 2500-3500 | 3500-5500 | |

Работа должна выполняться в следующей последовательности.

По номеру подшипника в справочнике определить размеры колец подшипников.

По классу точности подшипника в стандарте ГОСТ 520-71 ( СТ СЭВ 774-77) или справочнике определить числовые предельные отклонения для наружного диаметра D и внутреннего диаметра d .

Установить характер нагружения колец подшипников качения, исходя из условия работы подшипника.

Для местно-нагруженного кольца в табл. 2.10 подобрать поля допусков согласно класса точности кольца подшипника.

Выполнить расчет посадки для циркуляционно-нагруженного кольца подшипника.

Для принятых полей допусков в табл. ГОСТ 25347-82 определить числовые отклонения для вала и отверстия в корпусе.

По предельным отклонениям построить схемы полей допусков.

Подсчитать зазоры и натяги для посадки наружного и внутреннего колец подшипников и заполнить таблицу отчета по образцу (табл. 2.15).

*Таблица 2.15*

**Анализ посадок подшипникового соединения**

| Класс точности подшипника | | Сопряжения подшипника | |
|---|---|---|---|
| | | С валом | С корпусом |
| Посадка | | | |
| Отклонение вала, мкм | es | | |
| | ei | | |
| Отклонения отверстия, мкм | ES | | |
| | EI | | |
| Натяги, мкм | $N_{max}$ | | |
| | $N_{min}$ | | |
| Зазоры, мкм | $S_{max}$ | | |
| | $S_{min}$ | | |

Выполнить эскизы опоры, шейки вала и отверстия в корпусе. На эскизе узла нанести только условные обозначения полей допусков сопрягаемых деталей. Обозначение полей допусков колец подшипников на сборочном чертеже не указывается. На эскизах деталей нанести: условное и числовое обозначение предельных отклонений, допуск цилиндричности, биение заплечиков и шероховатость.

Допуск цилиндричности принимать равным 1/4 от допуска размера для поверхностей деталей, сопрягаемых с кольцом подшипника классов РО и Р6 или 1/8 от допуска размера для подшипников классов Р5 и Р4. Допуски торцового биения принять по табл. 2.16, а допустимую шероховатость по критерию Ra в табл. 2.17.

*Таблица 2.16*

**Биение заплечиков в мкм (не более )**

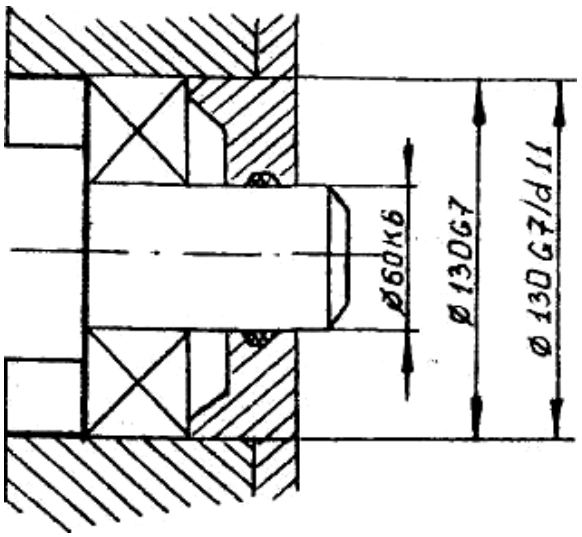
| Заплечиков валов | | | | | Заплечиков корпуса | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| d, мм | Р0 | Р6 | Р5 | Р4 | D, мм | Р0 | Р6 | Р5 | Р4 |
| | Классы подшипников | | | | | Классы подшипников | | | |
| До 50 | 20 | 10 | 7 | 4 | До 80 | 40 | 20 | 13 | 8 |
| Св 50 до 120 | 25 | 12 | 8 | 6 | Св 80 до 120 | 45 | 22 | 15 | 9 |
| Св 120 до 250 | 30 | 15 | 10 | 8 | Св 120 до 150 | 50 | 25 | 18 | 10 |
| Св 250 до 315 | 35 | 17 | 12 | 9 | Св 150 до 180 | 60 | 30 | 20 | 12 |
| Св 315 до 400 | 40 | 20 | 13 | 5 | Св 180 до 250 | 70 | 35 | 23 | 14 |
| | | | | | Св 250 до 315 | 80 | 40 | 27 | 16 |
| | | | | | Св 315 до 400 | 90 | 45 | 30 | 18 |
| | | | | | Св 400 до 500 | 100 | 50 | 33 | 12 |

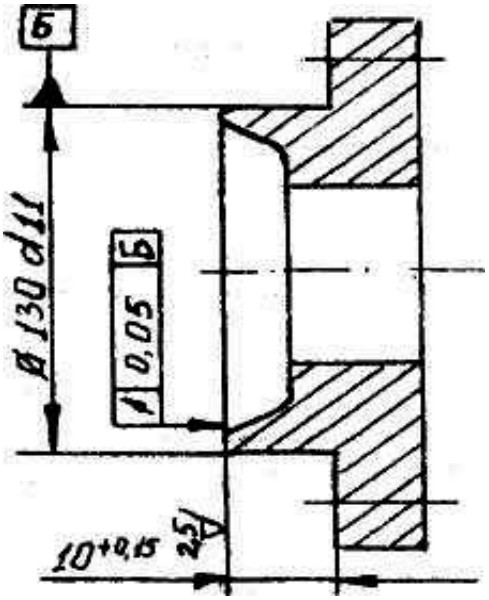
*Таблица 2.17*

**Шероховатость по Ra, мкм, для посадочных мест под подшипники**

| Посадочные места | Классы точности подшипников | Ra для номинальных диаметров, мкм | |
|---|---|---|---|
| | | До 80 | Св 80 |
| На валах | Р0<br>Р6 и Р5<br>Р4 | 1,25<br>0,63<br>0,32 | 2,50<br>1,25<br>0,63 |
| В отверстии корпуса | Р0<br>Р6, Р5, Р4 | 1,25<br>0,63 | 2,50<br>1,25 |
| Торцы заплечиков вала и корпуса | Р0<br>Р6, Р5, Р4 | 2,50<br>1,25 | 2,50<br>2,5 |

Образец выполнения эскиза опоры




### *2.4. Определение исполнительных размеров элементов зубчатого колеса, влияющих на норму бокового зазора*

Варианты задаются преподавателем.

У зубчатых колес норму бокового зазора можно проверить при измерении следующих элементов:

I) предельных смещений исходного контура;

2) средней длины общей нормали;

3) размера постоянной хорды.

Допустимые размеры смещения исходного контура определяются по ГОСТ 1643-81.

2.4.1. Величина наименьшего дополнительного смещения исходного контура $E_{HS}$ принимается по табл. 14 ГОСТ 1643-81 (или табл. 2.18 настоящих методических указаний). Для нахождения необходимо знать вид бокового зазора, размер делительного диаметра и степень точности по норме плавности.

Номинальный размер делительного диаметра можно определить по зависимости, мм

$$d = z \cdot m$$

Где z - число зубьев зубчатого колеса;

m- модуль, мм.

Степень точности может быть задана условным обозначением. Если у зубчатого колеса степень точности по всем нормам принята одна и та же, то условное обозначение имеет вид:

*8 - В ГОСТ 1643-81 .*

В данном примере степень по всем трем нормам, восьмая, вид бокового зазора "В" и вид допуска на боковой зазор " в ".

При комбинированной степени точности условное обозначение имеет вид:

8 - 7 - 7 - Ва ГОСТ 1643-81

Вид допуска

Вид бокового зазора

Степень по норме контакта

Степень по норме плавности

Степень по норме кинематической точности

*Таблица 2.18*

**Нормы бокового зазора (показатель – $E_{HS}$)**

| Вид сопряжения | Степень точности по нормам плавности | делительный диаметр d, мм | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | до 80 | св 80 до 125 | св 125 до 180 | св 180 до 250 | св 250 до 315 | св 315 до 400 |
| | | мкм | | | | | |
| Н | 3 – 6 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 |
| | 7 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 25 |
| Е | 3 – 6 | 30 | 35 | 40 | 46 | 52 | 57 |
| | 7 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 |
| D | 3 – 6 | 46 | 54 | 63 | 72 | 81 | 89 |
| | 7 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 8 | 55 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 |
| C | 3 – 6 | 74 | 87 | 100 | 115 | 130 | 140 |
| | 7 | 80 | 100 | 110 | 120 | 140 | 160 |
| | 8 | 90 | 110 | 120 | 140 | 160 | 180 |
| | 9 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
| B | 3 – 6 | 120 | 140 | 160 | 185 | 210 | 230 |
| | 7 | 140 | 160 | 180 | 200 | 250 | 250 |
| | 8 | 140 | 160 | 200 | 220 | 250 | 280 |
| | 9 | 160 | 180 | 200 | 250 | 280 | 300 |
| A | 3 – 6 | 190 | 220 | 250 | 290 | 320 | 360 |
| | 7 | 200 | 250 | 280 | 300 | 350 | 400 |
| | 8 | 220 | 280 | 300 | 350 | 400 | 450 |
| | 9 | 250 | 280 | 350 | 400 | 400 | 500 |

*Таблица 2.19*

**Норма кинематической точности**

| Степень точности | Обозначение показателя | Модуль, мм | Делительный диаметр d, мм | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | до 125 | св 125 до 400 | св 400 до 800 | св 800 до 1600 |
| | | | Размер показателя, мкм | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 6 | Fr | от 1 до 3,5 | 25 | 36 | 45 | 50 |
| | | св 3,5 до 6,3 | 28 | 40 | 50 | 56 |
| | | св 6,3 до 10 | 32 | 45 | 56 | 63 |
| | Fvw | от 1 до 16 | 16 | 28 | 45 | 70 |
| | Fi ” | от 1 до 3,5 | 36 | 50 | 63 | 71 |
| | | св 3,5 до 6,3 | 40 | 56 | 71 | 80 |
| | | св 6,3 до 10 | 45 | 63 | 80 | 90 |
| 7 | Fr | от 1 до 3,5 | 36 | 50 | 63 | 71 |
| | | св 3,5 до 6,3 | 40 | 56 | 71 | 80 |
| | | св 6,3 до 10 | 45 | 63 | 80 | 90 |
| | Fvw | от 1 до 25 | 22 | 40 | 60 | 100 |
| | Fi ” | от 1 до 3,5 | 50 | 71 | 90 | 100 |
| | | св 3,5 до 6,3 | 56 | 80 | 100 | 112 |
| | | св 6,3 до 10 | 63 | 90 | 112 | 125 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 8 | Fr | от 1 до 3,5 | 45 | 63 | 80 | 90 |
| | | св 3,5 до 6,3 | 50 | 71 | 90 | 100 |
| | | св 6,3 до 10 | 56 | 80 | 100 | 112 |
| | | от 1 до 16 | - | 90 | 112 | 125 |
| | Fvw | от 1 до 40 | 28 | 50 | 80 | 120 |
| | Fi ” | от 1 до 3,5 | 63 | 90 | 112 | 125 |
| | | св 3,5 до 6,3 | 71 | 100 | 125 | 140 |
| | | св 6,3 до 10 | 80 | 112 | 140 | 160 |
| | | от 1 до 16 | - | 125 | 160 | 180 |
| 9 | Fr | от 1 до 3,5 | 71 | 80 | 100 | 112 |
| | | св 3,5 до 6,3 | 80 | 100 | 112 | 125 |
| | | св 6,3 до 10 | 90 | 112 | 125 | 140 |
| | | от 1 до 16 | - | 125 | 160 | 160 |
| | Fi ” | от 1 до 3,5 | 90 | 112 | 140 | 160 |
| | | св 3,5 до 6,3 | 112 | 140 | 160 | 180 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | св 6,3 до 10<br>от 1 до 16 | 125<br>- | 160<br>180 | 180<br>224 | 200<br>224 |
| 6 | Fc | от 1 до 16 | 16 | 28 | 45 | 70 |
| 7 | Fc | от 1 до 16 | 22 | 40 | 60 | 100 |
| 8 | Fc | от 1 до 16 | 28 | 50 | 80 | 120 |

*Таблица 2.20*

**$T_H$ – допуск на смещение исходного контура, мкм**

| Вид сопряжения | Вид допуска | Допуск на радиальное биение зубчатого венца Fr | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | св 25 до 32 | св 32 до 40 | св 40 до 50 | св 50 до 60 | св 60 до 80 | св 80 до100 | св 100 до 125 |
| H, E | h | 55 | 60 | 70 | 80 | 110 | 120 | 160 |
| D | d | 70 | 80 | 90 | 100 | 140 | 160 | 200 |
| C | c | 90 | 100 | 120 | 140 | 180 | 200 | 250 |
| B | b | 100 | 120 | 140 | 180 | 200 | 250 | 300 |
| A | a | 140 | 160 | 180 | 200 | 250 | 300 | 350 |

2.4.2. Наибольшее дополнительное смещение исходного контура определяется из условия:

$$E_{Hi} = | E_{Hs} | + T_H,$$

где $T_H$ – допуск на смещение исходного контура.

Допуск $T_H$ – принимают по табл. ГОСТ 1643-81 (или табл. 2.20 методических указаний) по величине допуска на радиальное биение зубчатого венца $F_r$ и виду допуска на боковой зазор.

Допуск на радиальное биение зубчатого венца $F_r$ принимается по табл. 6 ГОСТ 1643-81 (или табл. 2.19 методических указаний) по величине делительного диаметра и степени точности по норме кинематической точности.

Наименьшее и наибольшее смещения исходного контура принимаются всегда в тело колеса, т.е. для внешних колес внешнего зацепления принимается смещение исходного контура со знаком «минус», а для зубчатых колес внутреннего зацепления принимается со знаком «плюс».

2.4.3. Номинальный размер длины общей нормали для цилиндрических зубчатых колес с прямыми зубьями определяют по зависимости, мм

$$W = m\,[1{,}476\,(2\cdot Z_{wr} - 1) + 0{,}0149\cdot z]$$

где m – модуль зубчатого колеса, мм;

z – число зубьев зубчатого колеса, мм;

$Z_{wr}$ – число зубьев в длине общей нормали; для цилиндрических зубчатых колес принимается по зависимости:

$$Z_{wr} = 0{,}111\cdot z + 0{,}5.$$

Полученную величину $Z_{wr}$ округляют до целого числа, например, 2, 3, 4, 5 и т.д.

Исполнительный размер должен иметь два предельных отклонения.

Наименьшее уменьшение длины общей нормали принимают из двух таблиц ГОСТ 1643-81. Первое слагаемое $E_{wms}$ *I* принимают в табл. 16 по размеру делительного диаметра и виду бокового зазора; второе слагаемое принимается в табл. 17 по величине допуска на радиальное биение зубчатого венца (табл. 2.21 и табл. 2.22 методических указаний)

$$E_{wms} = E_{wms}\, I + E_{wms}\, II.$$

*Таблица 2.21*

**Нормы бокового зазора (показатель – $E_{wms}$ слагаемое 1)**

| Вид сопряжения | Степень точности по нормам плавности | делительный диаметр, мм | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | до 80 | св 80 до 125 | св 125 до 180 | св 180 до 250 | св 250 до 315 | св 315 до 400 |
| | | мкм | | | | | |
| H | 3 – 6<br>7 | 8<br>10 | 10<br>10 | 11<br>12 | 12<br>14 | 14<br>16 | 16<br>18 |
| E | 3 – 6<br>7 | 20<br>25 | 24<br>30 | 28<br>30 | 30<br>35 | 35<br>40 | 40<br>45 |
| D | 3 – 6<br>7<br>8 | 30<br>35<br>40 | 35<br>40<br>50 | 40<br>50<br>50 | 50<br>55<br>60 | 55<br>60<br>70 | 60<br>70<br>70 |
| C | 3 – 6<br>7<br>8<br>9 | 50<br>55<br>60<br>70 | 60<br>70<br>80<br>80 | 70<br>70<br>80<br>100 | 80<br>80<br>100<br>110 | 90<br>100<br>110<br>120 | 100<br>110<br>120<br>140 |
| B | 3 – 6<br>7<br>8<br>9 | 80<br>100<br>100<br>110 | 100<br>110<br>110<br>120 | 110<br>120<br>140<br>140 | 120<br>140<br>140<br>160 | 140<br>180<br>180<br>200 | 160<br>180<br>200<br>200 |
| A | 3 – 6<br>7<br>8<br>9 | 120<br>140<br>160<br>180 | 140<br>180<br>200<br>200 | 180<br>200<br>200<br>250 | 200<br>200<br>250<br>280 | 220<br>250<br>280<br>280 | 250<br>280<br>300<br>350 |

*Таблица 2.22*

**Нормы бокового зазора (показатель – $E_{wms}$ слагаемое 11)**

| Допуск на радиальное биение зубчатого венца Fr, мкм | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| св 25 до 32 | св 32 до 40 | св 40 до 50 | св 50 до 60 | св 60 до 80 | св 80 до100 | св 100 до 125 | св125 до160 | св160 До200 |
| 7 | 9 | 11 | 14 | 18 | 22 | 25 | 35 | 45 |
| $- E_{wms} = - (E_{wms}1 + E_{wms}11)$ | | | | | | | | |

Наибольшее уменьшение длины общей нормали определяется по зависимости:

$$E_{wmi} = |E_{wms}| + T_{wm},$$

где $T_{wm}$ – допуск на среднюю длину общей нормали, принимается по табл. 18 ГОСТ 1643-81 (или табл. 2.23 методических указаний) в зависимости от допуска на радиальное биение зубчатого венца и вида допуска на боковой зазор.

*Таблица 2.23*

**$T_{wm}$– допуск на среднюю длину общей нормали, мкм**

| Вид сопряжения | Вид допуска | Допуск на радиальное биение зубчатого венца Fr, мкм | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | св 25 до 32 | св 32 до 40 | св 40 до 50 | св 50 до 60 | св 60 до 80 | св 80 до100 | св 100 до 125 |
| H, E | h | 22 | 25 | 25 | 28 | 30 | 40 | 55 |
| D | d | 35 | 40 | 40 | 40 | 60 | 70 | 80 |
| C | c | 45 | 50 | 60 | 70 | 90 | 110 | 120 |
| B | b | 55 | 60 | 70 | 100 | 100 | 120 | 140 |
| A | a | 80 | 90 | 100 | 110 | 140 | 150 | 180 |

Для зубчатых колес внешнего зацепления отклонения принимаются со знаком «минус», т.е. в тело колеса:

$$W^{-Ewms}_{-Ewmi}$$

2.4.4. Исполнительный размер толщины зуба по постоянной хорде определяется в следующей последовательности.

Номинальный размер постоянной хорды для цилиндрических зубчатых колес с прямыми зубьями определяют по зависимости, мм

$$\overline{S_c} = 1{,}387 \cdot m,$$

где $m$ – модуль зубчатого колеса, мм.

Установочная высота постоянной хорды определяется по зависимости, мм

$$\overline{h_c} = 0{,}7476 \cdot m.$$

Наименьшее уменьшение постоянной хорды $E_{cs}$ принимается в табл. 20 ГОСТ 1643-81 (или табл. 2.24 методических указаний) по размеру делительного диаметра и виду бокового зазора.

*Таблица 2.24*

**Нормы бокового зазора (показатель – $E_{cs}$)**

| Вид сопряжения | Степень точности по нормам плавности | делительный диаметр d, мм | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | до 80 | св 80 до 125 | св 125 до 180 | св 180 до 250 | св 250 до 315 | св 315 до 400 |
| | | мкм | | | | | |
| D | 3 – 6<br>7<br>8 | 35<br>35<br>40 | 40<br>45<br>50 | 45<br>50<br>60 | 55<br>60<br>70 | 60<br>70<br>70 | 60<br>70<br>80 |
| C | 3 – 6<br>7<br>8<br>9 | 55<br>60<br>70<br>70 | 60<br>70<br>80<br>90 | 70<br>80<br>90<br>100 | 80<br>90<br>100<br>120 | 90<br>100<br>120<br>140 | 100<br>120<br>140<br>140 |
| B | 3 – 6<br>7<br>8<br>9 | 90<br>100<br>100<br>120 | 100<br>120<br>120<br>140 | 120<br>140<br>140<br>160 | 140<br>140<br>160<br>180 | 160<br>180<br>180<br>200 | 160<br>180<br>200<br>220 |
| A | 3 – 6<br>7<br>8<br>9 | 140<br>150<br>160<br>180 | 160<br>180<br>200<br>200 | 180<br>200<br>220<br>250 | 200<br>220<br>250<br>300 | 250<br>250<br>300<br>300 | 250<br>300<br>350<br>350 |

Наибольшее уменьшение постоянной хорды принимается из условия

$$E_{ci} = |E_{cs}| + T_c,$$

где $T_c$ – допуск на постоянную хорду, принимается по табл. 21 ГОСТ 1643-81 (или табл. 2.25 методических указаний) с учетом допусков на радиальное биение зубчатого венца и виду допуска на боковой зазор.

*Таблица 2.25*

**$T_c$– допуск на толщину зуба, мкм**

| Вид сопряжения | Вид допуска | Допуск на радиальное биение зубчатого венца Fr | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | св 25 до 32 | св 32 до 40 | св 40 до 50 | св 50 до 60 | св 60 до 80 | св 80 до100 | св 100 до 125 |
| H, E | h | 40 | 45 | 50 | 70 | 70 | 90 | 100 |
| D | d | 50 | 60 | 70 | 70 | 110 | 120 | 140 |
| C | c | 70 | 70 | 90 | 100 | 140 | 160 | 180 |
| B | b | 70 | 90 | 100 | 140 | 140 | 180 | 220 |
| A | a | 100 | 120 | 140 | 140 | 180 | 220 | 250 |

Для цилиндрических зубчатых колес внешнего зацепления предельные отклонения принимают в тело колеса, т.е. отклонения принимают минусовое значение:

$$\overline{S}_{c}^{-Ecs}_{-Eci}$$

Все полученные данные сводятся в таблицу 2. 26 .

*Таблица 2.26*

**Исполнительные размеры параметров**

| Обозначение параметра | Размер, мм | Обозначение параметра | Размер, мм |
|---|---|---|---|
| $E_{HS}$ | | $F_r$ | |
| $T_H$ | | $E_{CS}$ | |
| $E_{HI}$ | | $T_C$ | |
| $E_{wms}1$ | | $E_{CI}$ | |
| $E_{wms}11$ | | S | |
| $T_{wm}$ | | $h_C$ | |
| $E_{wmi}$ | | | |
| W | | | |

### *2.5. Решение размерных цепей*

Решение размерной цепи студенты выполняют при анализе размеров конкретной детали.

Студенту выдается чертеж ступенчатого валика или втулки с заданной последовательностью обработки.

В задаче требуется определить исполнительный размер одного из составляющих звеньев.

Работа выполняется в следующей последовательности.

2.5.1. Ознакомиться с определениями по размерным цепям, пользуясь конспектом лекций или учебной литературой

2.5.2. Построить схему размерной цепи.

2.5.3. Выявить замыкающее звено в размерной цепи.

2.5.4. Установить, какие составляющие звенья будут относиться к увеличивающим, а какие - к уменьшающим звеньям.

2.5.5. Определить числовые отклонения для всех звеньев размерной цепи по ГОСТ 25347-82 СТ СЭВ 144^75).

2.5.6. Путем решения размерной цепи определить исполнительный размер для заданного звена размерной цепи, для чего:

I) Записать уравнение предельных отклонений замыкающего звена, при решении размерной цепи методом Максимума-Минимума:

$$E_S A_\Delta = \sum_{j=1}^{k} \vec{E_S A_j} - \sum_{j=1}^{m} \overleftarrow{E_i A_j}$$

$$E_i A_\Delta = \sum_{j=1}^{k} \vec{E_i A_j} - \sum_{j=1}^{m} \overleftarrow{E_s A_j}$$

2) Подставить известные значения в уравнения размерной цепи и найти отклонения для заданного размера.

Приложение

**Варианты заданий для работы № 2**

Расчет и выбор посадки с зазором

| **Ва-риант** | **D, мм** | **L,** мм | **R**, н | **n** об/мин**.** | **Масло** | **t°**р |
|---|---|---|---|---|---|---|
| I | 100 | 90 | 9000 | 1250 | ИГП - 38 | 60 |
| 2 | 120 | НО | 6000 | 1800 | И – 30А | 60 |
| 3 | 140 | 100 | 18800 | 3000 | ИГП - 72 | 60 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 120 | 85 | 10000 | 1200 | ИГП - 49 | 60 |
| 5 | 170 | 150 | 18000 | 1250 | И – 20А | 50 |
| 6 | 40 | 60 | 17900 | 1950 | И – 40А | 50 |
| 7 | 32 | 50 | 8000 | 1600 | И – 50А | 65 |
| 8 | 70 | 60 | 17500 | 1950 | И – 40А | 50 |
| 9 | 92 | 85 | 12500 | 2500 | И – 30А | 60 |
| 10 | 50 | 45 | 4500 | 1250 | И – 40А | 60 |
| 11 | 50 | 50 | 7200 | 1500 | И – 50А | 65 |
| 12 | 180 | 160 | 18600 | 1250 | И – 25А | 50 |
| 13 | 125 | 65 | 13000 | 1450 | ИГП - 49 | 60 |
| 14 | 150 | 120 | 25000 | 2250 | И – 40А | 70 |
| 15 | 130 | 150 | 15000 | 860 | И – 30А | 65 |
| 16 | 85 | 80 | 4800 | 2000 | ИГП - 49 | 70 |
| 17 | 130 | 120 | 7000 | 1850 | И – 25А | 60 |
| 18 | 80 | 70 | 15000 | 1500 | ИГП - 38 | 65 |
| 19 | 45 | 45 | 7200 | 2500 | ИГП - 49 | 65 |
| 20 | 82 | 150 | 9500 | '960 | ИГП - 72 | 60 |
| 21 | 32 | 52 | 2500 | 3000 | ИГП - 18 | 50 |
| 22 | 165 | 125 | 12000 | 1250 | ИГП - 49 | 60 |
| 23 | 130 | 70 | 18000 | 2500 | ИГП - 72 | 65 |
| 24 | 180 | 120 | 12000 | 1860 | И – 50А | 60 |
| 25 | 65 | 80 | 8500 | 2800 | И – 40А | 50 |

Расчет и выбор посадок с натягом

| Номер варианта | D ,мм | $d_1$.мм | $d_{2,мм}$ | ι ,мм | $M_k$,Н.М | $p_0$, Н | Материал | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | Вала | Корпуса |
| 1. | 35 | 30 | 50 | 35 | 12 | 500 | Бронз-6-6-3 | Сталь 20 |
| 2. | 220 | 70 | 230 | 200 | 460 | 0 | Сталь 30 | Сталь 20 |
| 3. | 100 | 90 | 130 | 100 | 0 | 6000 | Сталь 20 | Сталь 30 |
| 4. | 40 | 20 | 60 | 60 | 320 | 0 | Сталь 30 | СЧ 21-40 |
| 5. | 50 | 40 | 70 | 80 | 350 | 0 | Сталь 20 | Сталь 35 |
| 6. | 110 | 100 | 130 | 120 | 200 | 1000 | Сталь 30 | Сталь 08 |
| 7. | 120 | 100 | 140 | 130 | 400 | 0 | Сталь 08 | Сталь 30 |
| 8. | 30 | 0 | 40 | 50 | 120 | 0 | Сталь 40 | Сталь 45 |
| 9. | 180 | 170 | 210 | 180 | 300 | 700 | Сталь 20 | Сталь 35 |
| 10. | 115 | 100 | 130 | 90 | 200 | 0 | Сталь 08 | Сталь 20 |
| 11. | 95 | 80 | **110** | 100 | 700 | 1000 | Сталь 20 | Сталь 35 |
| 12. | 140 | 130 | 180 | 120 | 460 | 0 | Сталь 08 | Сталь 30 |
| 13. | 40 | 20 | 60 | 60 | 100 | 0 | Сталь 35 | Сталь 35 |
| 14. | 200 | 100 | 220 | 110 | 0 | 1500 | Бронз 6-6-3 | Сталь 30 |
| 15. | 130 | 120 | 150 | 140 | 270 | 0 | Сталь 20 | Сталь 30 |
| 16. | 60 | 0 | 70 | 70 | 420 | 0' | Сталь-45 | Сталь 30 |
| 17. | 200 | 100 | 220 | 300 | 450 | 600 | Сталь 20 | Сталь 30 |
| 18. | 60 | 50 | 100 | 60 | 0 | 2000 | Сталь 20 | Сталь 30 |
| 19. | 100 | 90 | 120 | 60 | 320 | 0 | СЧ 21 | Сталь 20 |
| 20. | 130 | 120 | 160 | 150 | 350 | 0 | Сталь 20 | Сталь 45 |
| 21. | 60 | 50 | 100 | 60 | 150 | 0 | Сталь 20 | Сталь 30 |
| 22. | 75 | 60 | 100 | 80 | 250 | 0 | Сталь 08 | СЧ 21-40 |
| 23. | 90 | 0 | 100 | 140 | 900 | 0 | Сталь 30 | Сталь 40 |
| 24. | 150 | 140 | 170 | 150 | 960 | 0 | Сталь 20 | Сталь 30 |
| 25. | 170 | 150 | 180 | 250 | 280 | 1000 | Сталь 30 | Сталь 20 |

Расчет посадок для подшипников качения

| Номер вари-анта | Номер под-шипника | Класс | Рад. нагр. F, Н | Осев. нагр. $F_a$, Н | Характеристи-ки нагрузки | Что враща-ется | $D/D_k$ или d/a |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 80310 | 6 | 12000 | 0 | С ударами | Корпус | 0,4 |
| 2 | 7515 | 5 | 10000 | 0 | Умеренная | Вал | 0,4 |
| 3 | 60310 | 0 | 3800 | 0 | С ударами | Вал | 0,6 |
| 4 | 60306 | 4 | 5000 | 0 | Умеренная | Корпуса | 0,5 |
| 5 | 80312 | 6 | 4600 | 0 | С ударами | Корпус | 0,5 |
| 6 | 7220 | 5 | 20000 | 1000 | С ударами | Вал | 0,3 |
| 7 | 7214 | 4 | 13500 | 2000 | Умеренная | Вал | 0,7 |
| 8 | 46116 | 0 | 9500 | 1000 | С ударами | Корпус | 0,6 |
| 9 | 46114 | 6 | 14500 | 1500 | Умеренная | Корпус | 0,4 |
| 10 | 60306 | 5 | 10000 | 0 | С ударами | Вал | 0,3 |
| 11 | 80214 | 4 | 12000 | 0 | С ударами | Корпус | 0,5 |
| 12 | 7520 | 0 | 9600 | 1000 | Умеренная | Вал | 0,6 |
| 13 | 7314 | 6 | 3400 | 1800 | С ударами | Корпус | 0,7 |
| 14 | 46310 | 5 | 5750 | 500 | Умеренная | Вал | 0,6 |
| 15 | 3617 | 4 | 17000 | 150 | С ударами | Корпус | 0,8 |
| 16 | 7310 | 0 | 9500 | 500 | Умеренная | Вал | 0,5 ,, |
| 17 | 7208 | 6 | 6500 | 200 | С ударами | Вал | 0,4 |
| 18 | 36206 | 5 | 3800 | 250 | С ударами | Корпус | 0,5 |
| 19 | 36307 | 4 | 5900 | 500 | Умеренная | корпус | 0,5 |
| 20 | 7515 | 5 | 8500 | 600 | С ударами | Вал | 0,4 |
| 21 | 60305 | 6 | 7500 | 0 | С ударами | корпус | 0,6 |
| 22 | 3618 | 0 | 12000 | 1200 | Умеренная | Вал | 0,5 |
| 23 | 46310 | 6 | 9600 | 400 | С ударами | Вал | 0,6 |
| 24 | 34209 | 5 | 7500 | 900 | Умеренная | Корпус | 0,4 |
| 25 | 7218 | 4 | 21600 | 1000 | Умеренная | Корпус | 0,6 |

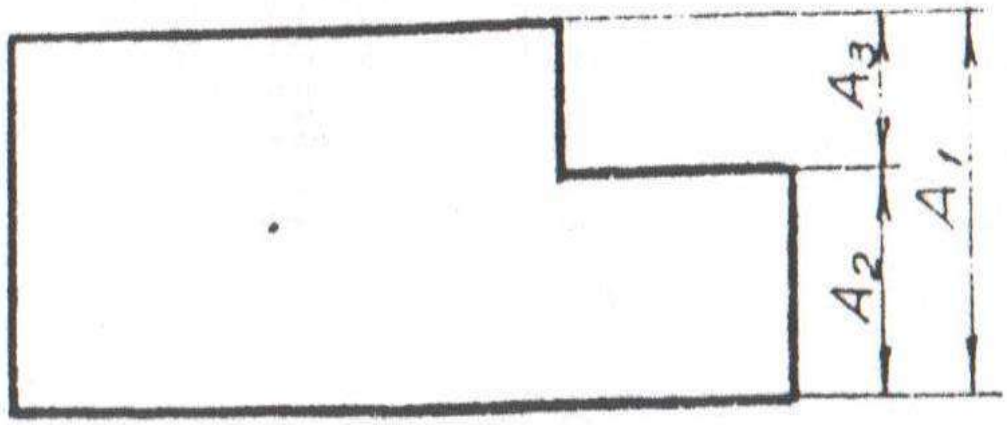
Определение элементов зубчатых колес

| Их вар. | Z | m | степени точности |
|---|---|---|---|
| 1 | 36 | 2.5 | 6-7-7-С |
| 2 | 28 | 3,0 | 7-6-6-В |
| 3 | 30 | 3,5 | 8-В |
| 4 | 40 | 4,0 | 8-7-7-Ва- |
| 5 | 29 | 4,0 | 7-6-6 -В |
| 6 | 32 | 5,0 | 7-В |
| 7 | 56 | 3,0 | 6-7-7-Д |
| 8 | 45 | 2,0 | 5-6-6-Д |
| 9 | 42 | 2,5 | 7-6-6-С |
| 10 | 25 | 3.0 | 8-7-7-Ва |
| 11 | 28 | 3,5 | 8-В а |
| 12 | 50 | 4,0 | 8-7-7-С |
| 13 | 36 | 3,5 | 8-В |
| 14 | 62 | 5,0 | 7-6-6-Ва |
| 15 | 46 | 3,0 | 8-В |
| 16 | 45 | 4,0 | 8-7-7-С |
| 17 | 38 | 3,0 | 8-7-7-В |
| 18 | 40 | 2,5 | 6-7-7-Д |
| 19 | 35 | 2,0 | 6-7-7-С |
| 20 | 22 | 4,0 | 8-В |
| 21 | 34 | 3.5 | 7-6-6-Ва |
| 22 | 32 | 4,0 | 8-В а |
| 23 | 60 | 5,0 | 7-В |
| 24 | 62 | 4,0 | 8-7-7-В а |
| 25 | 58 | 2,0 | 8-А |

Расчет размерных цепей

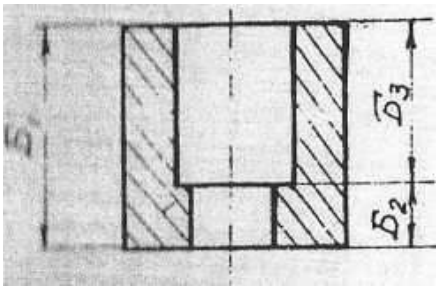
Задача № 1.

Определить исполнительный размер $A_j$ -го звена, при заданной последовательности обработки.




| Номер вар. | AI | A2 | A3 | Последовательность обработки | Определить размер |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 100 ℓ 11 | 40 | 60F9 | A2 и A3 | A2 |
| 6 | 120 d lo | 75 js 12 | 45 | A1 и A3 | A3 |
| 11 | 80 f9 | 50 js 11 | 30 | A1 и A3 | A3 |
| I6 | 150 8 | 65 | 85BII | A1 и A2 | A2 |
| 21 | 130 | 75 d 10 | 55AII | A1 и A2 | AI |

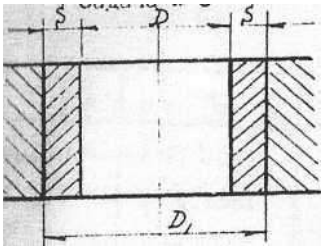
*Задача № 2*




Конструктор задал размеры $Б_I$ и $Б_2$, технологу удобнее обрабатывать в последовательности $Б_I :: Б_3$. Определить исполнительный размер $Б_3$ из условия, чтобы после обработки детали размеры $Б_1$ и $Б_2$ соответствовали заданным конструктором.

| Номер вар. | $Б_I$ | $Б_2$ | Номер вар. | $Б_I$ | $Б_2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 100 d 8 | 20 js 11 | 57 | 115 d 8 | 25 js 12 |
| 7 | 95 e 9 | 15 B 12 | 62 | 120 e 7 | 20 d 11 |
| 12 | 120 f 8 | 30 c 11 | 67 | 100 h 6 | 25 l 12 |
| 17 | 145 d 8 | 35 l 11 | 72 | 145 js 6 | 30 a 11 |
| 22 | 85 h 7 | 15 B 12 | 77 | 150 d 8 | 25 js 11 |

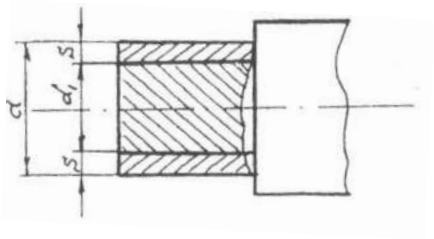
Задача № 3




Определить исполнительный размер отверстия $D_1$ до покрытия слоем металла, если после электрогальванического покрытия слоем $S_j$ на сторону, отверстие должно иметь размер D.

| Номер вар. | D | S | Номер вар. | D | S |
|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 140 D 10 | $0^{+0.06}_{+0.03}$ | 58 | 130 B 11 | $0^{+0.10}_{+0.07}$ |
| 8 | 125 E 9 | $0^{+0.05}_{+0.03}$ | 63 | 100 A 11 | $0^{+0.15}_{+0.12}$ |
| 13 | 80 js 11 | $0^{+0.09}_{+0.05}$ | 68 | 56 D 11 | $0^{+0.10}_{+0.97}$ |
| 18 | 75 D 11 | $0^{+0.15}_{+0.13}$ | 73 | 115 E 9 | $0^{+0.120}_{+0.105}$ |
| 23 | 185 D 10 | $0^{+0.12}_{+0.09}$ | 78 | 125 B 11 | $0^{+0.110}_{+0.070}$ |

Задача № 4.

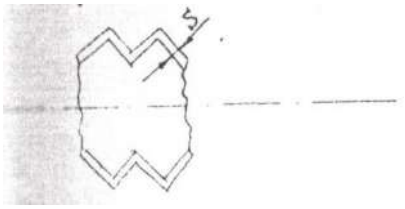


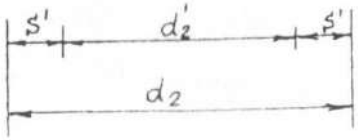

Определить исполнительный размер вара $d_1$ до нанесения слоя металла, если после нанесения электрогальваническим способом слоя $S_j$ на сторону, вал должен иметь размер d.

| Номер вар. | d | S | Номер вар. | d | S |
|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 75 d 10 | $0^{+0.10}_{+0.08}$ | 59 | 130 d 11 | $0^{+0.11}_{+0.07}$ |
| 9 | 65 f 9 | $0^{+0.075}_{+0.060}$ | 64 | 125 c 11 | $0^{+0.16}_{+0.12}$ |
| 14 | 182 d 11 | $0^{+0.15}_{+0.12}$ | 69 | 100 *l* 12 | $0^{+0.15}_{+0.10}$ |
| 19 | 120 *l* 11 | $0^{+0.16}_{+0.12}$ | 74 | 72 d 11 | $0^{+0.08}_{+0.05}$ |
| 24 | 95 d 10 | $0^{+0.06}_{+0.04}$ | 79 | 76 *l* 11 | $0^{+0.12}_{+0.09}$ |

Задача № 5

Определить размер диаметра $d`_2$ до покрытия защитным слоем, если при гальваническом покрытии наносится слой металла S на сторону и после покрытия резьба должна иметь $d_2$




| Номер вар. | Резьба после металлизации | S | Номер вар. | Резьба после металлизации | S |
|---|---|---|---|---|---|
| 5 | М20х1,5-6g | $0^{+0.05}_{+0.02}$ | 60 | М36х2-8g | $0^{+0.10}_{+0.06}$ |
| 10 | М16х1,5-8g | $0^{+0.07}_{+0.03}$ | 65 | М36-8g | $0^{+0.12}_{+0.07}$ |
| 15 | М12-8g | $0^{+0.06}_{+0.03}$ | 70 | М27х1,5-6d | $0^{+0.08}_{+0.04}$ |
| 20 | М10-8g | $0^{+0.08}_{+0.05}$ | 75 | 27х1,5-8g | $0^{+0.12}_{+0.08}$ |
| 25 | М16х1,5-6g | $0^{+0.07}_{+0.05}$ | 80 | М18х1,5-6a | $0^{+0.08}_{+0.05}$ |




**Министерство образования и науки РФ**
**ГОУ ВПО**
**«Уральский государственный горный университет»**

**Н.А.НОВИКОВА**

# ДОПУСКИ И ПОСАДКИ

**Учебное пособие**
**по курсу «Метрология, стандартизация и сертификация»**
**для студентов специальности – 21.05.04«Горное дело», направления 15.02.01 «Машиностроение» ,15.03.02. «Технологические машины и оборудование»** ***заочного обучения***

**Екатеринбург**
**2019**

Министерство образования и науки РФ
ГОУ ВПО
«Уральский государственный горный университет»

**ОДОБРЕНО**
Методической комиссией
горно-механического
факультета УГГУ
Председатель комиссии

проф. В. П. Барановский

Н.А.Новикова

# ДОПУСКИ И ПОСАДКИ

**Учебное пособие**
**по курсу «Метрология, стандартизация и сертификация»**
**для студентов специальности – 21.05.04«Горное дело», направления 15.02.01 «Машиностроение» ,15.03.02. «Технологические машины и оборудование»** ***заочного обучения***

Издание УГГУ Екатеринбург, 2019

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

Введение…….4
1. Основные понятия и определения в области взаимозаменяемости…….... 5
2. Понятие о размерах допусках и посадках……...7
3. Единая система допусков и посадок……..14
3.1.Закономерности построения допусков……...15
3.2 Системы допусков и посадок……...18
3.3. Ряды основных отклонений…….22
3.4. Поля допусков……...24
3.5.Образование посадок……25
3.6. Обозначение полей допусков, предельных отклонений и посадок на чертежах…….26
Контрольная работа…….28
Приложение №1……
Приложение №2……
Список литературы…….

## ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Метрология, стандартизация и сертификация» является одной из важнейших инженерных дисциплин, так как неразрывно связана с главной задачей современного машиностроения – обеспечение высокого качества выпускаемой продукции. Качество изделий машиностроения, как и любого другого вида продукции, является физической категорией, зависящей от множества конструкторских, технологических и организационно-технологических факторов, проявляющихся на этапах жизненного цикла изделия. Установлено, что до 90% эксплуатационных свойств деталей изделий машиностроения может быть достигнуто за счет соответствующего нормирования точностей геометрических параметров элементов деталей и их поверхностей. К таким эксплуатационным свойствам следует отнести взаимозаменяемость деталей и сборочных единиц, износостойкость трущихся поверхностей, долговечность, герметичность и прочность соединений и др.

Знания , умения и навыки, полученные в результате изучения дисциплины «Метрология, стандартизация и сертификация» помогут студентам пользоваться государственными стандартами при нормировании точности геометрических параметров гладких цилиндрических и типовых деталей и сборочных единиц, обозначать их на рабочих чертежах.

# 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ В ОБЛАСТИ ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТИ

***Взаимозаменяемость*** – свойство независимо изготовленных деталей и сборочных единиц занимать свое место в изделии без дополнительной механической или ручной обработки при сборке, обеспечивая при этом нормальную работу собираемых узлов, механизмов, машин. Взаимозаменяемость не обеспечивается только точностью геометрических параметров, Взаимозаменяемыми должны быть форма, механические, электрические и другие количественные и качественные характеристики деталей и сборочных единиц. Такая взаимозаменяемость называется полной. Полную взаимозаменяемость экономически целесообразно применять для деталей, изготовленных с допусками не точнее 6-го квалитета.

При полной взаимозаменяемости:

- упрощается процесс сборки – он сводится к простому соединению деталей рабочими преимущественно невысокой квалификации;

- появляется возможность точно нормировать процесс сборки во времени, устанавливать необходимый темп работы и применять поточный метод;

- создаются условия для автоматизации процессов изготовления и сборки изделий;

-упрощается и удешевляется ремонт изделий, гак как любая изношенная или поломанная деталь или сборочная единица может

быть заменена новой (запасной).

Иногда для удовлетворения эксплуатационных требований необходимо изготовлять детали и сборочные единицы с малыми экономически неприемлемыми или технологически трудно выполнимыми допусками. В этих случаях для получения требуемой точности сборки применяют групповой подбор деталей (селективную сборку), компенсаторы, регулирование положения некоторых частей машин и приборов, пригонку и другие дополнительные технологические мероприятия при обязательном выполнении требовании к качеству сборочных единиц и изделий. Такую взаимозаменяемость называют неполной (ограниченной). Ее можно осуществлять не по всем, а только по отдельным геометрическим или другим параметрам.

Внешняя взаимозаменяемость — это взаимозаменяемость покупных и кооперируемых изделий (монтируемых в другие более сложные изделия) и сборочных единиц по эксплуатационным показателям, а также по размерам и форме присоединительных поверхностей. Например, в электродвигателях внешнюю взаимозаменяемость обеспечивают по частоте вращения вала и мощности, а также по размерам присоединительных поверхностей; в подшипниках качения — по наружному диаметру наружного кольца и внутреннему диаметру внутреннего кольца.

Внутренняя взаимозаменяемость распространяется на детали, сборочные единицы и механизмы, входящие в изделие. Например, в подшипнике качения внутреннюю групповую взаимозаменяемость имеют тела качения и кольца.

# 2. ПОНЯТИЯ О РАЗМЕРАХ, ДОПУСКАХ И ПОСАДКАХ

Под размером понимают числовое значение линейной или угловой величины в выбранных единицах измерения. Различают номинальный, действительный и предельные размеры.

*Номинальный размер* — это размер, относительно которого определяются предельные размеры и который служит также началом отсчета отклонений. Номинальный размер, общий для отверстия и вала, образующих соединение, называется номинальным размером соединения. Это основной размер, полученный на основе кинематических, динамических и прочностных расчетов или выбранный из конструктивных, технологических, эксплуатационных, эстетических и других соображений и указанный на чертеже. Полученный, таким образом номинальный размер должен быть округлен до ближайшего стандартного из ряда нормальных линейных размеров по ГОСТ 6636-69 «Нормальные линейные размеры».

*Действительный* — это размер, установленный измерением с допустимой погрешностью. Величина допускаемой погрешности измерения, по которой выбирается необходимое средство измерения, регламентируется ГОСТ 8.051-81 в зависимости от точности изготовления, заданной на чертеже.

*Предельные размеры* — это два предельно допустимых размера, между которыми должен находиться или которым может быть равен действительный размер. Больший из двух предельных размеров

называется *наибольшим предельным размером,* а меньший- *наименьшим предельным размером.*

Принято обозначать номинальный, действительный и предельные размеры для отверстий - $D$, $D_r$, $D_{max}$, $D_{min}$;

для валов – $d$, $d_r$, $d_{max}$, $d_{min}$..

При выходе действительного размера за предельные – деталь считается бракованной.

Условие годности для отверстий: $D_{min} \le D_r \le D_{max}$;

для валов $d_{min} \le d_r \le d_{max}$.

Для упрощения простановки размеров на чертежах вместо предельных размеров проставляют предельные отклонения. Предельные отклонения подразделяют на верхнее и нижнее.

*Верхнее* — это алгебраическая разность между наибольшим предельным и номинальным размерами, *нижнее отклонение* — это алгебраическая разность между наименьшим предельным и номинальным размерами.

В ГОСТ 25346-89 приняты условные обозначения: верхнее отклонение отверстия —*ES,* вала — *es,* нижнее отклонение отверстия — *El,* вала — *ei.*

Согласно определениям:

Для отверстий

$$ES = D_{max} - D; \qquad El = D_{min} - D;$$

Для валов

$$es = d_{max.} - d\ ; \qquad ei = d_{min} - d\ ;$$

Предельные отклонения могут иметь положительные и отрицательные значения, или одно из них может быть равным нулю.

*Допуск размера* — это разность между наибольшим и наименьшим предельными размерами или алгебраическая разность между верхним и нижним отклонениями. Допуск обозначается $IT$ или $T_D$ – допуск отверстия и $T_d$ – допуск вала.

Согласно определениям:

Допуск отверстия

$$T_D = D_{max} - D_{min}\ ;$$

Допуск вала

$$T_d = d_{max} - d_{min}\ .$$

Допуск размера всегда положительная величина.

Поле допуска - это поле, ограниченное верхним и нижним отклонениями. Для графического изображения полей допусков, позволяющего понять соотношения номинального и предельных размеров, предельных отклонений и допуска, введено понятие нулевой линии.

*Нулевая линия* — это линия, соответствующая номинальному размеру, от которой откладываются предельные отклонения размеров при графическом изображении допусков и посадок. При горизонтальном расположении нулевой линии положительные отклонения откладываются вверх от нее, а отрицательные — вниз (рис. 2.1 и 2.2).

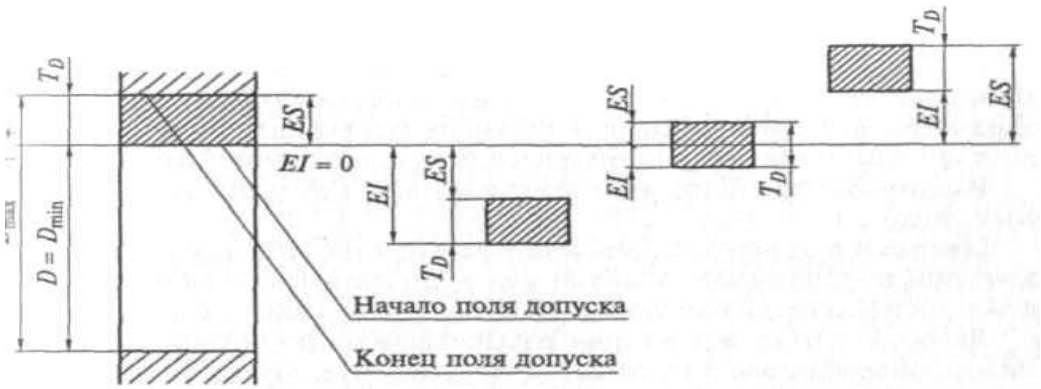



Рис.2.1 Схемы расположения полей допусков в системе отверстия

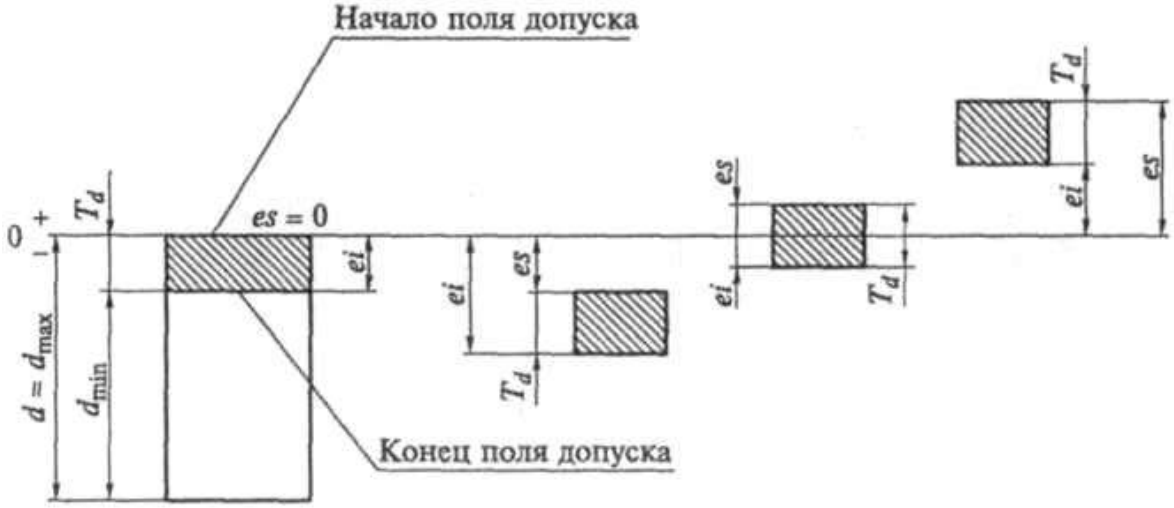



Рис.2.2 Схемы расположения полей допусков в системе вала

В машинах и механизмах детали не находятся обособленно друг от друга, они собираются в определенные узлы, комплекты, группы. Поверхности деталей, по которым

происходит сопряжение одной детали с другой называют сопрягаемыми поверхностями.

Остальные поверхности называются свободными. Поверхности могут быть как цилиндрическими (ось вагона, подшипник скольжения), так и плоскими (шпонка, шпоночный паз). В терминологии по допускам и посадкам: *вал* - все охватываемые наружные поверхности, о*тверстие* - внутренние охватывающие поверхности.

*Посадкой* – называется характер соединения деталей, определяемый разностью действительных размеров вала и отверстия. Различают три вида посадок: с зазором, с натягом и переходные посадки.

***Посадкой с зазором*** называют такое соединение, у которого действительный размер отверстия больше действительного размера вала. Поле допуска отверстия располагается над полем допуска вала. ( рис. 2.3). Основными характеристиками посадки с зазором являются:

Наименьший зазор $S_{min} = D_{min} - d_{max}$;

наибольший зазор $S_{max} = D_{max} - d_{min}$;

средний зазор $S_m = \frac{S_{max} + S_{min}}{2}$;

действительный зазор $S_д = D_д - d_d$;

допуск зазора (допуск посадки с зазором) $T_s = S_{max} - S_{min} =$

$= T_D + T_d$

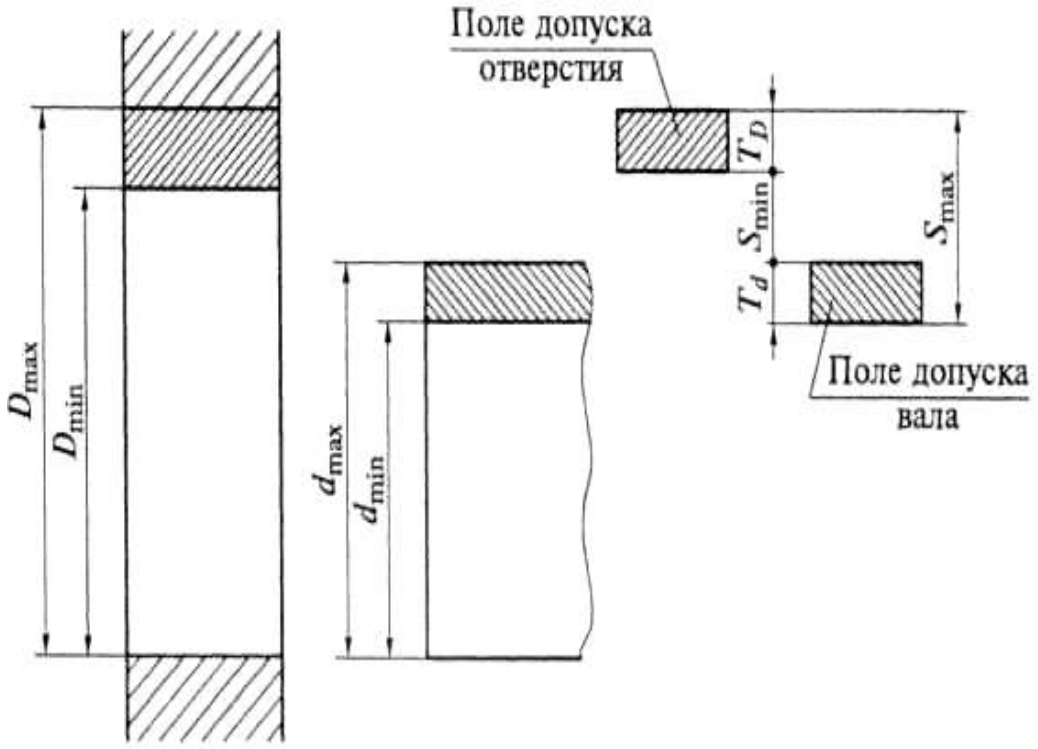



Рис.2.3 Схемы расположения полей допусков при посадках с зазором

***посадкой с натягом*** называется посадка, у которой при любых условиях сборки, действительный размер вала больше действительного размера отверстия (поле допуска вала расположено над полем допуска отверстия) (рис. 2.4). Натяг обеспечивает взаимную неподвижность деталей после их сборки. Основными характеристиками посадки с натягом являются:

наименьший натяг $N_{min} = d_{min} - D_{max}$ ;

наибольший натяг $N_{max} = d_{max} - D_{min}$;

средний натяг $N_m = \frac{N_{max} + N_{min}}{2}$;

действительный натяг $N_д = d_d - D_д$

допуск натяга (допуск посадки с натягом) $T_N = N_{max} - N_{min} = T_D + T_d$.

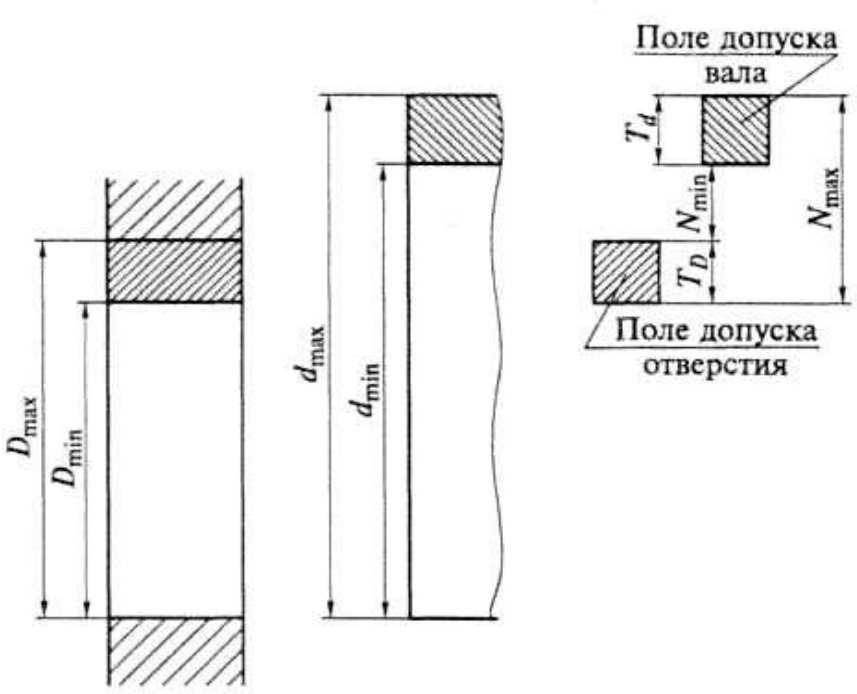



Рис.2.4 Схемы расположения полей допусков при посадках с натягом

***Переходной посадкой*** называется посадка, при которой возможно получение как зазора, так и натяга ( поля допусков отверстия и вала перекрываются частично или полностью) (рис.2.5). Переходные посадки используются для неподвижных соединений, когда при эксплуатация необходима частая разборка и сборка, а также когда к центрированию деталей предъявляются повышенные требования.

Основными характеристиками переходных посадок являются:

наибольший натяг $N_{max} = d_{max} - D_{min}$;

наибольший зазор $S_{max} = D_{max} - d_{min}$;

действительный натяг $N_д = d_d - D_д$

действительный зазор $S_д = D_д - d_d$;

допуск посадки $T_{N(S)} = N_{max} + S_{max} = T_D + T_d$.

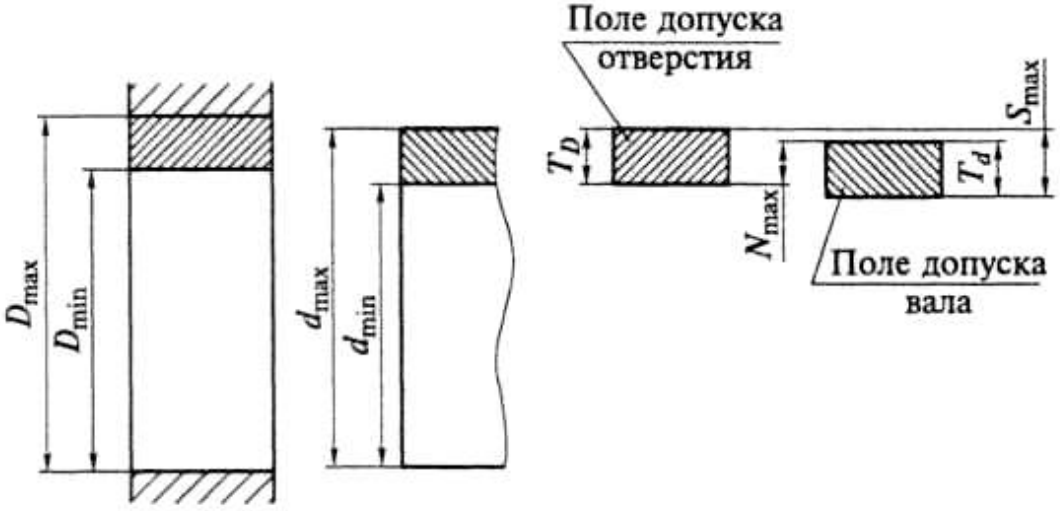



Рис.2.5 Схемы расположения полей допусков при переходных посадках

## 3. ЕДИНАЯ СИСТЕМА ДОПУСКОВ И ПОСАДОК

***Системой допусков и посадок*** называют совокупность допусков и посадок, закономерно построенных на основе опыта, теоретических и экспериментальных исследований и оформленных в виде стандартов. Система предназначена для выбора минимально необходимых, но достаточных для практики вариантов допусков и по-

садок типовых соединений деталей машин. Единая система допусков и посадок (ЕСДП) гладких соединений изложена в стандартах: ГОСТ 25346-89; ГОСТ 25347-82; Согласно стандартам в ЕСДП установлены допуски и посадки для размеров до 1 мм; свыше 1 мм до 500 мм; свыше 500 мм до 3150 мм. Детали, размеры которых входят в каждый из этих диапазонов, имеют свои особенности при проектировании, обработке и контроле. Так, размеры диапазона свыше 0 до 1 мм наиболее часто реализуются в микроэлектронике с использованием нанотехнологий, размеры свыше 1 до 500 мм – в машиностроении, а размеры свыше 500 мм – в станкостроении, тяжелом машиностроении. Рассмотрим построение системы допусков и посадок для размеров от 1 до 500 мм.

### 3.1 Закономерности построения допусков

Основная закономерность построения допусков размеров *IT*, имеет вид

$$IT\,(T) = a\,i \qquad (1.1)$$

Где $a$ – число единиц допуска; $i$- единица допуска, мкм

Единица допуска функционально связана с номинальным размером и является масштабом для измерения допуска в закономерности (1.1).

На основании исследований точности механической обработки установлены следующие зависимости единиц допуска для размеров до 500 мм

$$i = 0{,}45\sqrt[3]{D} + 0{,}001D, \qquad (1{,}2)$$

где $i$ — единица допуска, мкм; $D$ — среднее геометрическое крайних размеров каждого интервала размеров, мм.

Каждый диапазон размеров разбивается на *интервалы* — основные и промежуточные. В пределах каждого интервала основные отклонения и допуски неизменны. Основные интервалы используются для определения всех допусков системы. В СДП для номинальных размеров от 1 до 500 мм предусмотрено 13 основных интервалов размеров. Для полей допусков, образующих посадки с большими величинами зазоров или натягов, введены дополнительные промежуточные интервалы, что позволяет уменьшить колебание зазоров и натягов и делает посадки более определенными.

Интервалы подразделяются на основные и промежуточные. Диапазон размеров до 500 мм разбит на 13 основных интервалов:

свыше1 до З мм;
свыше З до б мм;
свыше б до10 мм;
свыше 10 до 18 мм;
свыше 18 до 30 мм;
свыше 30 до 50 мм;
свыше 50 до 80 мм;
свыше 80 до 120 мм;
свыше 120 до 180 мм;
свыше 180 до 250 мм;
свыше 250 до 315 мм;
свыше 315 до 400 мм;
свыше 400 до 500мм.

Промежуточные интервалы введены для номинальных размеров свыше 10 мм и делят каждый основной интервал на две, а в некоторых случаях – на три части. В пределах каждого интервала по зависимости (1.2.) установлена единица допуска. Значения единицы допуска для каждого интервала приведены в табл.1.

*Таблица 1*

**Единица допуска для размеров от 1 до 500 мм**

| Интервалы диаметров | 1 | 3 | 6 | 10 | 18 | 30 | 50 | 80 | 120 | 180 | 250 | 315 | 400 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 3 | 6 | 10 | 18 | 30 | 50 | 80 | 120 | 180 | 250 | 315 | 400 | 500 |
| Единица допуска ι, мкм | 0,54 | 0,73 | 0,90 | 1.09 | 1,30 | 1,56 | 1,86 | 2,17 | 2,52 | 2,89 | 3.23 | 3,54 | 3,89 |

Детали разного назначения в различных машинах и механизмах должны быть изготовлены с различной точностью. Нормирование требуемых уровней точности осуществляется с помощью квалитетов. Под ***квалитетом*** понимается совокупность допусков, изменяющихся в зависимости от номинального размера так, что уровень точности для всех номинальных размеров остается одинаковым. Допуск, характеризующий точность, в пределах одного квалитета зависит только от номинального размера, входящего в единицу допуска *i.*

В ЕСДП предусмотрено 20 квалитетов, которые обозначаются арабскими цифрами ( 01; 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; …;18 ). С увеличением номера квалитета точность понижается ( допуск увеличивается ).

Самые точные квалитеты (01, 0, 1, 2, 3, 4), как правило, применяются при изготовлении образцовых мер и калибров.

Квалитеты с 5-го по 12-й, как правило, применяются для сопрягаемых элементов деталей при образовании посадок.

Квалитеты с 12-го по 18-й применяют для несопрягаемых элементов деталей.

Допуск по квалитету обозначается буквами *IT* с указанием номера квалитета, например *IT*8 - допуск по 8 квалитету.

Квалитеты отличаются друг от друга коэффициентом точности *a* ( количеством единиц допуска) В табл. 2 приведено количество единиц допуска для каждого квалитета, начиная с 5 по 18.

*Таблица 2*

Число единиц допуска

| квалитет | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| «*a*» | 7 | 10 | 16 | 25 | 40 | 64 | 100 | 160 | 250 | 400 | 640 | 1000 | 1600 | 2500 |

## 3.2 Системы допусков и посадок

Стандарты предусматривают две равноправные системы посадок: систему отверстия и систему вала.

***Система отверстия*** – система допусков и посадок, при которой для данного номинального размера и данного квалитета предельные отклонения отверстия остаются постоянными, а требуемые посадки достигаются за счет изменения предельных размеров вала (рис.3.1). В системе отверстия основной деталью является *основное отверстие*, которого нижнее отклонение $EI=0$, а верхнее $ES = + T_D$.

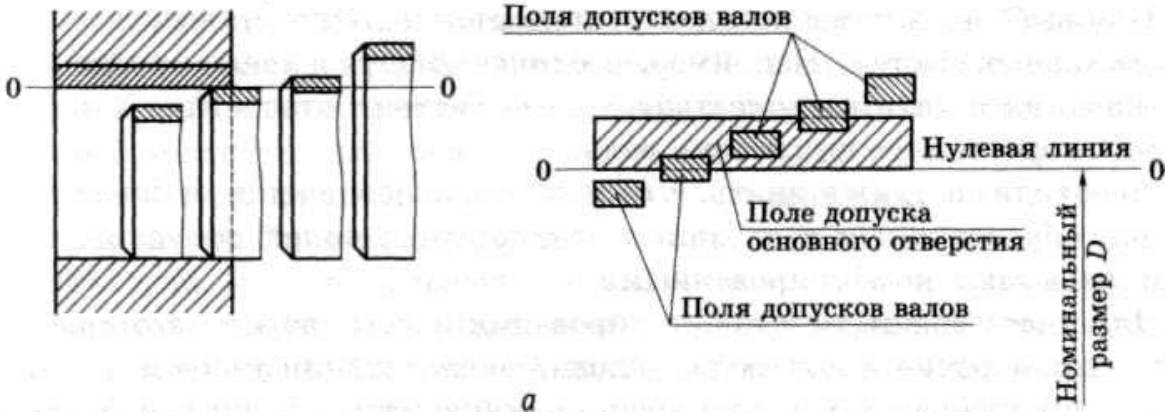



Рис.3.1 Посадки в системе отверстия

***Система вала*** – система допусков и посадок, при которой для данного номинального размера и данного квалитета предельные отклонения вала остаются постоянными, а требуемые посадки достигаются за счет изменения предельных размеров отверстия (рис.3.2). В системе вала основной деталью является *основной вал* у которого верхнее отклонение $es=0$, а нижнее $ei = - T_d$.

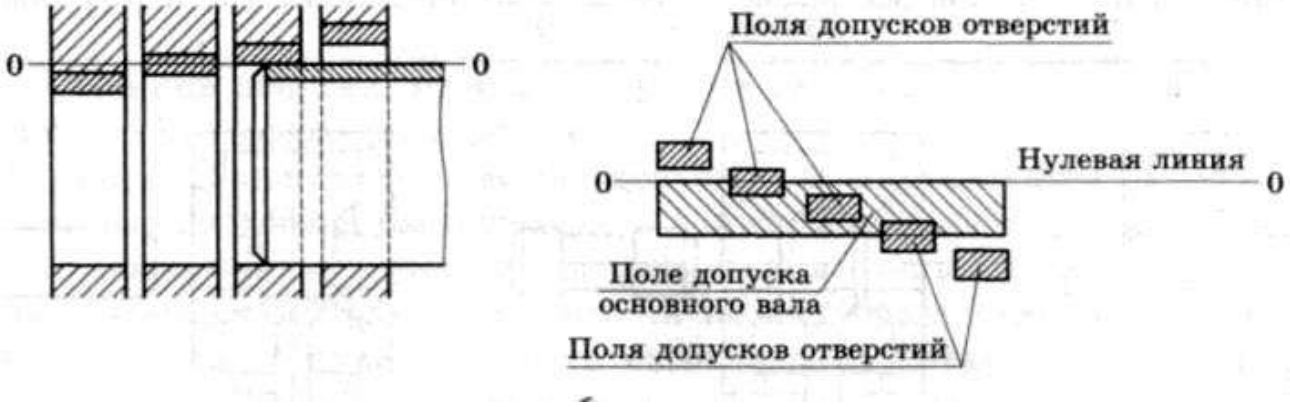
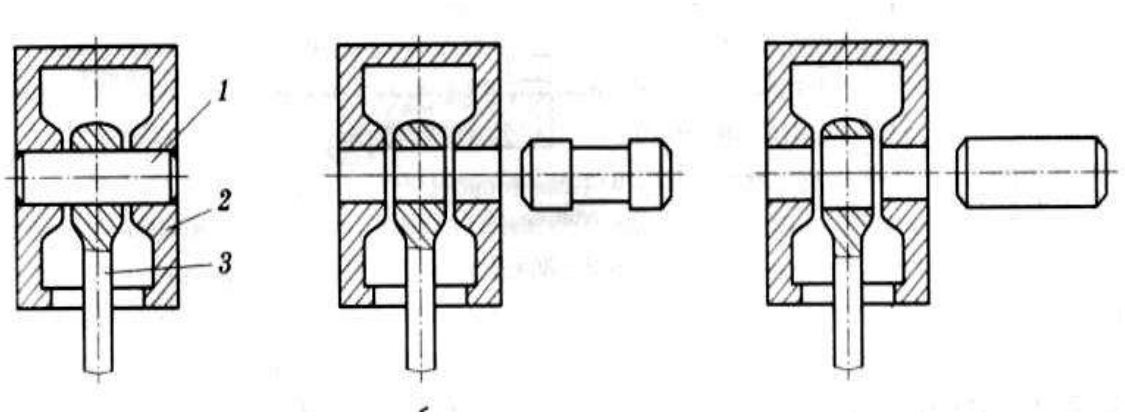



Рис.3.2. посадки в системе вала

Выбор системы посадки ( отверстия или вала) определяют исходя из конструктивных, технологических и экономических соображений.

Предпочтительной является система отверстия. Это связано с тем, что отверстия обрабатываются дорогостоящим режущим инструментом (сверлом, протяжкой, зенкером, разверткой и т.п.), предназначенным для обработки только одного размера с определенным полем допуска. Вал, независимо от размера, в большинстве своем обрабатывается одним и тем же инструментом ( резцом, шлифовальным кругом). Таким образом, количество типоразмеров инструмента для обработки отверстий будет значительно меньше при назначении посадки в системе отверстия. Система вала применяется в следующих случаях:

- когда на одном валу необходимо чередовать соединения нескольких отверстий одного номинального размера с различными посадками. На рис. 3.3, *а* представлено соединение поршневого пальца *1* с поршнем *2* и шатуном *3*. Для нормальной работы этого узла соединение поршня и пальца должно быть выполнено по неподвижной посадке, а шатуна с пальцем — по подвижной посадке. Назначение посадок в системе отверстия (рис. 3.3, *б)* привело бы к неудобствам при обработке ступенчатого пальца и, главное, к порче отверстия шатуна при сборке. При назначении посадок в системе вала (рис. 3.3, *в*) эти недостатки исключаются.




*а* *б* *в*

Рис.3.3 Соединение поршневого пальца с поршнем и шатуном двигателя автомобиля;

*а* – общий вид соединения: 1 – поршневой палец; 2- поршень; 3- шатун; *б*- соединение в системе отверстия*; в*- соединение в системе вала

- система вала также применяется в случаях, когда детали типа валиков или осей изготавливаются из калиброванных холоднотянутых прутков, дополнительная механическая обработка которых не предусматривается.

- и, наконец, посадка в системе вала назначается в случаях, когда вал является стандартной деталью или сборочной единицей (штифт, шплинт, шпонка, наружное кольцо подшипника и т.п.).

Необходимо также отметить, что возможно назначение и внесистемных посадок, образованных сочетанием стандартных полей допусков, которые иногда называют комбинированными.

## 3.3 Ряды основных отклонений

***Основное отклонение***- это одно из двух предельных отклонений ( верхнее или нижнее), по величине и знаку которого определяется положение поля допуска относительно нулевой линии.

По ЕСДП таким отклонением является отклонение, ближайшее к нулевой линии. Стандарт предусматривает 28 рядов основных отклонений для валов и столько же основных отклонений для отверстий. Отклонения валов обозначаются строчными буквами латинского алфавита от $a$ до $z$ , а отверстия прописными буквами от $A$ до $Z$.

Схематично ряды основных отклонений показаны на рис.3.4 Каждому основному отклонению на схеме соответствуют горизонтальная черта, от которой начинается поле допуска. Штриховкой показано направление поля допуска, а второе отклонение зависит от того, по какому квалитету будет выполнено данное предельное отклонение.

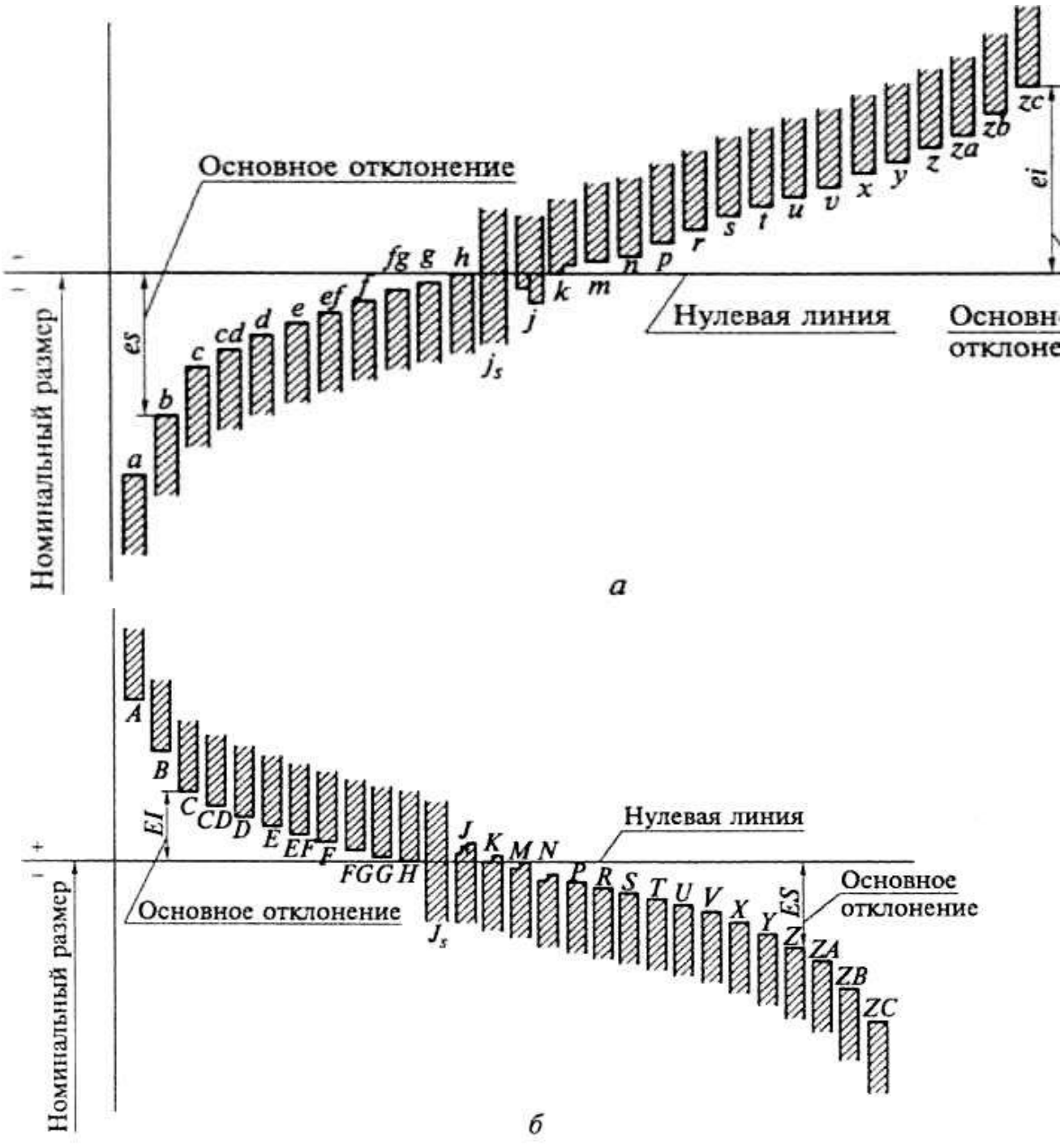



Рис.3.4. основные отклонения для валов (а), для отверстий (б)

## 3.4 Поля допусков

Поле допуска в ЕСДП образуется сочетанием одного из основных отклонений с допуском по одному из квалитетов. В соответствии с этим поля допусков обозначаются буквой основного отклонения и номерами квалитетов, например

для валов $h6$, $d11$, $b12$, $s8$ и т.д.;

для отверстий $A11$, $H8$, $S7$ и т.д.

По основному отклонению и допуску вычисляют второе предельное отклонение, ограничивающее данное поле допуска.

Если основное отклонение - верхнее, то нижнее отклонение определяют по зависимости:

для вала $ei = es - IT$;

для отверстия $El = ES - IT$.

Если основное отклонение – нижнее, то верхнее отклонение :

для вала $es = ei + IT$;

для отверстия $ES = El + El$.

В системе ЕСДП можно образовывать поля допусков для любого квалитета, что позволяет получить более 500 полей допусков для валов и столько же полей допусков для отверстий. Однако не все возможные поля допусков могут найти применение даже в перспективе, на которую ориентирован стандарт, так как одновременное применение на практике всех полей допусков неприемлемо по экономическим соображениям ( затрудняет унификацию изделий, различных инструментов и калибров). В ЕСДП для диапазона размеров от 1 до 500 мм применяется отбор полей допусков, которые делятся на основные и дополнительные .

Основные поля допусков включают в себя предпочтительные ( имеющие первоочередное применение) и рекомендуемые. Дополнительные поля допусков являются полями ограниченного применения и используются тогда, когда применение основных полей допусков не позволяет выполнить требования, предъявляемые к изделию.

## 3.5 Образование посадок

Посадки в системе ЕСДП образуются сочетанием полей допусков отверстия и вала.

Принципиально допускается любое сочетание полей допусков отверстия и вала. Предпочтение следует отдавать посадкам, образованным в системе отверстия или в системе вала. ГОСТ 25347 -82 устанавливает ряд стандартных посадок в системе отверстия и в системе вала. В каждой системе выделяются предпочтительные посадки, выделенные рамочками. Рекомендуемые посадки приведены в Приложении 1 к ГОСТ 25347-82.

Допускается применение комбинированных посадок, в которых отверстие и вал выполнены в разных системах. Например, посадка *F8/f7*.

Допуски и отклонения, установленные стандартами, относятся к деталям, размеры которых определены при нормальной температуре, которая во всех странах принята равной $+20\ ^0$ C .

## 3.6. Обозначение полей допусков, предельных отклонений и посадок на чертежах

Предельные отклонения линейных размеров указывают на чертежах условными (буквенными) обозначениями полей допусков или числовыми значениями предельных отклонений, а также буквенными обозначениями полей-допусков с одновременным указанием справа в скобках числовых значений предельных отклонений (рис. 3.5, а и б).

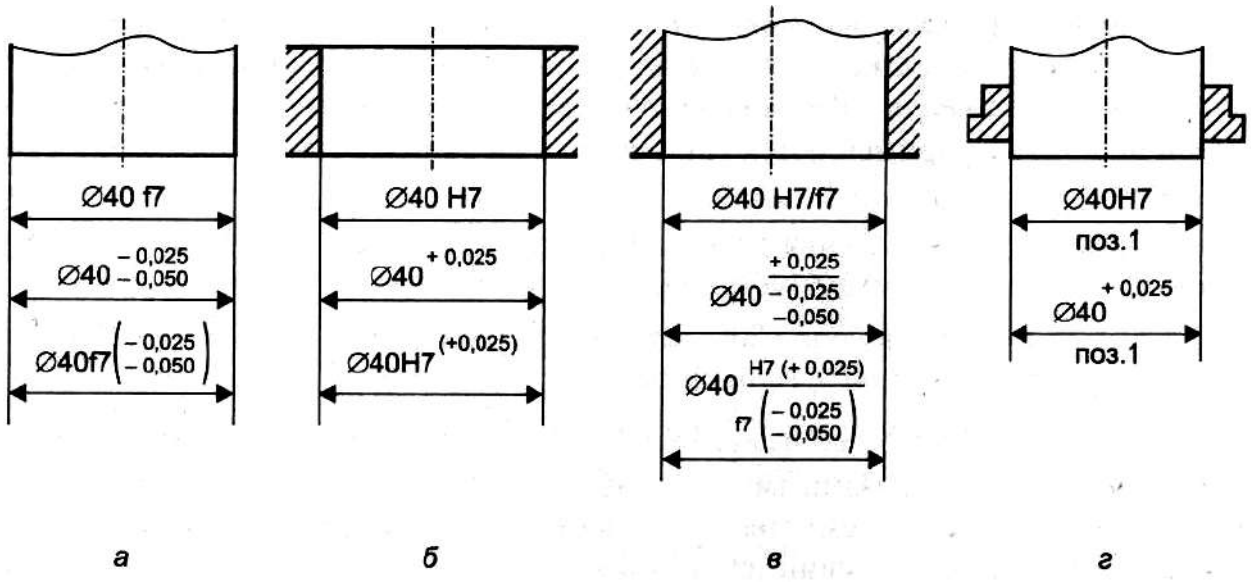



Рис.3.5. Примеры обозначения полей допусков и посадок на чертежах

На конструкторских и технологических чертежах номинальные и предельные размеры, а также их отклонения по ГОСТ 2.307-68 указываются в миллиметрах без обозначения единицы измерения (например, $50^{+0,025}$; $50_{-0,025}$ ; $85^{-0,013}_{-0,024}$). Угловые размеры и их предельные отклонения указываются в градусах,

минутах или секундах с указанием единицы измерения (например, 30°15'40").

При равенстве абсолютных значений отклонений они указываются один раз со знаком «±» рядом с номинальным размером (например,85±0,02). Отклонение, равное нулю, на чертежах не проставляется. Наносят только одно отклонение — положительное на месте верхнего предельного отклонения, отрицательное — на месте нижнего предельного отклонения (например, $60_{-0,022}$; $89^{+0,02}$).

Посадки и предельные отклонения размеров деталей, изображенных на чертеже в собранном виде, указывают дробью: в числителе — буквенное обозначение или числовые значения предельных отклонений отверстия либо буквенное обозначение с указанием справа в скобках их числовых значений, в знаменателе — аналогичное обозначение поля допуска вала (рис. 3.5, *в*). Иногда для обозначения посадки указывают предельные отклонения только одной из сопрягаемых деталей (рис 3.5,г).

Предельные отклонения могут назначаться для размеров, не указанных на чертеже детали, включая несопрягаемые и неответственные размеры. Например, в технических требованиях дается указание: «Неуказанные предельные отклонения размеров: отверстий H14, валов hl4, остальных $\pm\frac{IT14}{2}$» или «Неуказанные предельные отклонения размеров: диаметров H12, hl2, остальных $\pm\frac{IT14}{2}$».

В целях закрепления основных положений по курсу «Метрология, стандартизация и сертификация» студенты самостоятельно выполняют контрольную работу.

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

Работа заключается в анализе допусков и посадок гладких соединений. Анализируются все стандартные посадки, образующиеся с основным валом заданного квалитета и заданного номинального размера и все стандартные посадки, образующиеся с основным отверстием заданного квалитета и размера.

Работа выполняется на специальном бланке и подлежит защите. Бланк заполняется карандашом, с соблюдением требований ГОСТ 2.307-68.

Для выполнения данной контрольной работы студенту необходим для определения полей допусков ГОСТ 25347-82 (СТ СЭВ 144-75). (Приложение1 и 2)

### *1.Последовательность выполнения работы*

1.1. Для выполнения работы студент получает бланк с заданием.

1.2. Из таблицы ГОСТ 25347-82 или по приложению 1 данного руководства выписать в графу 1 бланка работы все стандартные посадки, образующиеся с основным валом заданного квалитета, а

по таблице приложения 2 выписать все стандартные посадки, образующиеся с основным отверстием заданного квалитета.

1.3 Посадки записываются в соответствии с ГОСТ на условные обозначения полей допусков: предельные отклонения отверстия записываются в числителе, а вала – в знаменателе, например: $50\ \frac{H7}{e8}$ или 50 *H7/e8*. Где: 50 – номинальный размер соединения; *H7*- условное обозначение поля допуска отверстия; *e8*- поле допуска вала.

Аналогично по заданному квалитету и номинальному размеру выписываются все стандартные посадки в системе вала.

1.4. В графы 2 и 3 каждой системы посадки (система отверстия, система вала) заносятся числовые значения предельных отклонений для всех полей допусков.

Числовые значения предельных отклонений принимаются по ГОСТ25347-82 (СТ СЭВ 144-75). При отсутствии указанного стандарта предельные отклонения находят расчетным путем с помощью ГОСТ 25346-82 (СТ СЭВ 145-75).

1.5. В графы 4 и 5 каждой системы посадок записываются исполнительные размеры для отверстий и валов с указанием условного обозначения предельных отклонений, а в графы 6 и 7 – исполнительные размеры, но уже в числовых величинах предельных отклонений, мм.

1.6. Проводится математический анализ зазоров и натягов для каждого сопряжения в обеих системах. Величины зазоров и натягов по абсолютной величине, в мкм, заносятся в графы отчета 8, 9, 10 и 11 соответственно каждой системы посадок.

Предельные зазоры и натяги определяются:

**посадки с зазором:**

$$S_{max} = ES - ei\ , \qquad S_{min} = EI - es\ ;$$

**посадки с натягом:**

$$N_{max} = es - EI, \qquad N_{min} = ei - ES\ ;$$

**переходные посадки:**

$$S_{max} = ES - ei, \qquad N_{max} = es - EI,$$

где $S_{max}$ и $S_{min}$ - наибольший и наименьший зазор;

$N_{max}$ и $N_{min}$ - наибольший и наименьший натяг;

*ES* и *EI* - верхнее и нижнее отклонение отверстия;

*es* и *ei* - верхнее и нижнее отклонение вала.

1.7. Определяется для посадок в системе отверстия и в системе вала допуск посадки исходя из предельных зазоров или натягов.

Для посадок с зазором $T_n = S_{max} - S_{min} = IT_D + IT_d$;

Для посадок с натягом $T_n = N_{max} - N_{min} = IT_D + IT_d$;

Для переходных посадок $T_n = S_{max} + N_{max} = IT_D + IT_d$;

При этом $IT_D$ – допуск отверстия,

$IT_d$ – допуск вала.

Результаты расчета заносятся в графу 12 бланка отчета соответственно каждой посадке, мкм.

1.8. Строятся схемы полей допусков для всех посадок в системе отверстия и в системе вала. Для построения полей допусков следует принять определенный масштаб.

1.9. Для одной (любой) посадки в системе отверстия и для одной посадки в системе вала оформляются эскизы сопряжений.

При этом на эскизах сопряжений указать исполнительные размеры на двух размерных линиях: на одной указать номинальный размер и условное обозначение предельных отклонений, на второй - номинальный размер с числовыми предельными отклонениями.

Образец контрольной работы №1 приведен в таблице 1.1 и Рис.1.1, Рис.1.2.

*Таблица 1.1*

## Дать анализ всех стандартных посадок в системе вала с валом h5 номинального размера 20 мм

| Посад-ка | Отклоне-ние в мкм. | | Наносимый размер на чертежах деталей (в мм) | | | | Натяги в мкм | | Зазоры в мкм | | Допуск посадки в мкм |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Отв | Вал | Условно | | С числовыми отклонениями | | max | min | max | min | |
| | ES<br>EJ | es<br>ej | Отв | Вал | Отв. | Вал | | | | | |
| 20F7/h5 | +41<br>+20 | 0<br>-9 | 20F7 | 20h5 | $20^{+0,041}_{+0,020}$ | $20_{-0,009}$ | - | - | 50 | 20 | 30 |
| 20G6/h5 | +20<br>+7 | | 20G6 | | $20^{+0.020}_{+0,007}$ | | - | - | 29 | 7 | 22 |
| 20H6/$h$5 | +13<br>0 | | 20H6 | | $20^{+0,013}$ | | - | - | 22 | 0 | 22 |
| 20$I_s$6/h5 | +6,5<br>- 6,5 | | 20$I_s$6 | | $20\pm0,0065$ | | 6,5 | - | 15,5 | - | 22 |

Схема полей допусков для размера 20 мм с полем допуска основного вала h5

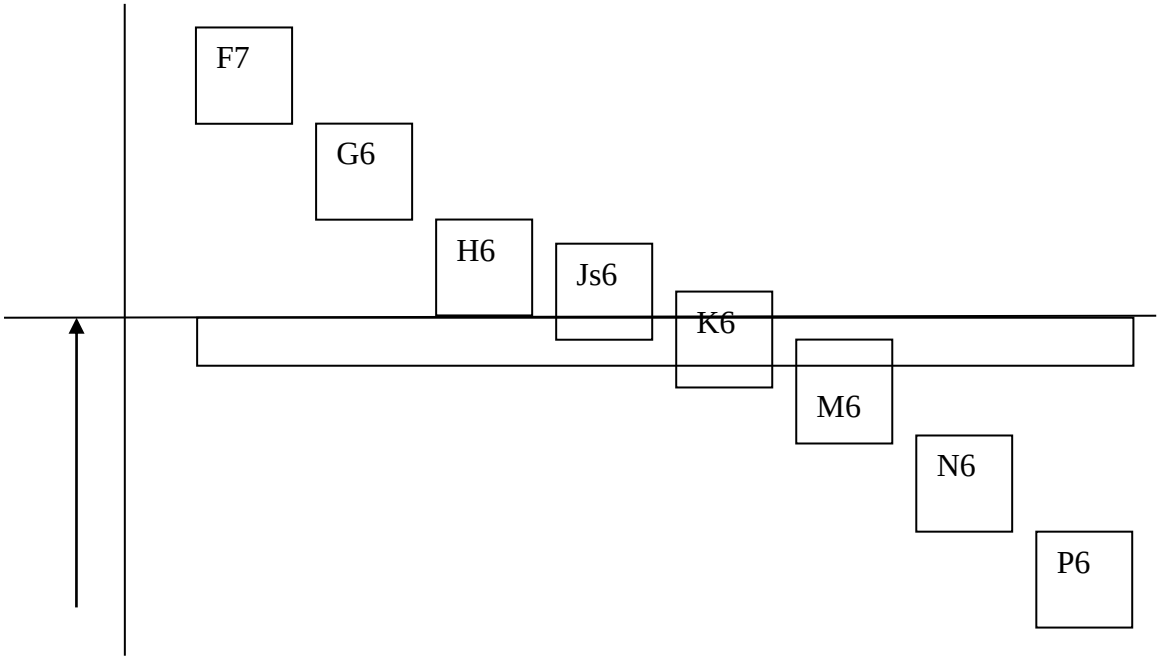



Рис 1.1 Эскизы деталей и сопряжения для посадки с полем допуска h5 в системе вала

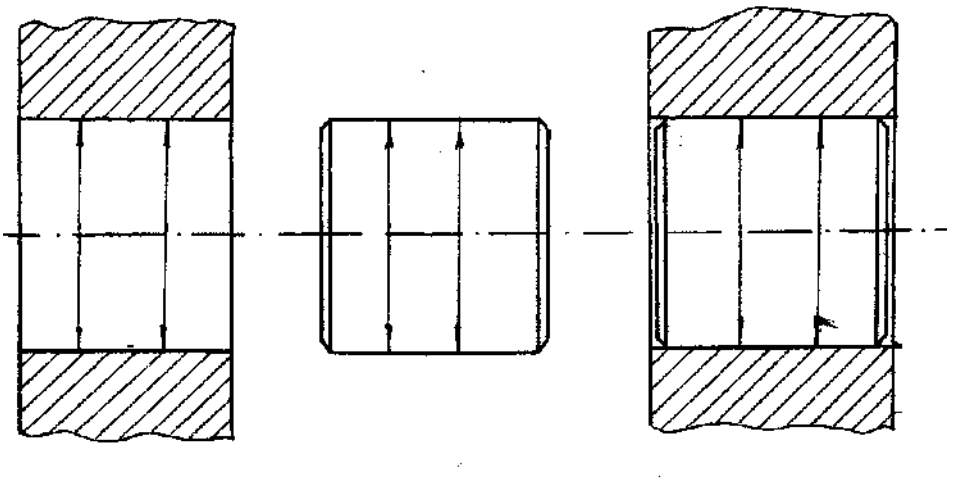


Рис.1.2.Схема обозначения посадок на чертежах

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Димов Ю.В. Метрология, стандартизация и сертификация.-Питер, 2010.-463 с.

Аристов А.И. Метрология, стандартизация т сертификация.-М.:Издательский цент «Академия»,2007. - 384 с.

ГОСТ 25347-82 (СТ СЭВ 144-75) Основные нормы взаимозаменяемости. ЕСДП. Поля допусков и рекомендуемые посадки.

**Н 73**

Рецензент: *А. П. Комиссаров,* д-р техн. наук, профессор кафедры ГМК Уральского государственного горного университета

Учебное пособие рассмотрено на заседании кафедры эксплуатации горного оборудования «20» февраля 2013 г. (протокол № 4) и рекомендовано для издания в УГГУ.

**Н 73 Новикова Н. А.**

ДОПУСКИ И ПОСАДКИ. Учебное пособие по курсу «Метрология, стандартизация и сертификация» для студентов специальности – 21.05.04«Горное дело», направления 15.02.01 «Машиностроение» ,15.03.02. «Технологические машины и оборудование» *заочного обучения* / Н.А. Новикова. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2013. 45 с.

Учебное пособие по курсу «Метрология, стандартизация и сертификация» является общетеоретическим разделом курса «Метрология, стандартизация и сертификация» и содержит общие вопросы построения единой системы допусков и посадок. Также в пособии изложены методические указания, последовательность выполнения контрольной работы по анализу стандартных посадок в системе вала и отверстия, приведен образец выполнения работы.

© Новикова Н.А. 2016

© Уральский государственный горный университет, 2016

Учебное издание

Наталья Александровна Новикова

# ДОПУСКИ И ПОСАДКИ.

**Учебное пособие**
**по курсу «Метрология, стандартизация и сертификация»**
**для студентов специальности – 21.05.04«Горное дело», направления 15.02.01 «Машиностроение» ,15.03.02. «Технологические машины и оборудование»** ***заочного обучения***

Редактор В. В. Баклаева

Подписано в печать
Бумага писчая. Формат бумаги 60 × 84 1/16. Гарнитура Times New Roman
Печать на ризографе
Печ. л. . Уч.– изд. л. . Тираж 100 экз. Заказ №

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ




**Министерство образования и науки РФ**
**ФГБОУ ВО**
**«Уральский государственный**
**горный университет»**

# НОВИКОВА Н.А

# ДОПУСКИ И ПОСАДКИ

## УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

**По курсу «Метрология, стандартизация и сертификация» для студентов направления: 15.03.01 - «Машиностроение», 15.03.02 - «Технологические машины и оборудование» 21.05.04 «Горное дело»**

**Екатеринбург**
**2019**

# ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Допуски и посадки» является одной из важнейших дисциплин, так как неразрывно связана с главной задачей современного машиностроения – обеспечение высокого качества выпускаемой продукции. Качество изделий машиностроения, как и любого другого вида продукции, является физической категорией, зависящей от множества конструкторских, технологических и организационно-технологических факторов, проявляющихся на этапах жизненного цикла изделия. Установлено, что до 90% эксплуатационных свойств деталей изделий машиностроения может быть достигнуто за счет соответствующего нормирования точностей геометрических параметров элементов деталей и их поверхностей. К таким эксплуатационным свойствам следует отнести взаимозаменяемость деталей и сборочных единиц, износостойкость трущихся поверхностей, долговечность, герметичность и прочность соединений и др.

Знания , умения и навыки, полученные в результате изучения дисциплины «Допуски и посадки» помогут студентам пользоваться государственными стандартами при нормировании точности геометрических параметров гладких цилиндрических и типовых деталей и сборочных единиц, обозначать их на рабочих чертежах.

# 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ В ОБЛАСТИ ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТИ

***Взаимозаменяемость*** – свойство независимо изготовленных деталей и сборочных единиц занимать свое место в изделии без дополнительной механической или ручной обработки при сборке, обеспечивая при этом нормальную работу собираемых узлов, механизмов, машин. Взаимозаменяемость не обеспечивается только точностью геометрических параметров, Взаимозаменяемыми должны быть форма, механические, электрические и другие количественные и качественные характеристики деталей и сборочных единиц. Такая взаимозаменяемость называется полной. Полную взаимозаменяемость экономически целесообразно применять для деталей, изготовленных с допусками не точнее 6-го квалитета.

При полной взаимозаменяемости:

- упрощается процесс сборки – он сводится к простому соединению деталей рабочими преимущественно невысокой квалификации;

- появляется возможность точно нормировать процесс сборки во времени, устанавливать необходимый темп работы и применять поточный метод;

- создаются условия для автоматизации процессов изготовления и сборки изделий;

-упрощается и удешевляется ремонт изделий, гак как любая изношенная или поломанная деталь или сборочная единица может

быть заменена новой (запасной).

Иногда для удовлетворения эксплуатационных требований необходимо изготовлять детали и сборочные единицы с малыми экономически неприемлемыми или технологически трудно выполнимыми допусками. В этих случаях для получения требуемой точности сборки применяют групповой подбор деталей (селективную сборку), компенсаторы, регулирование положения некоторых частей машин и приборов, пригонку и другие дополнительные технологические мероприятия при обязательном выполнении требовании к качеству сборочных единиц и изде ий. Такую взаимозаменяемость называют неполной (ограниченной). Ее можно осуществлять не по всем, а только по отдельным геометрическим или другим параметрам.

Внешняя взаимозаменяемость — это взаимозаменяемость покупных и кооперируемых изделий (монтируемых в другие более сложные изделия) и сборочных единиц по эксплуатационным показателям, а также по размерам и форме присоединительных поверхностей. Например, в электродвигателях внешнюю взаимозаменяемость обеспечивают по частоте вращения вала и мощности, а также по размерам присоединительных поверхностей; в подшипниках качения — по наружному диаметру наружного кольца и внутреннему диаметру внутреннего кольца.

Внутренняя взаимозаменяемость распространяется на детали, сборочные единицы и механизмы, входящие в изделие. Например, в подшипнике качения внутреннюю групповую взаимозаменяемость имеют тела качения и кольца.

# 2. ПОНЯТИЯ О РАЗМЕРАХ, ДОПУСКАХ И ПОСАДКАХ

Под размером понимают числовое значение линейной или угловой величины в выбранных единицах измерения. Различают номинальный, действительный и предельные размеры.

*Номинальный размер* — это размер, относительно которого определяются предельные размеры и который служит также началом отсчета отклонений. Номинальный размер, общий для отверстия и вала, образующих соединение, называется номинальным размером соединения. Это основной размер, полученный на основе кинематических, динамических и прочностных расчетов или выбранный из конструктивных, технологических, эксплуатационных, эстетических и других соображений и указанный на чертеже. Полученный, таким образом номинальный размер должен быть округлен до ближайшего стандартного из ряда нормальных линейных размеров по ГОСТ 6636-69 «Нормальные линейные размеры».

*Действительный* — это размер, установленный измерением с допустимой погрешностью. Величина допускаемой погрешности измерения, по которой выбирается необходимое средство измерения, регламентируется ГОСТ 8.051-81 в зависимости от точности изготовления, заданной на чертеже.

*Предельные размеры* — это два предельно допустимых размера, между которыми должен находиться или которым может быть равен действительный размер. Больший из двух предельных размеров

называется *наибольшим предельным размером,* а меньший- *наименьшим предельным размером.*

Принято обозначать номинальный, действительный и предельные размеры для отверстий - $D$, $D_r$, $D_{max}$, $D_{min}$;

для валов – $d$, $d_r$, $d_{max}$, $d_{min}$..

При выходе действительного размера за предельные – деталь считается бракованной.

Условие годности для отверстий: $D_{min} \le D_r \le D_{max}$;

для валов $d_{min} \le d_r \le d_{max}$.

Для упрощения простановки размеров на чертежах вместо предельных размеров проставляют предельные отклонения. Предельные отклонения подразделяют на верхнее и нижнее.

*Верхнее* — это алгебраическая разность между наибольшим предельным и номинальным размерами, *нижнее отклонение* — это алгебраическая разность между наименьшим предельным и номинальным размерами.

В ГОСТ 25346-89 приняты условные обозначения: верхнее отклонение отверстия —*ES,* вала — *es,* нижнее отклонение отверстия — *El,* вала — *ei.*

Согласно определениям:

Для отверстий

$$ES = D_{max} - D; \qquad El = D_{min} - D;$$

Для валов

$$es = d_{max.} - d\ ; \qquad ei = d_{min} - d\ ;$$

Предельные отклонения могут иметь положительные и отрицательные значения, или одно из них может быть равным нулю.

*Допуск размера* — это разность между наибольшим и наименьшим предельными размерами или алгебраическая разность между верхним и нижним отклонениями. Допуск обозначается $IT$ или $T_D$ – допуск отверстия и $T_d$ – допуск вала.

Согласно определениям:

Допуск отверстия

$$T_D = D_{max} - D_{min}\ ;$$

Допуск вала

$$T_d = d_{max} - d_{min}\ .$$

Допуск размера всегда положительная величина.

Поле допуска - это поле, ограниченное верхним и нижним отклонениями. Для графического изображения полей допусков, позволяющего понять соотношения номинального и предельных размеров, предельных отклонений и допуска, введено понятие нулевой линии.

*Нулевая линия* — это линия, соответствующая номинальному размеру, от которой откладываются предельные отклонения размеров при графическом изображении допусков и посадок. При горизонтальном расположении нулевой линии положительные отклонения откладываются вверх от нее, а отрицательные — вниз (рис. 2.1 и 2.2).

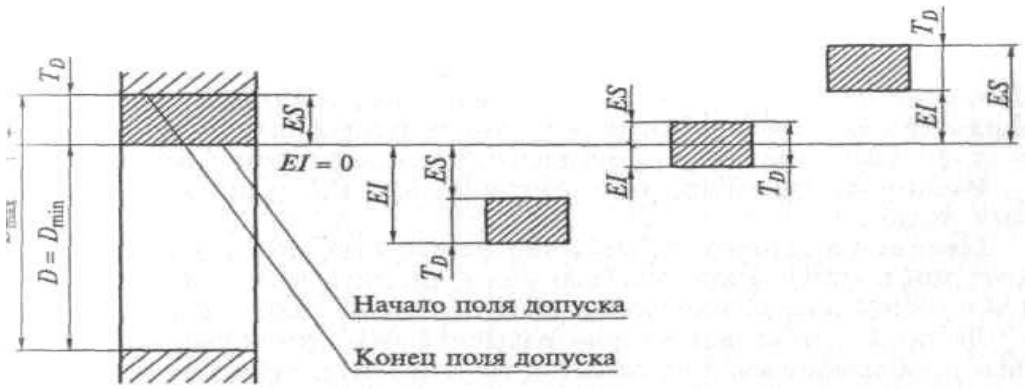



Рис. 1.4. Схема расположения полей допусков отверстий

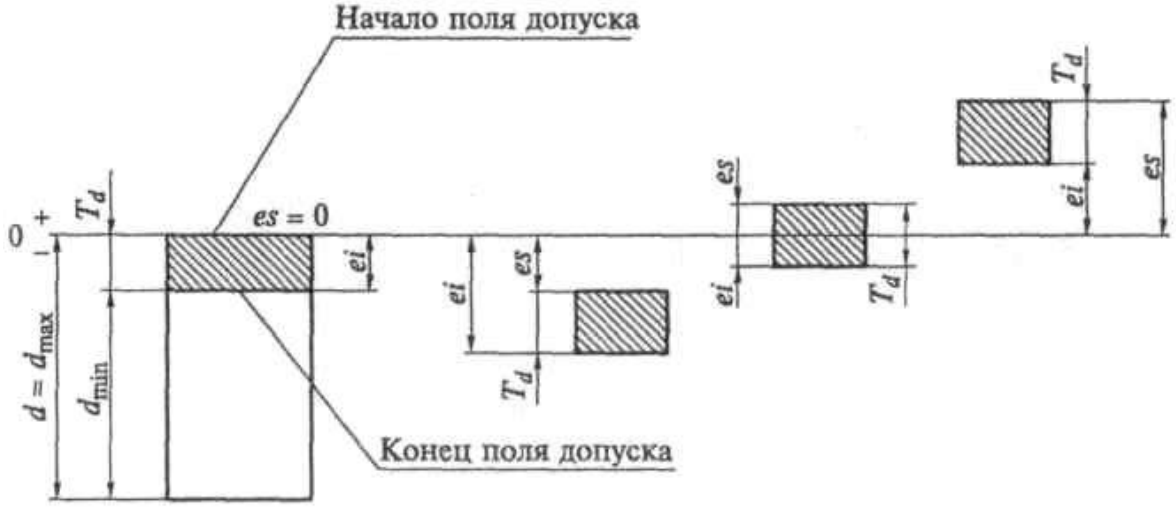



Рис. 1.5. Схема расположения полей допусков валов

В машинах и механизмах детали не находятся обособленно друг от друга, они собираются в определенные узлы, комплекты, группы. Поверхности деталей, по которым происходит сопряжение одной детали с другой называют сопрягаемыми поверхностями.

Остальные поверхности называются свободными. Поверхности могут быть как цилиндрическими (ось вагона, подшипник скольжения), так и плоскими (шпонка, шпоночный паз). В терминологии по допускам и посадкам: *вал* - все охватываемые наружные поверхности, о*тверстие* - внутренние охватывающие поверхности.

*Посадкой* – называется характер соединения деталей, определяемый разностью действительных размеров вала и отверстия. Различают три вида посадок: с зазором, с натягом и переходные посадки.

***Посадкой с зазором*** называют такое соединение, у которого действительный размер отверстия больше действительного размера вала. Поле допуска отверстия располагается над полем допуска вала. ( рис. 2.3). Основными характеристиками посадки с зазором являются:

Наименьший зазор $S_{min} = D_{min} - d_{max}$;

наибольший зазор $S_{max} = D_{max} - d_{min}$;

средний зазор $S_m = \frac{S_{max} + S_{min}}{2}$;

действительный зазор $S_д = D_д - d_d$;

допуск зазора (допуск посадки с зазором) $T_s = S_{max} - S_{min} = T_D + T_d$

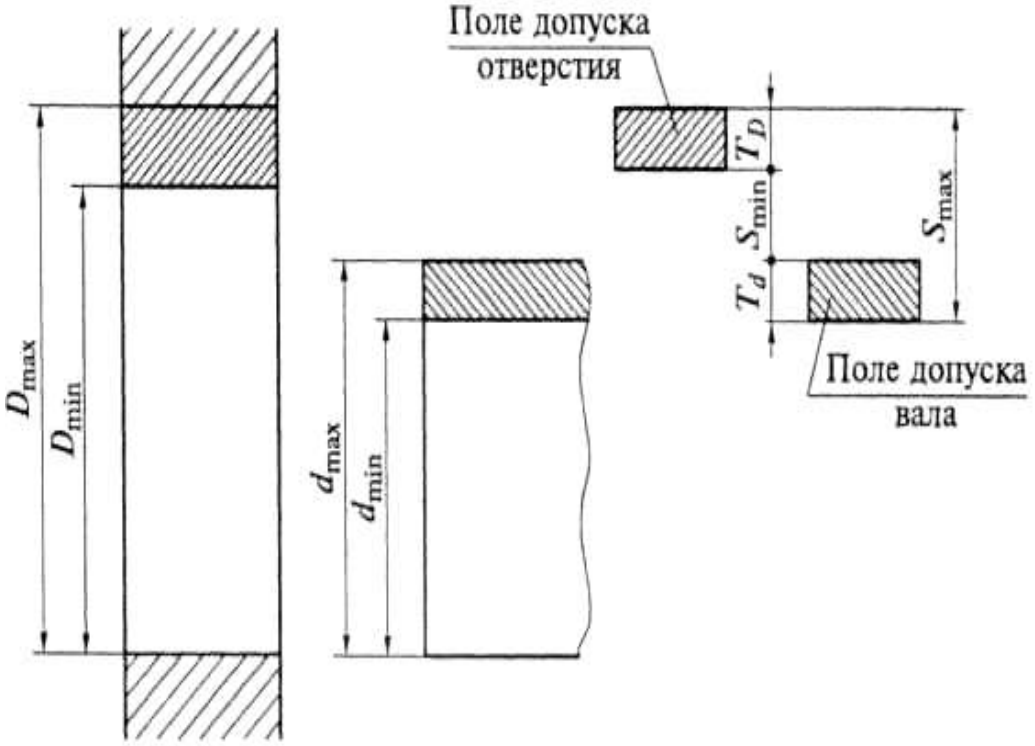



Рис.2.3 Схемы расположения полей допусков при посадках с зазором

***посадкой с натягом*** называется посадка, у которой при любых условиях сборки, действительный размер вала больше действительного размера отверстия (поле допуска вала расположено над полем допуска отверстия) (рис. 2.4). Натяг обеспечивает взаимную неподвижность деталей после их сборки. Основными характеристиками посадки с натягом являются:

наименьший натяг $N_{min} = d_{min} - D_{max}$ ;

наибольший натяг $N_{max} = d_{max} - D_{min}$;

средний натяг $N_m = \frac{N_{max} + N_{min}}{2}$;

действительный натяг $N_д = d_d - D_д$

допуск натяга (допуск посадки с натягом) $T_N = N_{max} - N_{min} = T_D + T_d$.

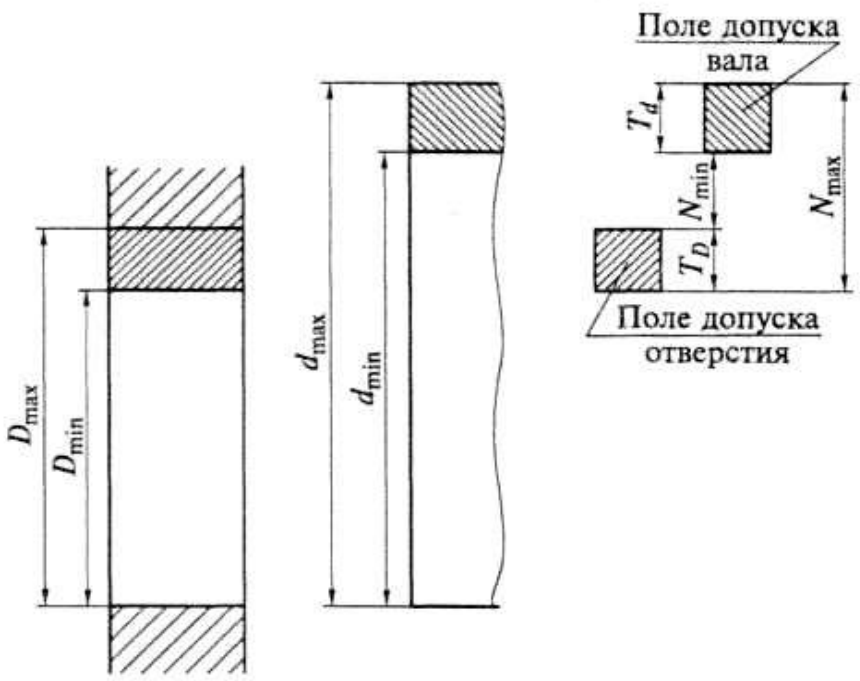



Рис.2.4 Схемы расположения полей допусков при посадках с натягом

***Переходной посадкой*** называется посадка, при которой возможно получение как зазора, так и натяга ( поля допусков отверстия и вала перекрываются частично или полностью) (рис.2.5). Переходные посадки используются для неподвижных соединений, когда при эксплуатация необходима частая разборка и сборка, а также когда к центрированию деталей предъявляются повышенные требования.

Основными характеристиками переходных посадок являются:

наибольший натяг $N_{max} = d_{max} - D_{min}$;

наибольший зазор $S_{max} = D_{max} - d_{min}$;

действительный натяг $N_д = d_d - D_д$

действительный зазор $S_д = D_д - d_d$;

допуск посадки $T_{N(S)} = N_{max} + S_{max} = T_D + T_d$.

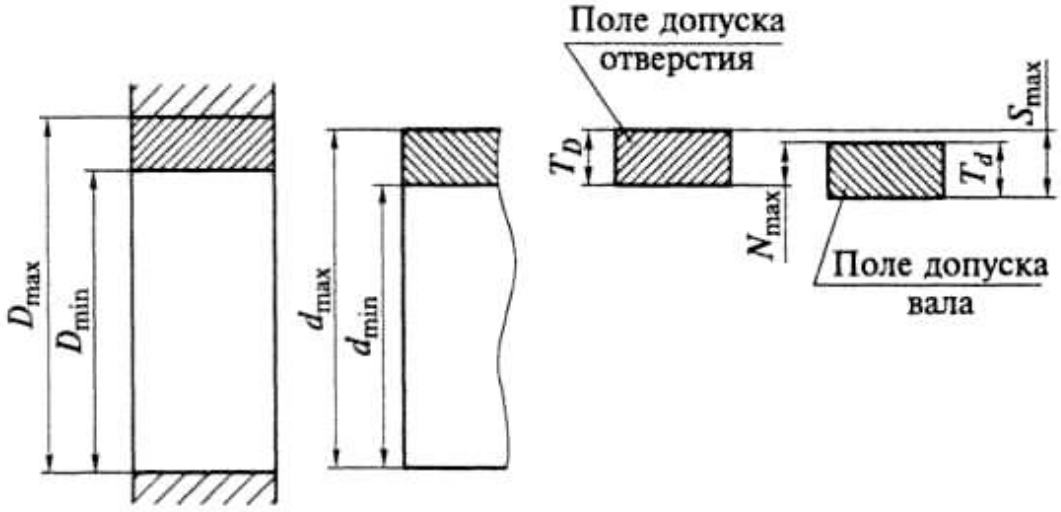



Рис.2.5 Схемы расположения полей допусков при переходных посадках

## 3. ЕДИНАЯ СИСТЕМА ДОПУСКОВ И ПОСАДОК

***Системой допусков и посадок*** называют совокупность допусков и посадок, закономерно построенных на основе опыта, теоретических и экспериментальных исследований и оформленных в виде стандартов. Система предназначена для выбора минимально необходимых, но достаточных для практики вариантов допусков и посадок типовых соединений деталей машин. Единая система допусков и посадок (ЕСДП) гладких соединений изложена в стандартах: ГОСТ 25346-89; ГОСТ 25347-82; Согласно стандартам в ЕСДП установлены допуски и посадки для размеров до 1 мм;

свыше 1 мм до 500 мм; свыше 500 мм до 3150 мм. Детали, размеры которых входят в каждый из этих диапазонов, имеют свои особенности при проектировании, обработке и контроле. Так, размеры диапазона свыше 0 до 1 мм наиболее часто реализуются в микроэлектронике с использованием нанотехнологий, размеры свыше 1 до 500 мм – в машиностроении, а размеры свыше 500 мм – в станкостроении, тяжелом машиностроении. Рассмотрим построение системы допусков и посадок для размеров от 1 до 500 мм.

### 3.1 Закономерности построения допусков

Основная закономерность построения допусков размеров *IT*, имеет вид

$$IT\ (T) = a\ i \qquad (1.1)$$

Где $a$ – число единиц допуска; $i$- единица допуска, мкм

Единица допуска функционально связана с номинальным размером и является масштабом для измерения допуска в закономерности (1.1).

На основании исследований точности механической обработки установлены следующие зависимости единиц допуска для размеров до 500 мм

$$i = 0{,}45\sqrt[3]{D} + 0{,}001D, \qquad (1{,}2)$$

где $i$ — единица допуска, мкм; $D$ — среднее геометрическое крайних размеров каждого интервала размеров, мм.

Каждый диапазон размеров разбивается на *интервалы* — основные и промежуточные. В пределах каждого интервала

основные отклонения и допуски неизменны. Основные интервалы используются для определения всех допусков системы. В СДП для номинальных размеров от 1 до 500 мм предусмотрено 13 основных интервалов размеров. Для полей допусков, образующих посадки с большими величинами зазоров или натягов, введены дополнительные промежуточные интервалы, что позволяет уменьшить колебание зазоров и натягов и

Интервалы подразделяются на основные и промежуточные.

диапазон размеров до 500 мм разбит на 13 основных интервалов:

| | | |
|---|---|---|
| свыше1 до З мм; | свыше 30 до 50 мм; | свыше 250 до 315 мм; |
| свыше З до б мм; | свыше 50 до 80 мм; | свыше 315 до 400 мм; |
| свыше б до10 мм; | свыше 80 до 120 мм; | свыше 400 до 500мм. |
| свыше 10 до 18 мм; | свыше 120 до 180 мм; | |
| свыше 18 до 30 мм; | свыше 180 до 250 мм; | |

Промежуточные интервалы введены для номинальных размеров свыше 10 мм и делят каждый основной интервал на две, а в некоторых случаях – на три части. В пределах каждого интервала по зависимости (1.2.) установлена единица допуска

Детали разного назначения в различных машинах и механизмах должны быть изготовлены с различной точностью. Нормирование требуемых уровней точности осуществляется с помощью квалитетов. Под ***квалитетом*** понимается совокупность допусков, изменяющихся в зависимости от номинального размера так, что уровень точности для всех номинальных размеров остается одинаковым. Допуск, характери-

зующий точность, в пределах одного квалитета зависит только от номинального размера, входящего в единицу допуска *i*.

В ЕСДП предусмотрено 20 квалитетов, которые обозначаются арабскими цифрами ( 01; 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; …;18 ). С увеличением номера квалитета точность понижается ( допуск увеличивается ).

Самые точные квалитеты (01, 0, 1, 2, 3, 4), как правило, применяются при изготовлении образцовых мер и калибров.

Квалитеты с 5-го по 12-й, как правило, применяются для сопрягаемых элементов деталей при образовании посадок.

Квалитеты с 12-го по 18-й применяют для несопрягаемых элементов деталей.

Допуск по квалитету обозначается буквами *IT* с указанием номера квалитета, например *IT*8 - допуск по 8 квалитету.

Квалитеты отличаются друг от друга коэффициентом точности *a* ( количеством единиц допуска) В табл. 1 приведено количество единиц допуска для каждого квалитета, начиная с 5 по 18.

*Таблица 1*

Число единиц допуска

| квалитет | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *«a»* | 7 | 10 | 16 | 25 | 40 | 64 | 100 | 160 | 250 | 400 | 640 | 1000 | 1600 | 2500 |

## 3.2 системы допусков и посадок

Стандарты предусматривают две равноправные системы посадок: систему отверстия и систему вала.

***Система отверстия*** – система допусков и посадок, при которой для данного номинального размера и данного квалитета предельные отклонения отверстия остаются постоянными, а требуемые посадки достигаются за счет изменения предельных размеров вала (рис.3.1). В системе отверстия основной деталью является *основное отверстие*, которого нижнее отклонение $El=0$, а верхнее $ES = + T_D$.

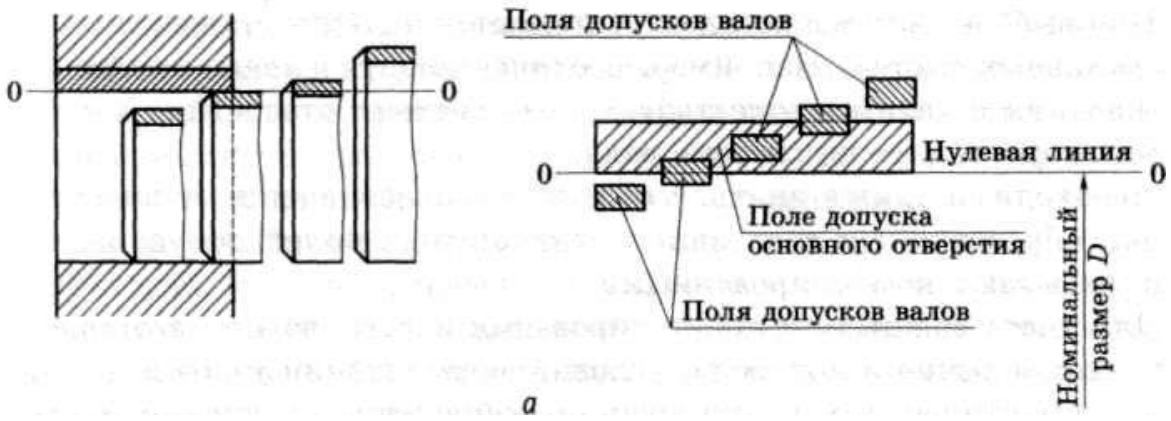



Рис.3.1 Посадки в системе отверстия

***Система вала*** – система допусков и посадок, при которой для данного номинального размера и данного квалитета предельные отклонения вала остаются постоянными, а требуемые посадки достигаются за счет изменения предельных размеров отверстия (рис.3.2). В системе вала основной деталью является *основной вал* у которого верхнее отклонение $es=0$, а нижнее $ei = - T_d$.

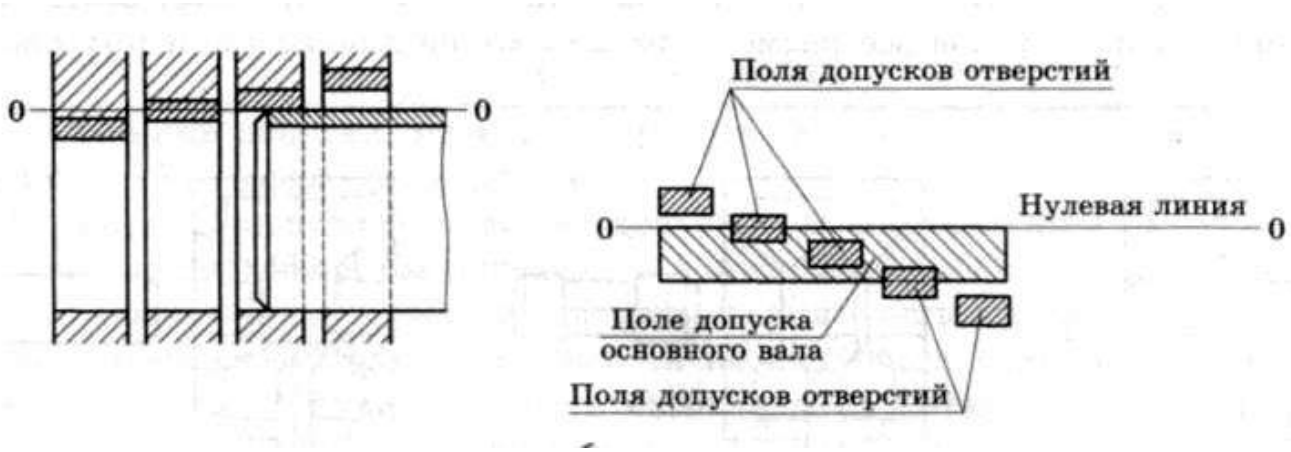


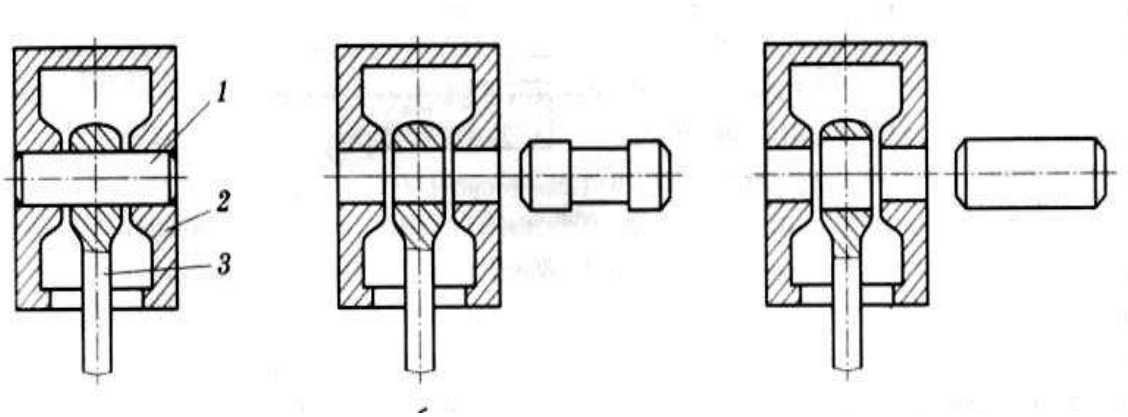

Рис.3.2. посадки в системе вала

Выбор системы посадки ( отверстия или вала) определяют исходя из конструктивных, технологических и экономических соображений.

Предпочтительной является система отверстия. Это связано с тем, что отверстия обрабатываются дорогостоящим режущим инструментом (сверлом, протяжкой, зенкером, разверткой и т.п.), предназначенным для обработки только одного размера с определенным полем допуска. Вал, независимо от размера, в большинстве своем обрабатывается одним и тем же инструментом ( резцом, шлифовальным кругом). Таким образом, количество типоразмеров инструмента для обработки отверстий будет значительно меньше при назначении посадки в системе отверстия. Система вала применяется в следующих случаях:

- когда на одном валу необходимо чередовать соединения нескольких отверстий одного номинального размера с различными посадками. На рис. 3.3, *а* представлено соединение поршневого пальца *1* с поршнем *2* и шатуном *3*. Для нормальной работы

этого узла соединение поршня и пальца должно быть выполнено по неподвижной посадке, а шатуна с пальцем — по подвижной посадке. Назначение посадок в системе отверстия (рис. 3.3, *б)* привело бы к неудобствам при обработке ступенчатого пальца и, главное, к порче отверстия шатуна при сборке. При назначении посадок в системе вала (рис. 3.3, *в*) эти недостатки исключаются.




*а* *б* *в*

Рис.3.3 Соединение поршневого пальца с поршнем и шатуном двигателя автомобиля;

*а* – общий вид соединения: 1 – поршневой палец; 2- поршень; 3- шатун; *б*- соединение в системе отверстия*; в*- соединение в системе вала

- система вала также применяется в случаях, когда детали типа валиков или осей изготавливаются из калиброванных холодно-тянутых прутков, дополнительная механическая обработка которых не предусматривается.

- и, наконец, посадка в системе вала назначается в случаях, когда вал является стандартной деталью или сборочной единицей (штифт, шплинт, шпонка, наружное кольцо подшипника и т.п.).

Необходимо также отметить, что возможно назначение и внесистемных посадок, образованных сочетанием стандартных полей допусков, которые иногда называют комбинированными.

## 3.3 Ряды основных отклонений

***Основное отклонение***- это одно из двух предельных отклонений ( верхнее или нижнее), по величине и знаку которого определяется положение поля допуска относительно нулевой линии.

По ЕСДП таким отклонением является отклонение, ближайшее к нулевой линии. Стандарт предусматривает 28 рядов основных отклонений для валов и столько же основных отклонений для отверстий. Отклонения валов обозначаются строчными буквами латинского алфавита от $a$ до $z$ , а отверстия прописными буквами от $A$ до $Z$.

Схематично ряды основных отклонений показаны на рис.3.4 Каждому основному отклонению на схеме соответствуют горизонтальная черта, от которой начинается поле допуска. Штриховкой показано направление поля допуска, а второе отклонение зависит от того, по какому квалитету будет выполнено данное предельное отклонение.

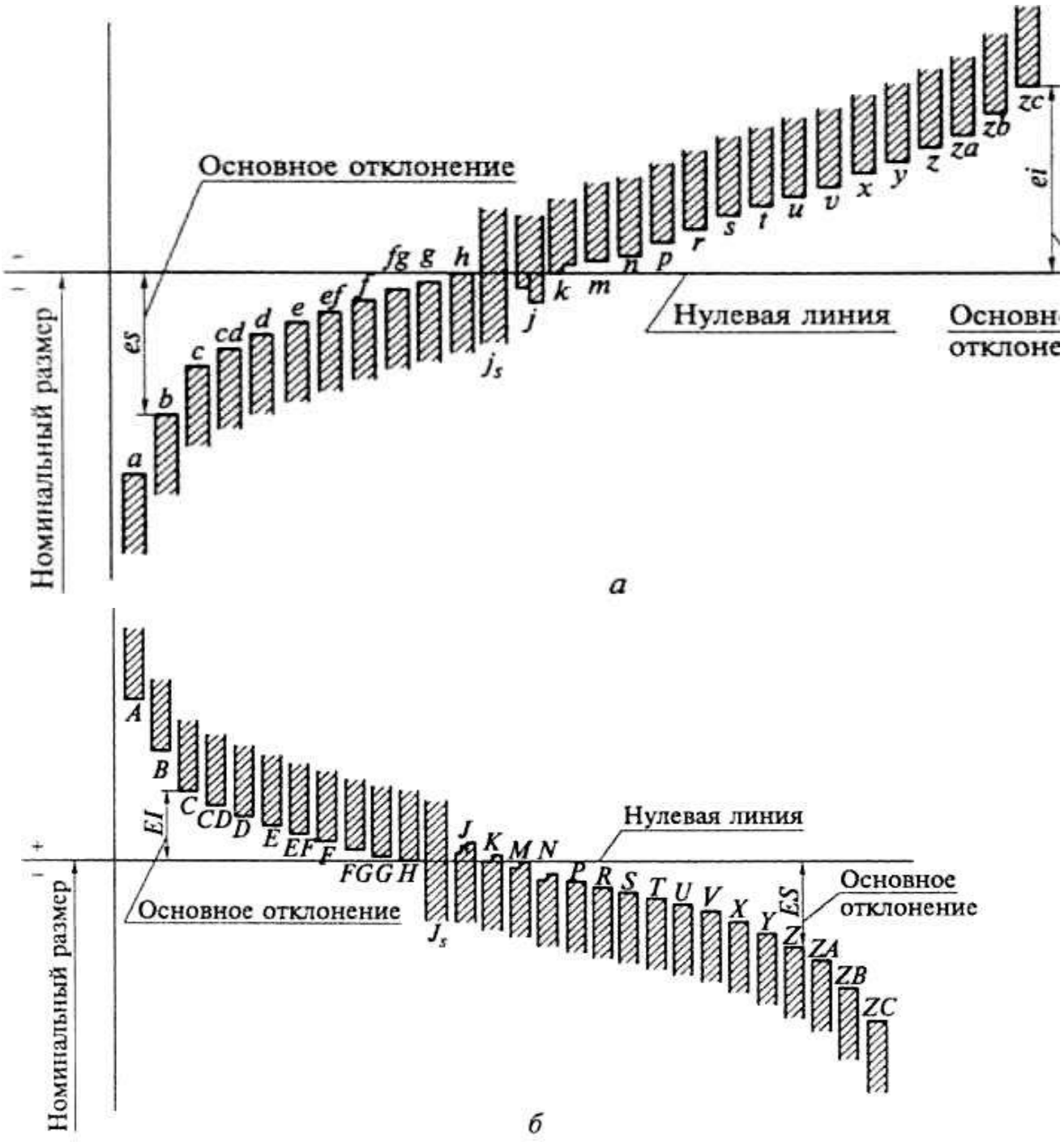



Рис.3.4. основные отклонения для валов (а), для отверстий (б)

## 3.4 Поля допусков

Поле допуска в ЕСДП образуется сочетанием одного из основных отклонений с допуском по одному из квалитетов. В соответствии с этим поля допусков обозначаются буквой основного отклонения и номерами квалитетов, например

для валов $h6$, $d11$, $b12$, $s8$ и т.д.;

для отверстий $A11$, $H8$, $S7$ и т.д.

По основному отклонению и допуску вычисляют второе предельное отклонение, ограничивающее данное поле допуска.

Если основное отклонение - верхнее, то нижнее отклонение определяют по зависимости:

для вала $ei = es - IT$;

для отверстия $El = ES - IT$.

Если основное отклонение – нижнее, то верхнее отклонение :

для вала $es = ei + IT$;

для отверстия $ES = El + El$.

В системе ЕСДП можно образовывать поля допусков для любого квалитета, что позволяет получить более 500 полей допусков для валов и столько же полей допусков для отверстий. Однако не все возможные поля допусков могут найти применение даже в перспективе, на которую ориентирован стандарт, так как одновременное применение на практике всех полей допусков неприемлемо по экономическим соображениям ( затрудняет унификацию изделий, различных инструментов и калибров). В ЕСДП для диапазона размеров от 1 до 500 мм применяется отбор полей допусков, которые делятся на основные и дополнительные .

Основные поля допусков включают в себя предпочтительные ( имеющие первоочередное применение) и рекомендуемые. Дополнительные поля допусков являются полями ограниченного применения и используются тогда, когда применение основных полей допусков не позволяет выполнить требования, предъявляемые к изделию.

## 3.5 Образование посадок

Посадки в системе ЕСДП образуются сочетанием полей допусков отверстия и вала.

Принципиально допускается любое сочетание полей допусков отверстия и вала. Предпочтение следует отдавать посадкам, образованным в системе отверстия или в системе вала. ГОСТ 25347 -82 устанавливает ряд стандартных посадок в системе отверстия и в системе вала. В каждой системе выделяются предпочтительные посадки, выделенные рамочками.

**Минобрнауки Российской Федерации**
**ФГБОУ ВО**
**«Уральский государственный**
**горный университет»**

**Е. Б. Волков, Ю. М. Казаков**

# ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

*Учебно-методическое пособие*
*для самостоятельной работы студентов,*
*выполнению практических и контрольных работ*

**Екатеринбург**
**2019**

Минобрнауки Российской Федерации
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ:
проректор по УМК

_____доц. С. А. Упоров

«___»_____2019 г.

Е. Б. Волков, Ю. М. Казаков

# ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

*Учебно-методическое пособие*
*для самостоятельной работы студентов,*
*выполнению практических и контрольных работ*

Издание УГГУ Екатеринбург, 2019

В 67

Рецензент: *Н. М. Суслов*, д-р техн. наук, заведующий кафедрой ГМК
Уральского государственного горного университета

Учебно-методическое пособие рассмотрено на заседании кафедры технической механики от 19.12.2016 г. (протокол № 2) и рекомендовано для издания в УГГУ.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Уральского государственного горного университета.

**Волков Е. Б., Казаков Ю. М.**

В67 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА: Учебно-методическое пособие для самостоятельной работы студентов, выполнению практических и контрольных работ / Е. Б. Волков, Ю. М. Казаков, Уральский государственный горный университет. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2019. 156 с.

Учебно-методическое пособие для самостоятельной работы студентов содержит краткие методические указания, контрольные задания и примеры выполнения заданий по темам: «Статика твердого тела. Равновесие произвольной плоской и пространственной систем сил», «Кинематика вращательного и плоскопараллельного движений твердого тела. Определение скоростей и ускорений точек твёрдого тела», «Сложное движение точки», «Динамика точки. Дифференциальные уравнения движения точки. Гармонические и вынужденные колебания точки. Применение теоремы об изменении кинетической энергии при исследовании движения точки», «Применение общих теорем динамики к исследованию движения механической системы», «Принципы механики. Применение общего уравнения динамики к исследованию движения механической системы», «Уравнения Лагранжа II рода».

Учебно-методическое пособие для студентов всех специальностей очной формы обучения.

© Волков Е. Б., Казаков Ю. М., 2019
©Уральский государственный горный университет, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. СТАТИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА ..... 4
1.1. Основные виды связей и их реакции ..... 4
1.2. Моменты силы относительно центра и относительно оси. Пара сил. Момент пары ..... 5
1.3. Условия равновесия систем сил ..... 7
1.4. Задание С1. Равновесие произвольной плоской системы сил. Равновесие системы тел ..... 8
1.5. Задание С2. Равновесие пространственной системы сил ..... 17
2. КИНЕМАТИКА ТОЧКИ И ТВЕРДОГО ТЕЛА ..... 26
2.1. Кинематика точки. Основные параметры движения точки ..... 26
2.2. Вращение тела вокруг неподвижной оси ..... 28
2.3. Плоскопараллельное движение твёрдого тела ..... 29
2.4. Задание К1. Определение скоростей и ускорений точек твердого тела при поступательном и вращательном движениях ..... 32
2.5. Задание К2. Определение скоростей точек твёрдого тела при плоскопараллельном движении ..... 38
2.6. Задание К3. Определение ускорений точек твёрдого тела при плоскопараллельном движении ..... 46
3. СЛОЖНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТОЧКИ ..... 57
3.1. Основные понятия сложного движения точки ..... 57
3.2. Задание К4. Определение скорости и ускорения точки при сложном движении 60
4. ДИНАМИКА ТОЧКИ ..... 73
4.1. Дифференциальные уравнения движения точки. ..... 73
4.2. Задание Д1. Интегрирование дифференциальных уравнений движения точки .... 73
4.3. Колебания материальной точки ..... 80
4.4. Задание Д2. Исследование колебаний точки ..... 84
4.5. Теорема об изменении кинетической энергии точки. ..... 95
4.6. Задание Д3. Исследование движения точки с применением теоремы об изменении кинетической энергии ..... 96
5. ДИНАМИКА МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ..... 103
5.1. Описание движений твёрдых тел на основе общих теорем динамики системы . 103
5.2. Задание Д4. Динамический расчет механической системы ..... 104
5.3. Теорема об изменении кинетической энергии системы. ..... 112
5.4. Задание Д5. Исследование движения механической системы с применением теоремы об изменении кинетической энергии ..... 114
6. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА ..... 124
6.1. Принципы механики. Общее уравнение динамики ..... 124
6.2. Задание Д6. Исследование механической системы с применением общего уравнения динамики ..... 126
6.3. Уравнения Лагранжа II рода ..... 136
6.4. Задание Д7. Исследование механической системы с одной степенью свободы с применением уравнений Лагранжа ..... 137
6.5. Задание Д8. Исследование механической системы с двумя степенями свободы 145
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ..... 155

# 1. СТАТИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

**Статика** представляет раздел теоретической механики, в котором изучаются условия равновесия твердых тел под действием системы сил.

## 1.1. Основные виды связей и их реакции

**Опора тела на гладкую плоскость (поверхность) без трения**. Реакция приложена в точке касания и направлена перпендикулярно к общей касательной соприкасающихся поверхностей. При опоре углом, или на угол (рис. 1.1, *a*), реакция направлена по нормали к одной из поверхностей. **Гибкая связь**. Если на тело наложена связь в виде гибкой нерастяжимой нити (каната, троса), то реакция связи $\vec{T}$, равная натяжению нити, приложена к телу и направлена вдоль нити (рис. 1.1, *b*).

**Цилиндрический шарнир (подшипник)** создает соединение, при котором

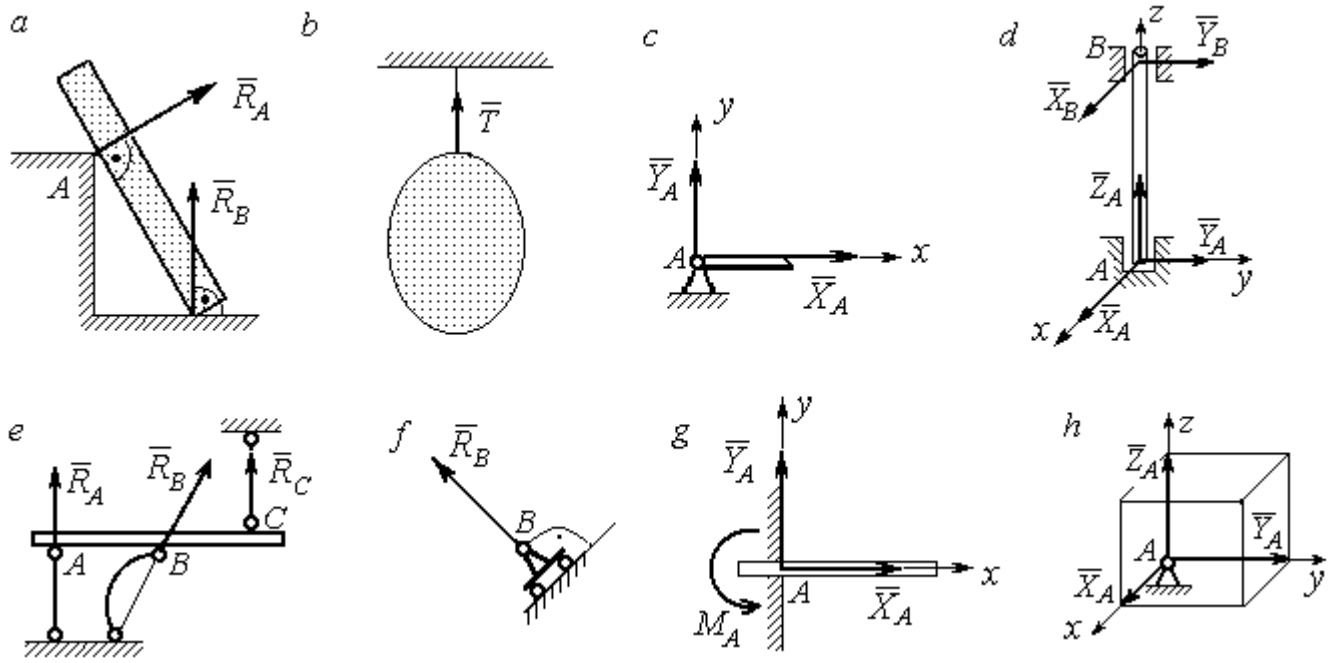



Рис. 1.1. Виды связей и их реакции:
*a* – реакция опоры тела на гладкую поверхность без трения; *b* – реакция связи гибкой нерастяжимой нити; *c* – реакция цилиндрического шарнира; *d* – реакция подшипника и подпятника; *e* – реакция невесомого стержня; *f* – реакция подвижной опоры; *g* – реакция жесткой заделки; *h* – реакция пространственного шарнира

одно тело может вращаться по отношению к другому. Реакция цилиндрического шарнира лежит в плоскости, перпендикулярной оси шарнира. При решении задач

реакцию цилиндрического шарнира $\vec{R}_A$ изображают ее составляющими $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$, взятыми по направлениям координатных осей (рис. 1.1, *c*). Реакция подшипника $\vec{R}_B$ (рис. 1.1, *d*) также изображается своими составляющими $\vec{X}_B$ и $\vec{Y}_B$, взятыми по направлениям координатных осей в плоскости, перпендикулярной оси вращения подшипника. Величина реакции определяется по формуле: $R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2}$. **Реакция прямолинейного невесомого стержня с шарнирными соединениями на краях** направлена вдоль самого стержня, а криволинейного – вдоль линии, соединяющей точки крепления стержня (рис. 1.1, *e*). **Реакция подвижной опоры** $\vec{R}_B$ (рис. 1.1, *f*) направлена по нормали к поверхности, на которую опираются катки опоры. **Жесткая заделка** (рис. 1.1, *g*) препятствует не только линейным перемещениям тела, но и повороту. Реакция заделки состоит из силы реакции $\vec{R}_A$ и пары сил с моментом $M_A$. При решении задач силу реакции жесткой заделки $\vec{R}_A$ изображают ее составляющими $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$, взятыми по направлениям координатных осей. Модуль реакции определяется по формуле $R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2}$. Виды связей и их реакции показаны на рис. 1.1.

## 1.2. Моменты силы относительно центра и относительно оси. Пара сил. Момент пары

Алгебраическим моментом силы $F$ относительно центра $O$ $M_O(\vec{F})$, или просто **моментом силы** $\vec{F}$ относительно центра *O,* называют взятое с соответствующим знаком произведение модуля силы $\vec{F}$ на кратчайшее расстояние *h* от центра *O* до линии действия силы: $M_O(\vec{F}) = \pm Fh$ (рис. 1.2, *a*).

Величину *h* называют **плечом силы**. Момент силы относительно центра считается положительным, если сила стремится повернуть тело вокруг центра против хода часовой стрелки, и отрицательным – в обратном случае.

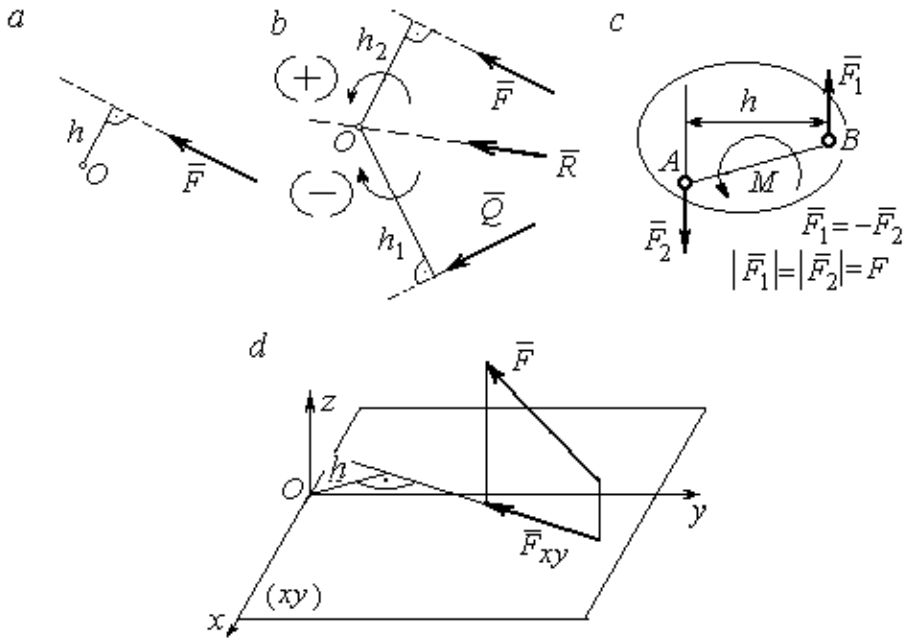



Рис. 1.2. Схемы для вычисления моментов сил:
*a*, *b* – момент силы относительно центра; *c* – момент пары сил;
*d* – момент силы относительно оси

На рис. 1.2, *b* показано, что момент силы $\vec{F}$ относительно центра *O* положительный, а момент силы $\vec{Q}$ относительно того же центра – отрицательный. Момент силы $\vec{R}$ относительно центра *O* равен нулю, так как линия действия этой силы проходит через центр *O* и плечо силы равно нулю.

**Парой сил,** или просто парой (рис.1.2, *c*), называют систему двух равных по модулю сил, параллельных, направленных в противоположные стороны и не лежащих на одной прямой. Алгебраическим моментом пары сил, или **моментом пары,** называют взятое со знаком плюс или минус произведение модуля одной из сил пары на плечо пары – кратчайшее расстояние между линиями действия ее сил. Правило знаков такое же, как и для момента силы. На рисунках пару часто изображают дуговой стрелкой, показывающей направление поворота твердого тела под действием пары (см. *M* на рис. 1.2, *c*).

**Моментом силы относительно оси** называют момент проекции этой силы на плоскость, перпендикулярную оси, относительно точки пересечения оси с этой плоскостью. На рис. 1.2, *d* показано вычисление момента силы *F* относительно

оси $z$: $M_z(\vec{F}) = F_{xy}h$, где $F_{xy}$ – проекция силы $\vec{F}$ на плоскость $xy$, перпендикулярную оси $z$, $h$ – плечо проекции $F_{xy}$ относительно центра $O$ – точки пересечения оси $z$ и плоскости $xOy$.

### 1.3. Условия равновесия систем сил

**Плоской системой сил** называется система сил, расположенных в одной плоскости.

**Основная форма условий равновесия плоской системы сил.** Для равновесия плоской системы сил, приложенных к твердому телу, необходимо и достаточно, чтобы суммы проекций всех сил на каждую из двух осей прямоугольной системы координат, расположенной в плоскости действия сил, были равны нулю и сумма моментов сил относительно любого центра, находящегося в плоскости действия сил, также была равна нулю:

$$\sum F_{kx} = 0,\ \sum F_{ky} = 0,\ \sum M_A(\vec{F}_k) = 0,$$

где $F_{kx}, F_{ky}$ – проекции всех сил на координатные оси; $M_A(\vec{F}_k)$ – моменты всех сил относительно произвольно выбранного центра $A$.

**Пространственной системой сил** называется система сил, расположенных произвольно в пространстве.

Для **равновесия пространственной системы сил** необходимо и достаточно, чтобы суммы проекций всех сил на оси прямоугольной системы координат были равны нулю и суммы моментов всех сил относительно тех же осей также были равны нулю:

$$\sum F_{kx} = 0,\ \sum F_{ky} = 0,\ \sum F_{kz} = 0,$$

$$\sum M_x(\vec{F}_k) = 0,\ \sum M_y(\vec{F}_k) = 0,\ \sum M_z(\vec{F}_k) = 0,$$

где $F_{kx}, F_{ky}, F_{kz}$ – проекции всех сил на координатные оси $x, y, z$; $M_x(\vec{F}_k)$, $M_y(\vec{F}_k)$, $M_z(\vec{F}_k)$ – моменты всех сил относительно выбранных осей.

### Равновесие систем тел

Связи, соединяющие части конструкции, называют **внутренними,** в отличие от **внешних** связей, скрепляющих конструкцию с внешними телами, не входящими в данную конструкцию. Одним из способов решения задач на равновесие сил, действующих на сочленённую конструкцию с внутренними связями, является **разбиение конструкции на отдельные тела** и составление уравнений равновесия для каждого из тел, входящих в конструкцию. При этом в уравнения равновесия должны входить только силы, непосредственно приложенные к тому телу, равновесие которого рассматривается.

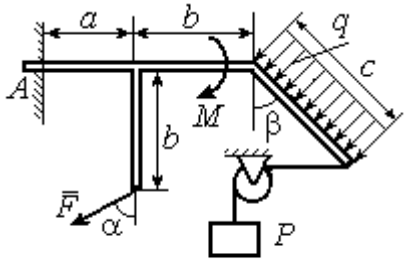
## 1.4. Задание С1. Равновесие произвольной плоской системы сил. Равновесие системы тел

Каждый вариант задания включает две задачи по темам: «Равновесие произвольной плоской системы сил» и «Равновесие системы тел».

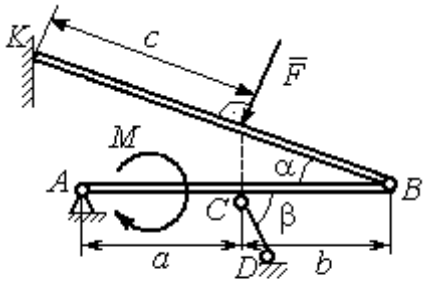
В задачах требуется определить реакции связей конструкции исходя из условия равновесия произвольной плоской системы сил. Весом стержневых подпорок, поддерживающих балочные конструкции, и блоков, через которые перекинуты невесомые нити, пренебречь.

Варианты заданий даны на рис. 1.3 – 1.6. Исходные данные приведены в табл. 1.1. Из таблицы исходных данных выбираются значения тех параметров, которые указаны на схемах.

| **Варианты № 1, 11, 21** | |
|---|---|
| Задача 1 | Задача 2 |



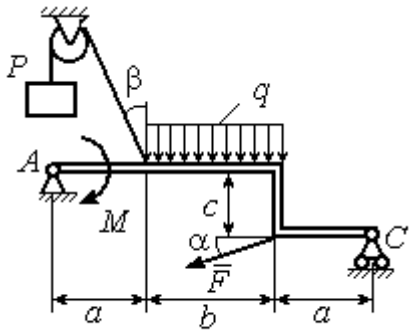

Найти реакцию жесткой заделки в точке $A$




Найти реакции шарниров $A$, $B$, реакцию стержня $CD$ и реакцию опоры в точке $K$

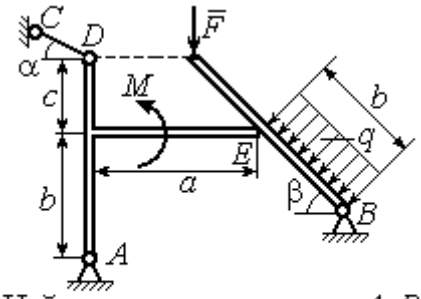
**Варианты № 2, 12, 22**

Задача 1




Найти реакции шарниров $A$ и $C$

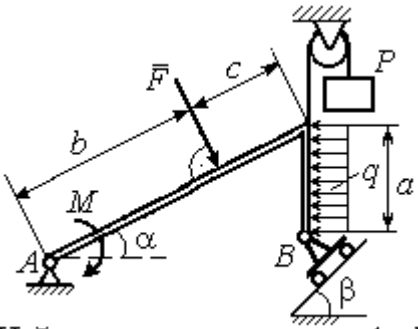
Задача 2




Найти реакции шарниров $A$, $B$, реакцию опоры в точке $E$ и реакцию стержня $CD$

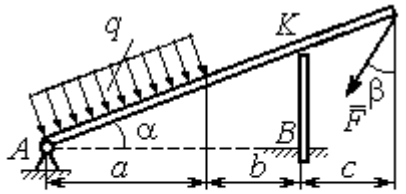
**Варианты № 3, 13, 23**

Задача 1




Найти реакцию шарниров $A$ и $B$

Задача 2

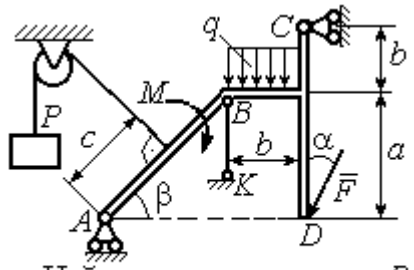



Найти реакцию шарнира $A$, реакцию опоры в точке $K$ и реакцию жесткой заделки в точке $B$

Рис. 1.3. Задание С1. Равновесие произвольной плоской системы сил. Равновесие системы тел. Номера вариантов задания 1 – 3, 11 – 13, 21 – 23

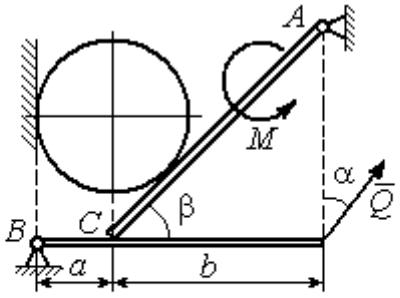
**Варианты № 4, 14, 24**

Задача 1




Найти усилие в стержне $BK$ и реакцию шарниров $A$, $C$

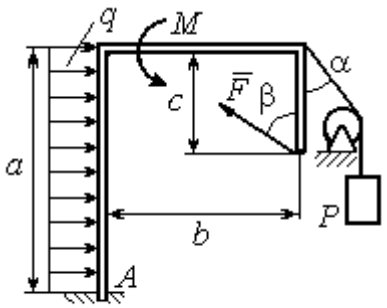
Задача 2




Вес шара $P$. Найти реакцию шарниров $A$, $B$, давление шара на балку и стенку, реакцию опоры балки в точке $C$ и уравновешивающую силу $Q$

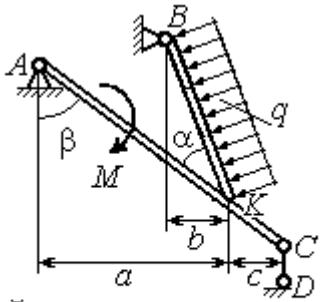
**Варианты № 5, 15, 25**

Задача 1




Найти реакцию жесткой заделки в точке $A$

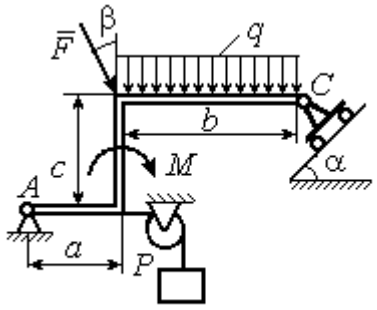
Задача 2




Найти реакцию шарнирв $A$, $B$, реакцию стержня $CD$ и реакцию опоры в точке $K$

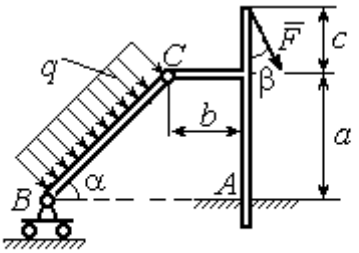
**Варианты № 6, 16, 26**

Задача 1




Найти реакции шарниров $A$ и $C$

Задача 2

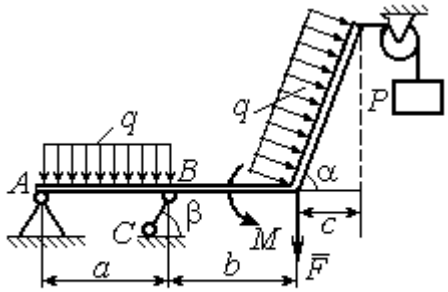



Найти реакцию жесткой заделки в точке $A$ и реакции шарниров $B$ и $C$

Рис. 1.4. Задание С1. Равновесие произвольной плоской системы сил. Равновесие системы тел. Номера вариантов задания 4 – 6, 14 – 16, 24 –26

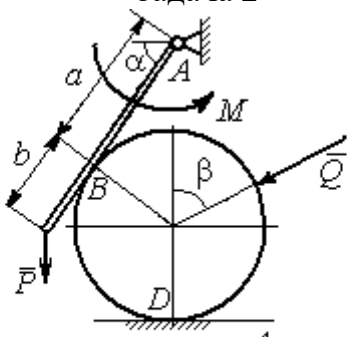
**Варианты № 7, 17, 27**

Задача 1




Найти реакцию стержня $BC$ и реакцию шарнира $A$

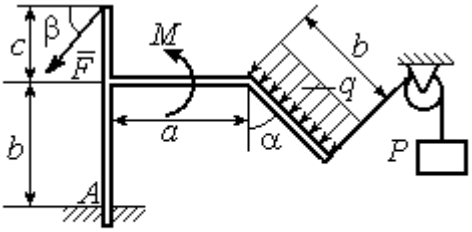
Задача 2




Найти реакцию шарнира $A$, давление балки на шар, реакцию опоры шара в точке $D$ и уравновешивающую силу $Q$

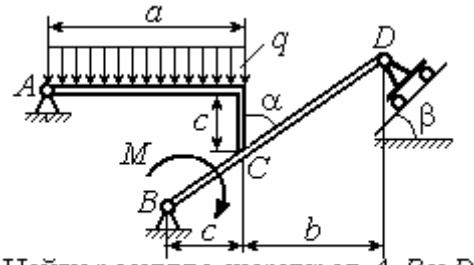
**Варианты № 8, 18, 28**

Задача 1




Найти реакцию жесткой заделки в точке $A$

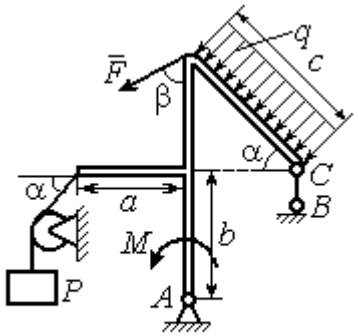
Задача 2




Найти реакцию шарниров $A$, $B$ и $D$ и реакцию опоры в точке $C$

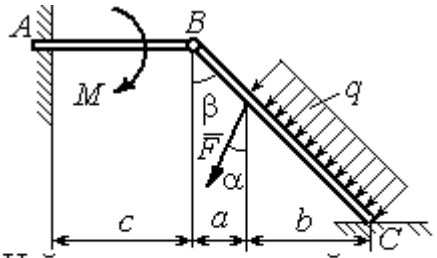
**Варианты № 9, 19, 29**

Задача 1




Найти реакцию стержня $BC$ и реакцию шарнира $A$

Задача 2

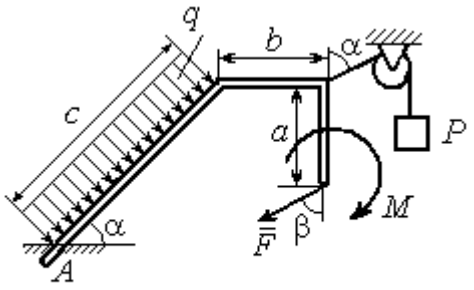



Найти реакцию жесткой заделки в точке $A$, реакцию шарнира $B$ и реакцию опоры в точке $C$

Рис. 1.5. Задание С1. Равновесие произвольной плоской системы сил. Равновесие системы тел. Номера вариантов задания 7 – 9, 17 – 19, 27 – 29

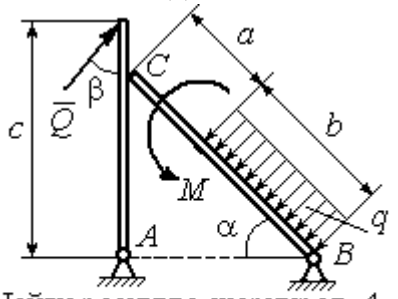
**Варианты № 10, 20, 30**

Задача 1




Найти реакцию жесткой заделки в точке $A$

Задача 2




Найти реакцию шарниров $A$, $B$, реакцию опоры в точке $C$ и уравновешивающую силу $Q$

Рис. 1.6. Задание С1. Равновесие произвольной плоской системы сил. Равновесие системы тел. Номера вариантов задания 10, 20, 30

Таблица 1.1

**Исходные данные задания С1. Равновесие произвольной плоской системы сил. Равновесие системы тел.**

| Номер варианта задания | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** | **11** | **12** | **13** | **14** | **15** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $P$, кН | 6 | 5 | 6 | 12 | 6 | 6 | 10 | 3 | 8 | 5 | 10 | 4 | 8 | 10 | 8 |
| $F$, кН | 12 | 6 | 10 | 5 | 12 | 8 | 6 | 5 | 6 | 2 | 12 | 8 | 12 | 6 | 10 |
| $q$, кН/м | 5 | 4 | 2 | 3 | 6 | 3 | 5 | 2 | 2 | 4 | 6 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| $M$, кН·м | 12 | 8 | 6 | 8 | 12 | 5 | 12 | 8 | 4 | 6 | 8 | 12 | 10 | 6 | 10 |
| $\alpha$, град | 45 | 60 | 30 | 60 | 30 | 30 | 45 | 60 | 30 | 30 | 45 | 30 | 60 | 45 | 60 |
| $\beta$, град | 60 | 30 | 45 | 30 | 60 | 90 | 60 | 60 | 30 | 45 | 30 | 45 | 30 | 60 | 30 |
| $a$, м | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 4 |
| $b$, м | 3 | 3 | 4 | 3 | 2 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 2 |
| $c$, м | 4 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 | 5 | 4 | 4 | 2 | 1 | 2 | 2 |

| Номер варианта задания | **16** | **17** | **18** | **19** | **20** | **21** | **22** | **23** | **24** | **25** | **26** | **27** | **28** | **29** | **30** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $P$, кН | 10 | 8 | 10 | 6 | 4 | 6 | 12 | 10 | 5 | 6 | 8 | 6 | 8 | 4 | 6 |
| $F$, кН | 6 | 12 | 12 | 8 | 3 | 14 | 10 | 8 | 15 | 10 | 12 | 8 | 10 | 10 | 2 |
| $q$, кН/м | 5 | 3 | 4 | 3 | 2 | 3 | 2 | 5 | 4 | 2 | 3 | 4 | 5 | 2 | 4 |
| $M$, кН·м | 10 | 6 | 8 | 6 | 5 | 12 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 10 | 6 | 4 | 8 |
| $\alpha$, град | 60 | 60 | 30 | 45 | 60 | 30 | 60 | 45 | 30 | 60 | 45 | 30 | 30 | 30 | 45 |
| $\beta$, град | 45 | 30 | 30 | 60 | 60 | 45 | 30 | 60 | 30 | 45 | 90 | 30 | 60 | 45 | 30 |
| $a$, м | 3 | 4 | 3 | 1 | 2 | 2 | 4 | 1 | 4 | 3 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 |
| $b$, м | 2 | 4 | 3 | 3 | 4 | 1 | 4 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| $c$, м | 3 | 2 | 2 | 4 | 5 | 4 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 3 | 5 |

**Пример выполнения задания С1. Равновесие произвольной плоской системы сил. Равновесие системы тел.**

**Задача** 1**.** Рама *ACE* (рис. 1.7) в точке *A* закреплена на цилиндрической шарнирной опоре, а в точке *B* поддерживается вертикальным невесомым стержнем *BK*. На раму действуют: пара с моментом $M = 8$ Нм, сила $F = 10$ Н, приложенная в точке *D* под углом 60° к раме, и равномерно распределенная нагрузка интенсивностью $q = 2$ Н/м, приложенная на отрезке *AB*. В точке *E* под прямым углом к участку балки *CE* прикреплен трос, несущий груз $P = 20$ Н. Пренебрегая весом балки, определить реакцию шарнира *A* и реакцию стержневой опоры *BK*, если $a = 2$ м.

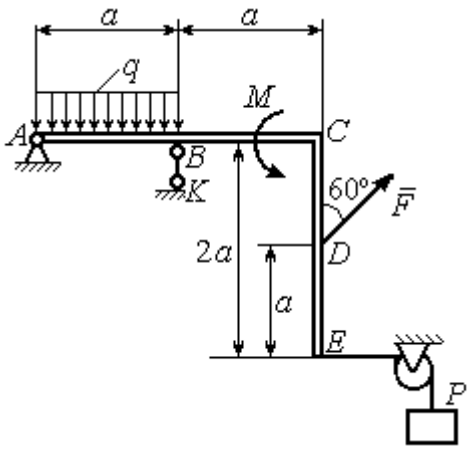


Рис. 1.7. Конструкция рамы

*Решение*

Выбираем систему координат *xAy*, например, как показано на рис. 1.8. Заменяем действие связей их реакциями. Изображаем реакцию шарнира *A* двумя ее составляющими $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$, направленными вдоль горизонтальной и вертикальной осей (см. рис. 1.8). Реакция $\vec{R}_B$ невесомой стержневой опоры *BK* приложена в точке *B* и направлена вдоль стержня *BK*. Заменяем распределенную нагрузку её равнодействующей $\vec{Q}$. Сила $\vec{Q}$ приложена в середине отрезка *AB* и по модулю равна $Q = qa = 4$ Н. Действие груза *P* на раму изображается реакцией $\vec{T}$, равной по величине весу груза.

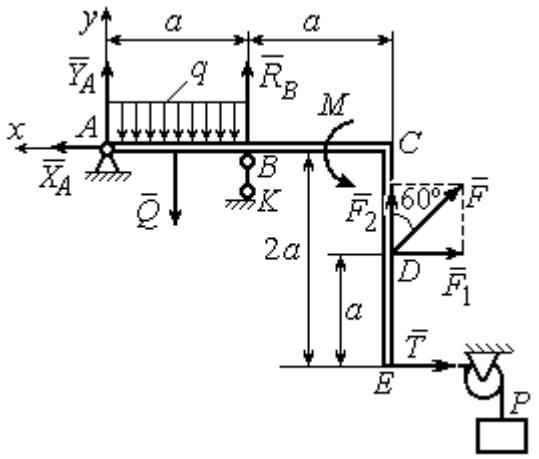


Рис. 1.8. Силы и реакции связей, действующие на раму при её равновесии

При равновесии рамы действующие на неё силы составляют уравновешенную произвольную плоскую систему. Условия равновесия системы сил имеют вид: $\sum F_{kx} = 0$, $\sum F_{ky} = 0$, $\sum M_A(\vec{F}_k) = 0$. Вычисляя проекции сил на оси *x*, *y*, и моменты сил относительно центра *A*, уравнения равновесия получим в виде:

$$\sum F_{kx} = X_A - F\cos 30^\circ - T = 0, \quad \sum F_{ky} = Y_A - Q + R_B + F\cos 60^\circ = 0.$$

$$\sum M_A(\vec{F}_k) = -Q\frac{a}{2} + R_B a + M + F\cos 60^\circ \cdot 2a + F\cos 30^\circ \cdot a + T2a = 0.$$

Здесь для вычисления момента силы $\vec{F}$ относительно центра $A$ использована теорема Вариньона: $M_A(\vec{F}) = M_A(\vec{F}_1) + M_A(\vec{F}_2) = F_1 \cdot a + F_2 \cdot 2a$, где $F_1 = F\cos 30^\circ$, $F_2 = F\cos 60^\circ$ (см. рис. 1.8).

Подставляя в уравнения равновесия исходные данные задачи, получим систему уравнений относительно неизвестных $X_A, Y_A, R_B$:

$$X_A - 28{,}66 = 0, \quad Y_A + R_B + 1 = 0, \quad R_B \cdot 2 + 121{,}32 = 0.$$

Решая систему, найдем $X_A$ = 28,66 Н, $Y_A$ = 59,66 Н, $R_B$ = – 60,66 Н.

Отрицательное значение величины $R_B$ означает, что фактическое направление реакции $R_B$ стержневой опоры $BK$ противоположно направлению, показанному на рис. 1.8. Численное значение реакции шарнира

$$R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2} = \sqrt{28{,}66^2 + 59{,}66^2} = 66{,}18 \text{ Н}.$$

**Задача 2.** Балка *ABLC* с вертикальной частью *AB* и горизонтальной перекладиной *LC* закреплена в точке *A* с помощью жесткой заделки (рис. 1.9). Наклонная балка *EC* с углом наклона к горизонту 60° в точке *C* шарнирно прикреплена к горизонтальной перекладине *CL*, а в точке *E* закреплена на шарнирно-подвижной опоре, установленной на горизонтальной поверхности. На конструкцию действуют равномерно распределенная на отрезках *BL* и *DE* нагрузка с одинаковой интенсивностью $q$ = 2 кН/м, сила $\vec{F}$, приложенная в точке *D* перпендикулярно балке *EC* и равная по величине $F$ = 10 кН, и пара сил с моментом $M$ = 5 кН·м. Определить реакцию жесткой заделки *A* и реакции шарниров *C* и *E*, если $a$ = 2 м.

*Решение*

Разделяем систему на две части по шарниру *C* и рассмотрим равновесие балок *ABLC* и *EC* отдельно. Изобразим обе балки и расставим внешние силы и реакции связей (рис. 1.10). Рассмотрим балку *ABLC* (рис. 1.10, *a*). Заменим распределенную нагрузку эквивалентной силой $\vec{Q}_1$, приложенной в середине отрезка *BL*, направленной в сторону действия нагрузки и равной $Q_1 = q \cdot a = 4$ кН. Кроме силы $\vec{Q}_1$ и пары сил с моментом *M* на балку действуют реакция жёсткой заделки в точке *A*, имеющая своими составляющими силы $\vec{X}_A$, $\vec{Y}_A$ и пару сил с моментом $M_A$, а также реакция шарнира *C*, разложенная на составляющие $\vec{X}_C$, $\vec{Y}_C$ (см. рис. 1.10, *a*). Действующие на раму силы составляют уравновешенную плоскую систему сил. Выберем систему координат *xAy*, как показано на рис. 1.10, *a*, и составим уравнения равновесия:

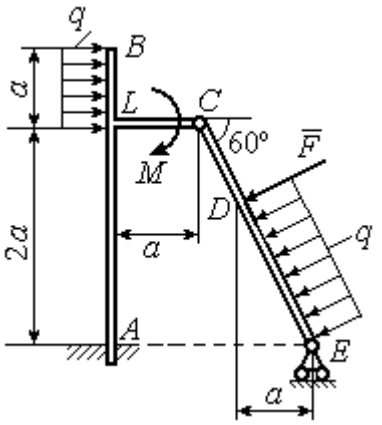



Рис. 1.9. Равновесие конструкции двух балок, соединённых шарниром

$$\sum F_{kx} = X_A + Q_1 + X_C = 0,$$

$$\sum F_{ky} = Y_A + Y_C = 0,$$

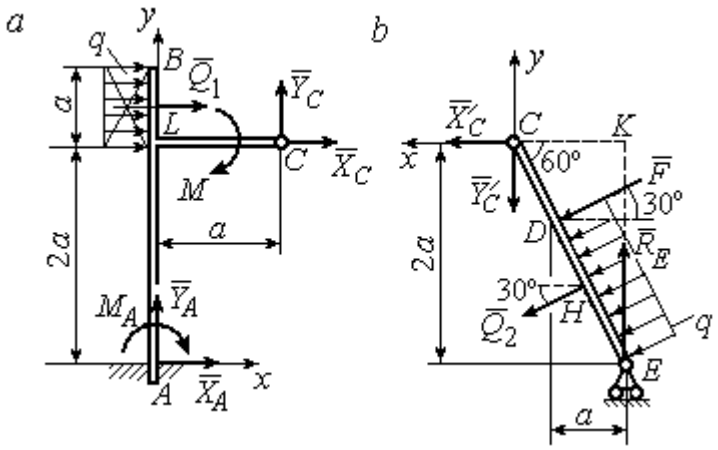



Рис. 1.10. Равновесие частей конструкции:
*a* - силы и реакции связей, действующие на балку *ABLC*;
*b* - силы и реакции связей, действующие на балку *CE*

$$\sum M_A(\vec{F}_k) = -M_A - Q_1 \cdot \left(2a + \frac{a}{2}\right) - M + Y_C a - X_C 2a = 0.$$

Рассмотрим равновесие балки *EC*. Заменим равномерную нагрузку эквивалентной силой $\vec{Q}_2$, приложенной в середине отрезка *ED*, направленной в сторону действия нагрузки и равной по модулю $Q_2 = q \cdot 2a = 8$кН. На балку кроме сил $\vec{Q}_2$, $\vec{F}$ действуют реакции связей: $\vec{R}_E$ – реакция шарнирно-подвижной опоры в точке

*E* и $\vec{X}'_C$, $\vec{Y}'_C$ – составляющие реакции шарнира *C*. Силы $\vec{X}'_C$, $\vec{Y}'_C$ направлены противоположно силам $\vec{X}_C$, $\vec{Y}_C$ и равны им по модулю $X_C = X'_C$, $Y_C = Y'_C$ (см. рис. 1.10, *a*, *b*). Действующие на балку *EC* силы образуют плоскую уравновешенную систему сил. Выберем систему координат *xCy*, как показано на рис. 1.10, *b*, и составим уравнения равновесия. При этом центром, относительно которого будем считать моменты сил, выберем точку *C*. Получим:

$$\sum F_{kx} = Q_2 \sin 60^\circ + F\cos 30^\circ + \vec{X}'_C = 0,\ \sum F_{ky} = R_E - Q_2 \cos 60^\circ - F\sin 30^\circ - Y'_C = 0,$$

$$\sum M_C\left(\vec{F}_k\right) = -F \cdot CD - Q_2 \cdot CH + R_E \cdot CK = 0.$$

Здесь плечи сил: $CD = \dfrac{2a}{\cos 30^\circ} - 2a$, $CH = \dfrac{2a}{\cos 30^\circ} - a$, $CK = 2a\,\mathrm{tg}\,30^\circ$. Заменяя в уравнениях величины $X'_C$ на $X_C$, а $Y'_C$ на $Y_C$ и подставляя исходные данные, получим систему уравнений:

$$X_A + X_C + 4 = 0,\ Y_A + Y_C = 0,\ -M_A - 4X_C + 2Y_C - 25 = 0,$$

$$X_C + 15{,}59 = 0,\ -Y_C + R_E - 9 = 0,\ 2{,}31R_E - 27{,}14 = 0,$$

откуда найдём величины реакции жесткой заделки и реакции шарниров:

$$X_A = 11{,}59 \text{ кН},\ Y_A = -2{,}76 \text{ кН},\ M_A = 42{,}87 \text{ кН·м},$$

$$X_C = -15{,}59 \text{ кН},\ Y_C = 2{,}76 \text{ кН},\ R_E = 11{,}76 \text{ кН}.$$

Модули реакций жесткой заделки *A* и шарнира *C*:

$$R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2} = 11{,}91 \text{ кН},\ R_C = \sqrt{X_C^2 + Y_C^2} = 15{,}83 \text{ кН}.$$

## 1.5. Задание С2. Равновесие пространственной системы сил

В заданиях рассматривается равновесие однородной плиты или вала (прямого или с «ломаной» осью) с насаженным на него шкивом.

Вал закреплен подпятником и подшипником и удерживается в равновесии. На вал действуют сила $\vec{F}$, пара сил с моментом $M$ и сила $\vec{P}$. На шкив вала намотана нить, к свободному концу которой, перекинутому через невесомый блок, подвешен груз весом $Q$. Для вала определить реакции подшипника и подпятника и величину уравновешивающей силы $Q$ (или момента $M$).

Плита весом $P$ закреплена пространственным шарниром, подшипником и удерживается в заданном положении невесомым стержнем. На плиту действуют силы $\vec{F}$, $\vec{Q}$ и пара сил с моментом $M$. Для плиты найти реакции сферического и цилиндрического шарниров и реакцию стержня.

Варианты задания даны на рис. 1.11 – 1.13. Исходные данные для выполнения задания приведены в табл. 1.2.

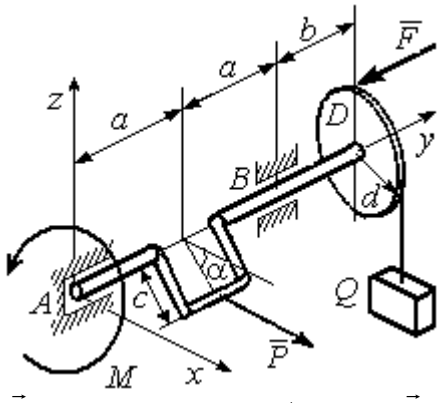
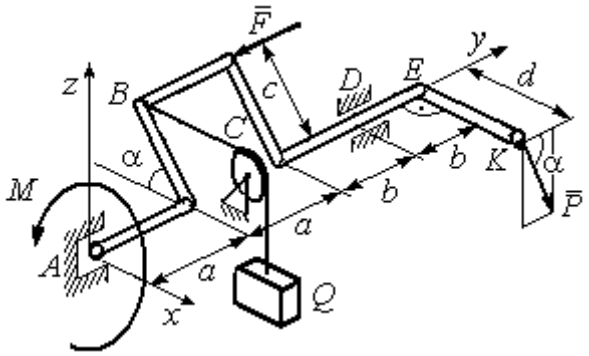
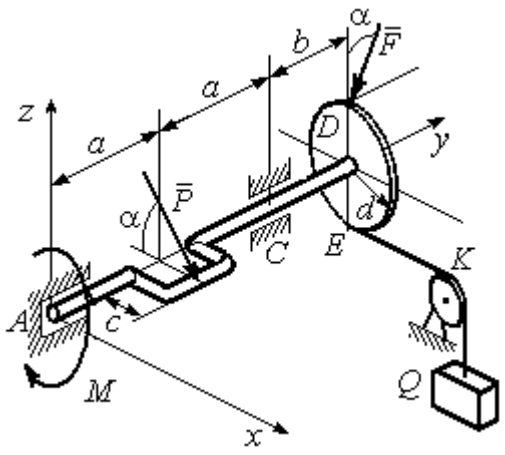
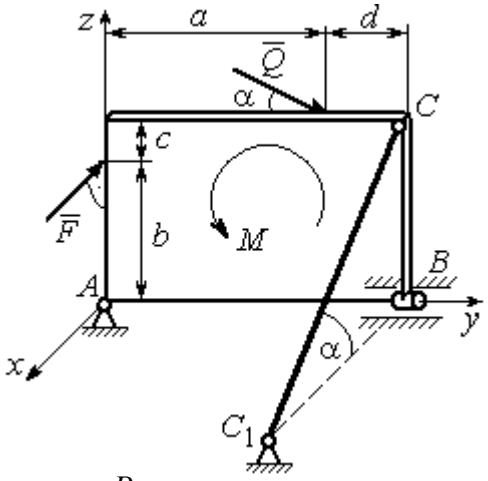
| **Варианты № 1, 11, 21** | **Варианты № 2, 12, 22** |
|---|---|
|  |  |
| Сила $\vec{F}$ параллельна оси $Ay$; сила $\vec{P}$ параллельна оси $Ax$; нить, удерживающая груз, сходит со шкива вертикально. Найти реакции подпятника и подшипника в точках $A$ и $B$ и величину уравновешивающего груза $Q$ | Сила $\vec{F}$ параллельна оси $Ay$; сила $\vec{P}$ лежит в плоскости, параллельной $zAy$; отрезок нити $BC$ параллелен оси $Ax$; рукоять вала $EK$ параллельна оси $Ax$. Найти реакции подпятника и подшипника в точках $A$ и $D$ и величину уравновешивающего момента $M$ |

Рис. 1.11. Задание С2. Равновесие пространственной системы сил.
Номера вариантов задания 1 – 2, 11 – 12, 21 – 22

| **Варианты № 3, 13, 23** | **Варианты № 4, 14, 24** |
|---|---|
|  |  |
| Сила $\vec{F}$ , лежит в плоскости $zAy$; сила $\vec{P}$ лежит в плоскости, параллельной $zAx$, отрезок нити $EK$ параллелен оси $Ax$.<br>Найти реакции подпятника и подшипника в точках $A$ и $C$, а также величину уравновешивающего груза $Q$ | Плита весом $P$ расположена в плоскости $zAy$; пара сил с моментом $M$ действует в плоскости плиты; стержень $CC_1$ расположен в плоскости, параллельной $zAx$; сила $\vec{Q}$ действует в плоскости плиты; сила $\vec{F}$ перпендикулярна плоскости плиты.<br>Найти реакции сферического и цилиндрического шарниров в точках $A$ и $B$ и реакцию стержня $CC_1$ |

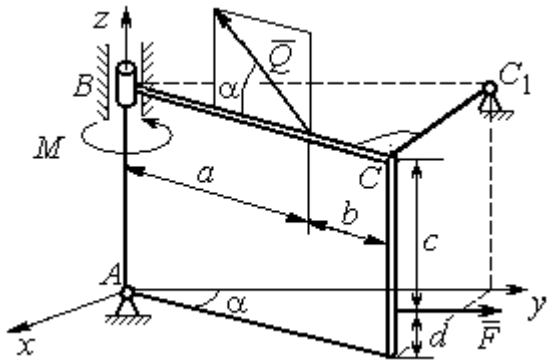
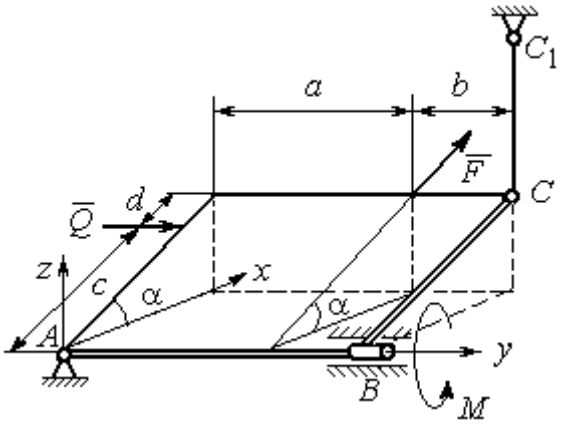
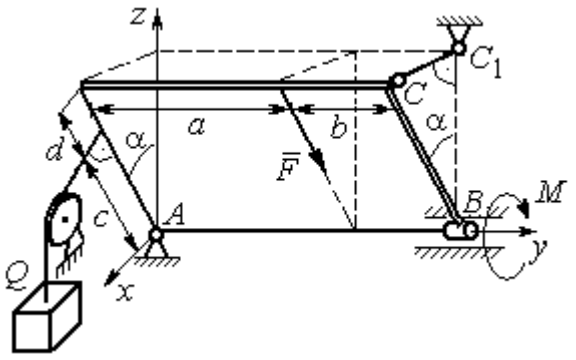
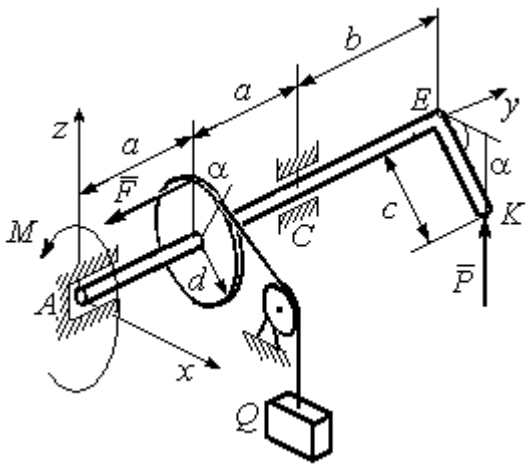
| **Варианты № 5, 15, 25** | **Варианты № 6, 16, 26** |
|---|---|
|  |  |
| Плита весом $P$ отклонена на угол α от вертикальной плоскости $zAy$; сила $\vec{Q}$ лежит в плоскости плиты; сила $\vec{F}$ параллельна оси $Ay$; стержень $CC_1$ перпендикулярен плоскости плиты.<br>Найти реакции сферического и цилиндрического шарниров в точках $A$ и $B$ и реакцию стержня $CC_1$ | Плита весом $P$ отклонена на угол α от горизонтальной плоскости $xAy$; сила $\vec{Q}$ перпендикулярна боковой стенке плиты и параллельна оси $Ay$; сила $\vec{F}$ расположена в плоскости плиты и параллельна её боковым стенкам; стержень $CC_1$ параллелен оси $Az$.<br>Найти реакции сферического и цилиндрического шарниров в точках $A$ и $B$ и реакцию стержня $CC_1$ |

Рис. 1.12. Задание С2. Равновесие пространственной системы сил.
Номера вариантов задания 3 – 6, 13 – 16, 23 – 26

| Варианты № 7, 17, 27 | Варианты № 8, 18, 28 |
|---|---|
|  |  |
| Плита весом *P* отклонена на угол α от вертикальной плоскости z*Ay*; нить, удерживающая груз *Q*, находится плоскости z*Ax*, прикреплена к боковой стенке плиты и перпендикулярна ей; сила $\vec{F}$ параллельна боковым стенкам плиты; стержень $CC_1$ перпендикулярен плоскости z*Ay*.<br>Найти реакции сферического и цилиндрического шарниров в точках *A* и *B* и реакцию стержня $CC_1$ | Рукоять *EK* перпендикулярна оси вала и наклонена под углом α к горизонтальной плоскости *xAy*; сила $\vec{P}$ параллельна оси *Az*; сила $\vec{F}$ параллельна оси Ay; нить, удерживающая груз *Q*, сходит со шкива по касательной.<br>Найти реакции подпятника *A*, подшипника *C*, и величину уравновешивающего груза *Q* |

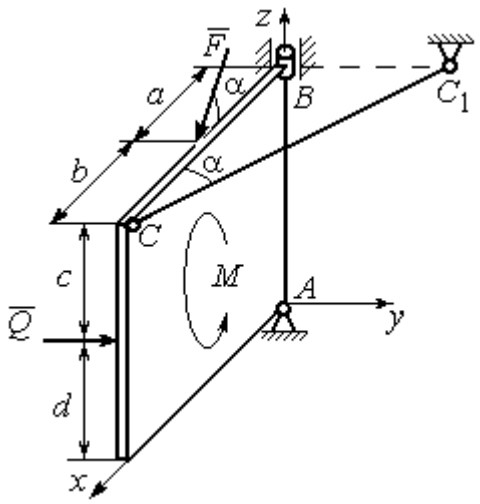
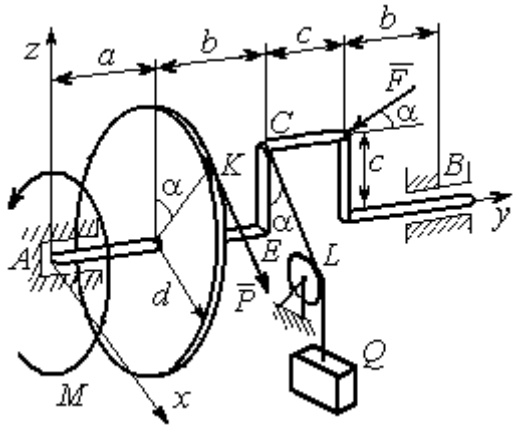
| Варианты № 9, 19, 29 | Варианты № 10, 20, 30 |
|---|---|
|  |  |
| Плита весом *P* находится в вертикальной плоскости z*Ax*; стержень $CC_1$ расположен в плоскости, параллельной *xAy*; пара сил с моментом *M* действует в плоскости плиты; сила $\vec{Q}$ перпендикулярна плоскости плиты; сила $\vec{F}$ лежит в плоскости плиты.<br>Найти реакции сферического и цилиндрического шарниров в точках *A* и *B* и реакцию стержня $CC_1$ | Сила $\vec{F}$ находится в плоскости z*Ay*; стойка *CE* находится в плоскости z*Ay*; отрезок *CL* нити, удерживающей груз, находится в плоскости параллельной *xAz*; сила $\vec{P}$ находится в плоскости шкива и направлена по касательной к ободу в точке *K*.<br>Найти реакции подпятника *A*, подшипника *B* и величину уравновешивающего момента *M* |

Рис. 1.13. Задание С2. Равновесие пространственной системы сил.
Номера вариантов задания 7 – 10, 17 – 20, 27 – 30

Таблица 1.2

**Исходные данные для задания С2.**

## Равновесие пространственной системы сил

| Номер варианта задания | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *P*, кН | 5 | 4 | 6 | 10 | 16 | 15 | 12 | 10 | 15 | 14 |
| *F*, кН | 8 | 6 | 12 | 6 | 10 | 10 | 8 | 12 | 12 | 10 |
| *Q*, кН | – | 12 | – | 12 | 8 | 12 | 10 | – | 10 | 12 |
| *M*, кН·м | 12 | – | 10 | 8 | 12 | 6 | 8 | 6 | 8 | – |
| α, град | 60 | 30 | 30 | 30 | 60 | 60 | 60 | 30 | 30 | 60 |
| *a*, м | 1,2 | 0,8 | 1,4 | 0,6 | 1,2 | 0,9 | 1,4 | 0,4 | 0,8 | 0,8 |
| *b*, м | 1,0 | 0,6 | 1,1 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,6 | 1,2 | 0,2 | 0,6 |
| *c*, м | 0,8 | 0,5 | 0,8 | 0,3 | 1,4 | 0,8 | 1,2 | 0,8 | 0,4 | 0,4 |
| *d*, м | 0,4 | 0,4 | 0,6 | 0,2 | 0,4 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |

| Номер варианта задания | **11** | **12** | **13** | **14** | **15** | **16** | **17** | **18** | **19** | **20** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *P*, кН | 8 | 10 | 10 | 15 | 14 | 10 | 16 | 9 | 10 | 12 |
| *F*, кН | 6 | 12 | 16 | 8 | 12 | 14 | 10 | 15 | 8 | 10 |
| *Q*, кН | – | 14 | – | 10 | 10 | 12 | 14 | – | 12 | 14 |
| *M*, кН·м | 10 | – | 12 | 12 | 12 | 8 | 10 | 10 | 10 | – |
| α, град | 30 | 60 | 60 | 60 | 30 | 30 | 30 | 60 | 60 | 30 |
| *a*, м | 0,8 | 1,3 | 0,9 | 0,5 | 1,3 | 1,2 | 1,6 | 0,6 | 0,9 | 1,2 |
| *b*, м | 0,6 | 1,1 | 0,6 | 0,4 | 0,9 | 0,6 | 0,8 | 1,2 | 0,3 | 0,8 |
| *c*, м | 0,4 | 0,8 | 0,5 | 0,2 | 1,5 | 0,9 | 1,2 | 0,4 | 0,6 | 0,6 |
| *d*, м | 0,2 | 0,4 | 0,4 | 0,1 | 0,5 | 0,4 | 0,6 | 0,2 | 0,2 | 0,8 |

| Номер варианта задания | **21** | **22** | **23** | **24** | **25** | **26** | **27** | **28** | **29** | **30** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *P*, кН | 10 | 12 | 5 | 8 | 10 | 14 | 18 | 12 | 14 | 10 |
| *F*, кН | 12 | 8 | 15 | 10 | 12 | 8 | 10 | 15 | 9 | 8 |
| *Q*, кН | – | 10 | – | 12 | 14 | 10 | 16 | – | 12 | 6 |
| *M*, кН·м | 12 | – | 16 | 14 | 8 | 10 | 8 | 12 | 10 | – |
| α, град | 90 | 30 | 60 | 30 | 45 | 30 | 30 | 60 | 60 | 30 |
| *a*, м | 0,6 | 0,8 | 1,1 | 1,2 | 1,5 | 0,8 | 1,0 | 0,8 | 1,2 | 0,9 |
| *b*, м | 0,8 | 0,6 | 0,9 | 1,0 | 0,9 | 0,6 | 0,8 | 1,4 | 0,6 | 0,4 |
| *c*, м | 0,4 | 1,2 | 0,8 | 0,6 | 1,5 | 0,9 | 1,1 | 0,5 | 0,8 | 0,6 |
| *d*, м | 0,4 | 1,5 | 0,5 | 0,2 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,6 | 0,5 |

## Примеры решения задания С2. Равновесие пространственной системы сил

**Задача 1**. Горизонтальный вал (рис. 1.14) закреплен в подпятнике *C* и подшипнике *K*. Вал имеет шкив I радиуса *R* и шкив II радиуса *r*, перпендикулярные оси вала. Рукоять *AE* параллельна оси *Cx*. Нить, удерживающая груз *Q*, сходит со шкива I по касательной вертикально вниз. На вал действуют силы $\vec{F}$, $\vec{P}$ и пара сил с моментом *M*, закручивающая вал вокруг оси *Cy*. Сила $\vec{F}$ находится в плоскости, параллельной *zCy*, и составляет угол 60° с направлением оси *Cy*. Сила $\vec{P}$ приложена в точке *B* шкива II, определяемой центральным углом 30º, и направлена по касательной. Определить величину уравновешивающего момента *M* и реакции подшипника и подпятника, если *P* = 4 кН, *F* = 2 кН, *Q* = 3 кН, *R* = 0,6 м, *r* = 0,3 м, *a* = 0,8 м, *b* = 0,4 м.

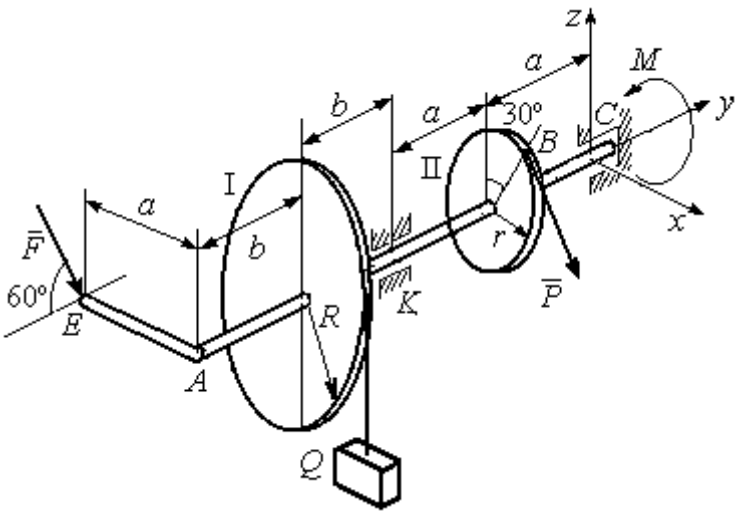


Рис. 1.14. Схема вала и его нагрузка

*Решение*

Рассмотрим равновесие вала. На вал действуют внешние силы $\vec{F}$, $\vec{P}$, пара сил с моментом *M* и реакции связей. Связями являются нить, натянутая грузом *Q*, подпятник *C* и подшипник *K*. Освобождаем вал от связей, заменяя их действие реакциями. Реакцию подпятника *C* раскладываем на три составляющие: $\vec{X}_C$, $\vec{Y}_C$, $\vec{Z}_C$, направленные

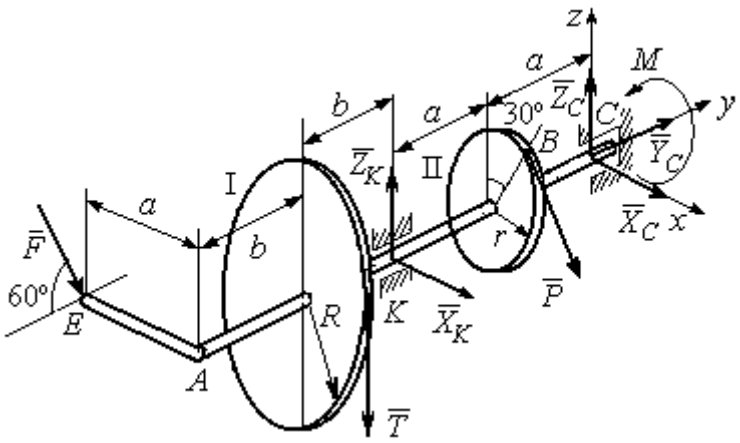


Рис. 1.15. Внешние силы и реакции связей вала

вдоль координатных осей. Реакция подшипника *K* лежит в плоскости, перпендикулярной оси вала, и ее составляющими будут вектора $\vec{X}_K, \vec{Z}_K$, направленные вдоль координатных осей *x*, *z*. Реакция нити $\vec{T}$ направлена вдоль нити от точки *K* и по модулю равна весу груза. Действие на вал внешних сил и реакций связи показано на рис. 1.15.

Внешние силы, действующие на вал, и реакции связей составляют произвольную пространственную систему сил, эквивалентную нулю ($\vec{P}$, $\vec{F}$, $\vec{X}_K, \vec{Z}_K, \vec{T}$, $\vec{X}_C$, $\vec{Y}_C, \vec{Z}_C, M$) $\infty$ 0, для которой уравнения равновесия:

$$\sum F_{kx} = 0,\ \sum F_{ky} = 0,\ \sum F_{kz} = 0,$$

$$\sum M_x(\vec{F}_k) = 0,\ \sum M_y(\vec{F}_k) = 0,\ \sum M_z(\vec{F}_k) = 0.$$

Для удобства при составлении уравнений равновесия изобразим вал вместе с действующими на него силами в проекциях на координатные плоскости (рис. 1.16)

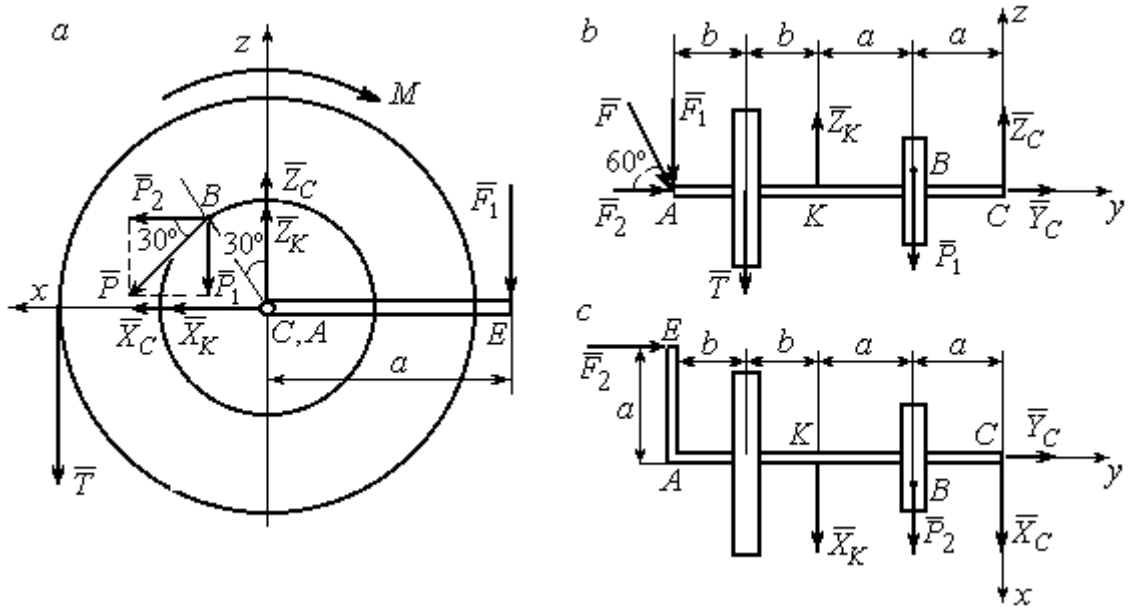



Рис. 1.16. Вал и действующие на него силы в проекциях на координатные плоскости:
*a* – вид вала в проекции на плоскость *zCx* с положительного конца оси *y*;
*b* – вид вала в проекции на плоскость *zCy* с положительного конца оси *x*;
*c* – вид вала в проекции на плоскость *xCy* с положительного конца оси *z*.

На рис. 1.16, *а* показаны проекции всех сил на плоскость *zCx*. Вычисляя моменты проекций этих сил относительно точки *C*, получим значения моментов исходных сил относительно оси *y*.

Для вычисления моментов сил относительно оси *x* достаточно найти моменты проекций сил на плоскость *zCy* относительно точки *C* (см. рис. 1.16, *b*), а вычисляя моменты проекций сил на плоскость *xCy* относительно точки *C*, получим значения моментов сил относительно оси $z$.

Составляем уравнения равновесия:

$$\sum F_{kx} = P_2 + X_K + X_C = 0,\ \sum F_{ky} = F_2 + Y_C = 0,$$

$$\sum F_{kz} = -P_1 + Z_K - T + Z_C - F_1 = 0,$$

$$\sum M_x(\vec{F}_k) = P_1 a - Z_K 2a - T(2a + b) + F_1(2a + 2b) = 0,$$

$$\sum M_y(\vec{F}_k) = -F_1 a + TR + Pr - M = 0,$$

$$\sum M_z(\vec{F}_k) = P_2 a + X_K 2a - F_2 a = 0.$$

Подставляя исходные данные задачи, с учётом того, что

$$P_1 = P\cos 60^\circ = 0{,}5P,\ P_2 = P\cos 30^\circ = 0{,}87P,$$

$$F_1 = F\cos 30^\circ = 0{,}87F,\ F_2 = F\cos 60^\circ = 0{,}5F$$ (см. рис. 1.16 *a*, *b*),

получим систему уравнений:

$$0{,}87 \cdot 4 + X_K + X_C = 0,\ \ 2 \cdot 0{,}5 + Y_C = 0,\ -4 \cdot 0{,}5 + Z_K - 3 + Z_C - 2 \cdot 0{,}87 = 0,$$

$$0{,}5 \cdot 4 \cdot 0{,}8 - 1{,}6Z_K - 3 \cdot 0{,}87(2 \cdot 0{,}8 + 0{,}4) + 2 \cdot 0{,}87(2 \cdot 0{,}8 + 2 \cdot 0{,}4) = 0,$$

$$-0{,}87 \cdot 0{,}8 + 3 \cdot 0{,}6 + 4 \cdot 0{,}3 - M = 0,\ 0{,}87 \cdot 4 \cdot 0{,}8 + 1{,}6 \cdot X_K - 2 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}8 = 0.$$

Решая систему, найдём: $X_C = -2{,}24$ кН, $Y_C = -1$ кН, $Z_C = 6{,}39$ кН, $X_K = -1{,}24$ кН, $Z_K = 0{,}35$ кН, $M = 2{,}3$ кН·м.

Окончательно, реакция подпятника $R_C = \sqrt{X_C^2 + Y_C^2 + Z_C^2} = 6{,}84$ кН,

реакция подшипника $R_K = \sqrt{X_K^2 + Z_K^2} = 1{,}29$ кН.

**Задача 2**. Плита весом *P* расположена в вертикальной плоскости z*Ay*. В точке А плита закреплена пространственным шарниром, а в точке *B* на оси *y* опирается на цилиндрический шарнир (подшипник). Плита удерживается в равновесии при помощи невесомого стержня $CC_1$, прикреплённого шарниром к плите в её верхнем углу, в точке *C* перпендикулярно плоскости плиты (рис. 1.17).

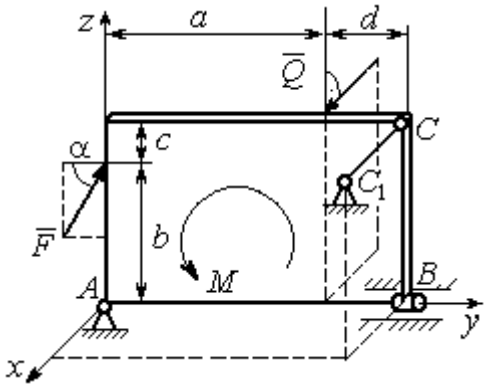


Рис. 1.17. Равновесие плиты

На плиту действует сила $\vec{Q}$, приложенная на краю плиты перпендикулярно её плоскости, и сила $\vec{F}$, лежащая в плоскости плиты и направленная под углом $\alpha$ к горизонту (см. рис. 1.17). Кроме того, в плоскости плиты на неё действует пара сил с моментом *M*. Найти реакции шарниров *A* и *B* и усилие в стержневой подпорке $CC_1$ при равновесии плиты, если параметры нагрузки: *P* = 1 кН, *Q* = 500 Н, *F* = 400 Н, *M* = 300 Н·м, $\alpha = 35^\circ$, *a* = 2 м, *b* = 1,5 м, *c* = 0,2 м, *d* = 0,4 м.

*Решение*

Заменим связи плиты их реакциями. Реакция шарнира *A* раскладывается на три составляющие: $\vec{X}_A$ $\vec{Y}_A$, $\vec{Z}_A$ по направлениям координатных осей. Направления координатных осей показаны на рис. 1.17. Реакция подшипника *B* лежит в плоскости, перпендикулярной оси подшипника, и ее составляющими будут вектора $\vec{X}_B, \vec{Z}_B$, направленные вдоль координатных осей *x*, *z*. Реакция стержня $\vec{T}$ направлена вдоль стержня. Действие сил и реакций показано на рис.1.18.

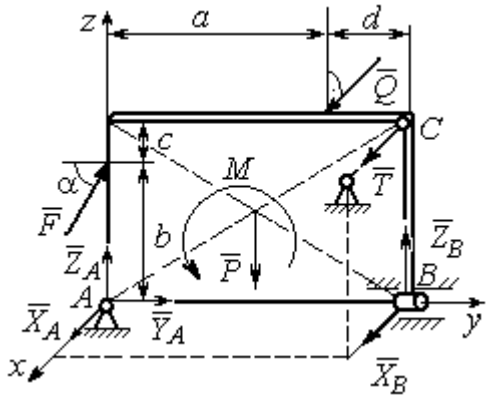


Рис. 1.18. Действие сил и реакций при равновесии плиты

Пространственная система сил, действующих на плиту, является уравновешенной: $(\vec{P}, \vec{F}, \vec{X}_B, \vec{Z}_B, \vec{T}, \vec{X}_A, \vec{Y}_A, \vec{Z}_A, M) \infty 0$. Уравнения равновесия:

$$\sum F_{kx} = 0\,,\ \sum F_{ky} = 0\,,\ \sum F_{kz} = 0\,,$$

$$\sum M_x(\vec{F}_k)=0,\ \sum M_y(\vec{F}_k)=0,\ \sum M_z(\vec{F}_k)=0.$$

В вычислениях моментов сил относительно осей будем считать момент положительным, если при взгляде со стороны положительного направления оси, сила вращает тело (плиту) против хода часовой стрелки. Получим:

$$\sum F_{kx}=0,\ X_A+Q+X_B+T=0,$$

$$\sum F_{ky}=0,\ Y_A+F\cos\alpha=0,$$

$$\sum F_{kz}=0,\ Z_A+F\sin\alpha-P+Z_B=0$$

$$\sum M_x(\vec{F}_k)=0,\ -F\cos\alpha\cdot b-P\cdot 0{,}5(a+d)+Z_B(a+d)+M=0,$$

$$\sum M_y(\vec{F}_k)=0,\ Q\cdot(b+c)+T\cdot(b+c)=0,$$

$$\sum M_z(\vec{F}_k)=0,\ -Q\cdot a-T\cdot(a+d)-X_B\cdot(a+d)=0.$$

Подставив исходные данные задачи, получим систему уравнений:

$$X_A+500+X_B+T=0,\ \ Y_A+400\cdot 0{,}82=0,\ Z_A+400\cdot 0{,}57-1000+Z_B=0,$$

$$-400\cdot 0{,}82\cdot 1{,}5-1000\cdot 0{,}5\cdot 2{,}4+Z_B\cdot 2{,}4+300=0,$$

$$500\cdot 1{,}7+T\cdot 1{,}7=0,\quad -500\cdot 2-T\cdot 2{,}4-X_B\cdot 2{,}4=0,$$

откуда находим значения составляющих реакций:

$$T=-500\text{ Н},\ X_B=83{,}33\text{ Н},\ Z_B=580\text{ Н},$$

$$X_A=-83{,}33\text{ Н},\ Y_A=-328\text{ Н},\ Z_A=192\text{ Н}.$$

Полные реакции пространственного шарнира $A$:

$$R_A=\sqrt{X_A^2+Y_A^2+Z_A^2}=389{,}09\text{ Н},$$

цилиндрического шарнира $B$: $R_B=\sqrt{X_B^2+Z_B^2}=585{,}95$ Н.

# 2. КИНЕМАТИКА ТОЧКИ И ТВЕРДОГО ТЕЛА

**Кинематикой** называется раздел механики, в котором изучаются свойства движения материальных тел без учета их масс и действующих на них сил.

## 2.1. Кинематика точки. Основные параметры движения точки

Кривая, которую описывает движущаяся точка, называется **траекторией** точки. Движение точки может быть задано **векторным**, **координатным** или **естественным** способами.

**Векторный способ** основан на определении положения точки ее радиусом-вектором в виде векторного уравнения $\vec{r} = \vec{r}(t)$. При **координатном способе** задания движения точки положение точки определяется ее координатами, заданными для каждого момента времени: $x = x(t)$, $y = y(t)$, $z = z(t)$. **Естественный способ** задания движения используется, если заранее известна траектория движения точки. Тогда положение точки однозначно определяется длиной дуги $\breve{OM} = S(t)$, отсчитываемой от некоторой фиксированной точки $O$, принятой за начало отсчета.

**Мгновенная скорость,** или скорость точки в данный момент времени, является векторной величиной и определяется как производная по времени от радиуса-вектора точки: $\vec{V} = \dot{\vec{r}}$. Вектор скорости точки $\vec{V}$ всегда направлен по касательной к траектории в сторону движения точки.

При координатном способе задания движения величины проекций вектора скорости $\vec{V}$ на координатные оси определяются как производные по времени от соответствующих координат: $V_x = \dot{x}$, $V_y = \dot{y}$, $V_z = \dot{z}$. Модуль вектора скорости: $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$. При естественном способе задания движения вектор скорости точки определяется равенством: $\vec{V} = \dot{S}\vec{\tau}$, где $S = S(t)$ – закон изменения длины дуги, $\vec{\tau}$ –единичный вектор касательной к траектории движения, направленный в сторону возрастающих расстояний.

Величина $V = |\dot{S}|$ называется алгебраической скоростью точки. При $\dot{S} > 0$ вектор скорости $\vec{V}$ направлен по единичному вектору $\vec{\tau}$ – в сторону возрастающих расстояний. При $\dot{S} < 0$ он имеет направление, противоположное единичному вектору $\vec{\tau}$, т. е. в сторону убывающих расстояний.

**Мгновенное ускорение,** или ускорение точки в данный момент времени, является векторной величиной и определяется как производная по времени от вектора скорости точки или как вторая производная от радиус-вектора точки: $\vec{a} = \dot{\vec{V}} = \ddot{\vec{r}}$. При координатном способе проекции вектора ускорения $\vec{a}$ на координатные оси – величины $a_x$, $a_y$, $a_z$ – определяются равенствами: $a_x = \dot{V}_x = \ddot{x}$, $a_y = \dot{V}_y = \ddot{y}$, $a_z = \dot{V}_z = \ddot{z}$. Модуль вектора ускорения равен: $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$.

При естественном способе задания движения вектор ускорения точки $\vec{a}$ раскладывается на две взаимно перпендикулярные составляющие $\vec{a}_n$ и $\vec{a}_\tau$, параллельные осям $n$ и $\tau$ естественной системы координат, и представляется в виде равенства $\vec{a} = a_\tau \vec{\tau} + a_n \vec{n}$, или $\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n$, где $\vec{\tau}$ – единичный направляющий вектор оси, касательной к траектории (касательная ось); $\vec{n}$ – единичный направляющий вектор главной нормали траектории. Величина $a_n$ называется **нормальным ускорением** точки и вычисляется по формуле: $a_n = \dfrac{V^2}{\rho}$, где $\rho$ – радиус кривизны траектории. (У окружности радиус кривизны равен её радиусу, у прямой линии – бесконечности.) Вектор $\vec{a}_n$ нормальной составляющей ускорения всегда направлен к центру кривизны траектории. При движении по окружности радиус кривизны траектории равен радиусу окружности, а центр кривизны траектории совпадает с центром окружности. Величина $a_\tau$ называется **касательным ускорением** и равна модулю второй производной от заданного закона изменения длины дуги: $a_\tau = |\ddot{S}|$, где $S = S(t)$ – закон изменения длины дуги. Направление вектора касательного ускорения $\vec{a}_\tau$ зависит от знака второй производной $\ddot{S}$. При $\ddot{S} > 0$

вектор $\vec{a}_\tau$ в направлен в сторону возрастающих расстояний, по направлению единичного вектора $\vec{\tau}$, при $\ddot{S} < 0$ – в сторону убывающих расстояний (противоположно единичному вектору $\vec{\tau}$). Вектор полного ускорения $\vec{a}$ направлен по диагонали прямоугольника, построенного на векторах $\vec{a}_n$ и $\vec{a}_\tau$. Модуль вектора ускорения: $a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}$ .

## 2.2. Вращение тела вокруг неподвижной оси

Движение тела, при котором все точки некоторой его прямой остаются неподвижными, называется **вращательным**, а указанная прямая называется осью вращения. Вращение тела задается углом поворота $\varphi = \varphi(t)$ подвижной плоскости, связанной с телом, относительно некоторого ее начального положения. Направление вращения с возрастанием угла поворота считается положительным.

Величина **угловой скорости** вращения тела равна модулю производной от угла поворота тела по времени: $\omega = |\dot{\varphi}|$. Направление угловой скорости вращения тела зависит от знака производной $\dot{\varphi}$. При $\dot{\varphi} > 0$ вращение происходит в положительном направлении, в сторону возрастания угла поворота, при $\dot{\varphi} < 0$ – в отрицательном. Направление угловой скорости обычно показывают дуговой стрелкой вокруг оси вращения. Вектор угловой скорости $\vec{\omega}$ направлен вдоль оси вращения в сторону, откуда вращение тела видно против хода часовой стрелки.

Величина **углового ускорения** при вращении тела равна модулю второй производной от угла поворота тела по времени: $\varepsilon = |\ddot{\varphi}|$. Если $\ddot{\varphi}$ одного знака с $\dot{\varphi}$, то угловое ускорение ускоряет вращение тела, если разных знаков, то угловое ускорение замедляет вращение.

При вращательном движении тела все его точки движутся по окружностям, радиусы которых равны расстояниям от выбранной точки до неподвижной оси. **Скорость точки вращающегося твердого тела (**в отличие от угловой скорости тела) называют **линейной,** или **окружной скоростью** точки. Величина скорости рассчитывается по формуле: $V = \omega h$, где $\omega$ – величина угловой скорости тела; $h$

– расстояние от точки до оси вращения. Вектор скорости точки лежит в плоскости описываемой точкой окружности и направлен по касательной к ней в сторону вращения тела. Отношение скоростей двух точек вращающегося тела равно отношению расстояний от этих точек до оси: $\frac{V_{M1}}{V_{M2}} = \frac{h_1}{h_2}$.

**Ускорение точки вращающегося твердого тела** рассчитывается как ускорение точки при естественном способе задания движения в виде суммы векторов касательного и нормального ускорений: $\vec{a}_M = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n$. Величины касательного, нормального и полного ускорений точки вращающегося тела, соответственно: $a_\tau = \varepsilon h$, $a_n = \omega^2 h$, $a_M = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}$, где $\omega$, $\varepsilon$ – угловая скорость и угловое ускорение тела; $h$ – расстояние от точки до оси вращения.

## 2.3. Плоскопараллельное движение твёрдого тела

**Плоскопараллельным, или плоским движением твердого тела**, называется такое движение, при котором все точки тела движутся параллельно некоторой неподвижной плоскости. Плоское движение представляется в виде суммы мгновенного поступательного движения, при котором все точки плоской фигуры движутся со скоростью выбранной точки-полюса, и мгновенного вращательного движения вокруг этого полюса.

**Скорость** любой точки $M$ плоской фигуры равна векторной сумме вектора скорости точки-полюса и вектора скорости точки $M$ при вращении тела вокруг этого полюса: $\vec{V}_M = \vec{V}_A + \vec{V}_{MA}$, где $\vec{V}_M$ – скорость точки $M$; $\vec{V}_A$ – скорость полюса $A$; $\vec{V}_{MA}$ – вектор скорости точки $M$ при вращении тела вокруг полюса $A$, модуль скорости $V_{MA} = \omega \cdot MA$, где $\omega$ – угловая скорость мгновенного вращательного движения тела вокруг полюса; $MA$ – расстояние между полюсом $A$ и точкой $M$.

**Мгновенным центром скоростей** называется такая точка $P$ плоской фигуры, скорость которой в данный момент времени равна нулю. Выбрав в качестве полюса мгновенный центр скоростей, скорость любой точки плоской фигуры

находят так, как если бы мгновенное движение фигуры было вращательным вокруг мгновенного центра скоростей.

### Способы построения мгновенного центра скоростей

1. Если известны направления скоростей $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_B$ каких-нибудь двух точек *A* и *B* плоской фигуры, то мгновенный центр скоростей находится в точке пересечения перпендикуляров, восстановленных из этих точек к векторам скоростей (рис. 2.1, *a*).

2. Если скорости $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_B$ двух точек *A* и *B* плоской фигуры известны и параллельны друг другу, а линия *AB* перпендикулярна $\vec{V}_A$ (и, конечно, $\vec{V}_B$), то мгновенный центр скоростей определяется как точка пересечения линий, проведенных через основания и вершины векторов скоростей (построение показано на рис. 2.1, *b*, *c*).

3. Если скорости $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_B$ двух точек *A* и *B* параллельны друг другу, но линия *AB*, соединяющая эти точки, не перпендикулярна векторам скоростей (рис. 2.1, *d*), то мгновенная угловая скорость тела равна нулю и движение тела в данный момент времени является мгновенным поступательным. В этом случае скорости всех точек равны по величине и направлению.

4. Если плоскопараллельное движение осуществляется путем качения без скольжения одного тела по неподвижной поверхности другого, то мгновенный

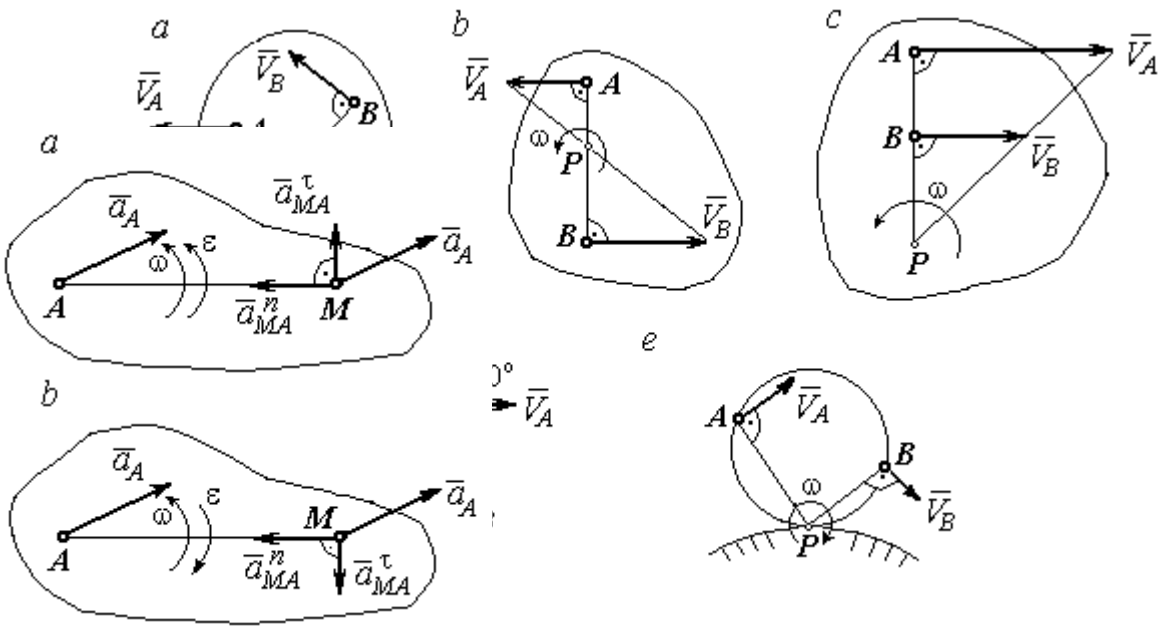



Рис. 2.1. Способы построения мгновенного центра скоростей

Рис. 2.2. Ускорение точки плоской фигуры:
*a* – ускоренное движение;
*b* – замедленное движение

центр скоростей расположен в точке касания катящегося тела с неподвижной поверхностью (рис. 2.1, *e*).

**Ускорение любой точки *M* плоской фигуры** при плоскопараллельном движении твердого тела представляется как сумма векторов – ускорения полюса и ускорения точки *M* при вращении фигуры вокруг полюса. Учитывая, что ускорение точки вращающегося тела представляется как сумма нормального и касательного ускорений, получим:

$$\vec{a}_M = \vec{a}_A + \vec{a}^{\tau}_{MA} + \vec{a}^{n}_{MA},$$

где $\vec{a}_A$ – ускорение полюса *A*; $\vec{a}^{\tau}_{MA}$, $\vec{a}^{n}_{MA}$ – касательная и нормальная составляющие ускорения точки *M* при вращении фигуры вокруг полюса *A*.

Вектор нормального ускорения $\vec{a}^{n}_{MA}$ всегда направлен от точки *M* к полюсу *A*. Вектор касательного ускорения $\vec{a}^{\tau}_{MA}$ направлен перпендикулярно отрезку *AM* в сторону вращения, если оно ускоренное (рис. 2.2, *a*), и против вращения, если оно

замедленное (рис. 2.2, *b*). Численно величины касательного и нормального составляющих ускорения точки *M* определяются по формулам:

$$a^{\tau}_{MA} = \varepsilon \cdot AM\ ,\ \ a^{n}_{MA} = \omega^2 \cdot AM\ ,$$

где $\omega$, $\varepsilon$ – угловая скорость и угловое ускорение тела (плоской фигуры); $AM$ – расстояние от точки *M* до полюса *A* (см. рис. 2.2).

Если при движении плоской фигуры известны траектории движения полюса *A* и точки *M*, то для определения ускорения точки *M* используется векторное равенство

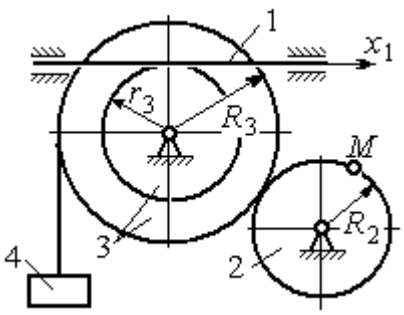
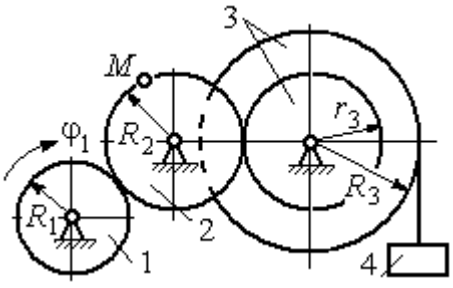
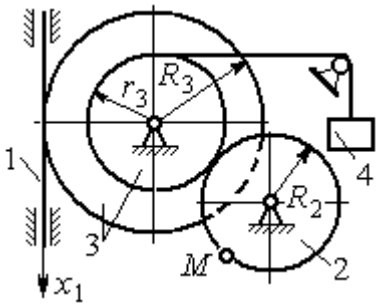
$$\vec{a}^{\tau}_{M} + \vec{a}^{n}_{M} = \vec{a}^{\tau}_{A} + \vec{a}^{n}_{A} + \vec{a}^{\tau}_{MA} + \vec{a}^{n}_{MA},$$

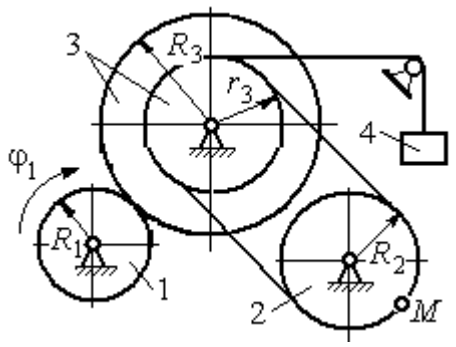
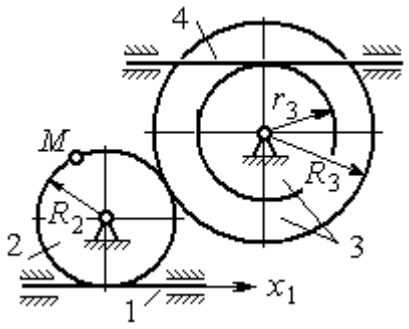
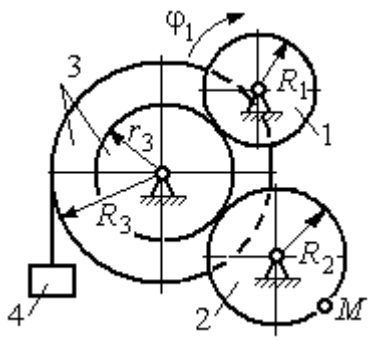
где $\vec{a}^{\tau}_{M}$, $\vec{a}^{n}_{M}$, $\vec{a}^{\tau}_{A}$, $\vec{a}^{n}_{A}$ – касательная и нормальная составляющие ускорения точки *M* и полюса *A* при движении их по заданным траекториям.

## 2.4. Задание К1. Определение скоростей и ускорений точек твердого тела при поступательном и вращательном движениях

По заданному движению одного из звеньев механизма $x_1 = x_1(t)$ (варианты 1, 3, 5, 7, 9) или $\varphi_1 = \varphi_1(t)$ (варианты 2, 4, 6, 8, 10) найти в момент времени $t_1$ скорость, касательное, нормальное и полное ускорения точки *M* звена механизма, совершающего вращательное движение, а также скорость и ускорение звена 4, совершающего поступательное движение.

Варианты заданий даны на рис. 2.3, 2.4. Исходные данные представлены в табл. 2.1.

| **Варианты № 1, 11, 21** | **Варианты № 2, 12, 22** | **Варианты № 3, 13, 23** |
|---|---|---|
|  |  |  |

| Варианты № 4, 14, 24 | Варианты № 5, 15, 25 | Варианты № 6, 16, 26 |
|---|---|---|
|  |  |  |

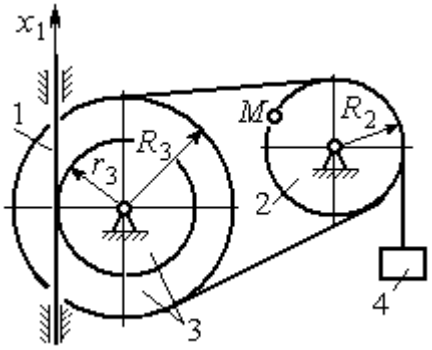
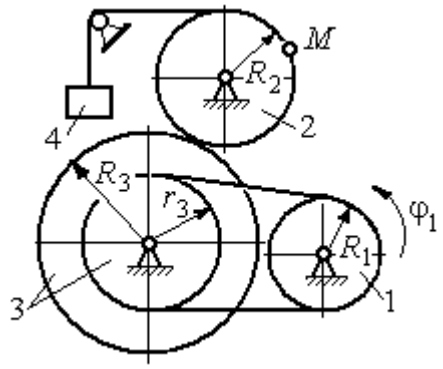
| Варианты № 7, 17, 27 | Варианты № 8, 18, 28 |
|---|---|
|  |  |

Рис. 2.3. Задание К1. Определение скоростей и ускорений точек при поступательном и вращательном движениях твёрдого тела. Номера вариантов задания 1 – 8, 11 – 18, 21 – 28

*Окончание вариантов задания К1*

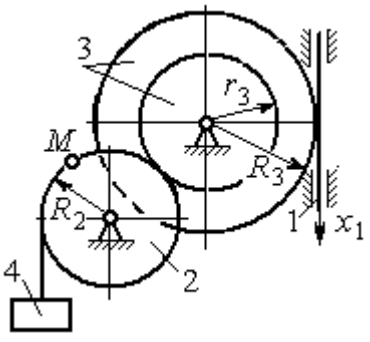
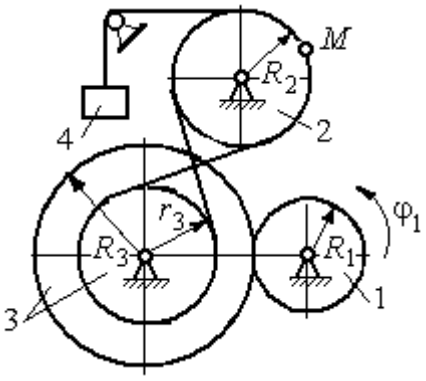
| Варианты № 9, 19, 29 | Варианты № 10, 20, 30 |
|---|---|
|  |  |

Рис. 2.4. Задание К1. Определение скоростей и ускорений точек при поступательном и вращательном движениях твёрдого тела. Номера вариантов задания 9 – 10, 19 – 20, 29 – 30

Таблица 2.1

**Исходные данные вариантов задания К1. Определение скоростей и ускорений точек при поступательном и вращательном движениях твёрдого тела**

| Номер варианта задания | $R_1$,см | $R_2$, см | $R_3$, см | $r_3$, см | $x_1(t)$, см<br>$\varphi_1(t)$, рад | $t_1$, с |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | – | 40 | 45 | 35 | $x_1(t) = (3t-1)^2$ | 2 |
| **2** | 10 | 20 | 38 | 18 | $\varphi_1(t) = t^2 + 6\cos(\pi t/6)$ | 3 |
| **3** | – | 30 | 42 | 18 | $x_1(t) = 5t^2 - 2\cos(\pi t/2)$ | 1 |
| **4** | 15 | 30 | 45 | 20 | $\varphi_1(t) = 5t^2 + \cos(\pi t/2)$ | 2 |
| **5** | – | 30 | 40 | 20 | $x_1(t) = 6t - \cos(\pi t/3)$ | 3 |
| **6** | 10 | 20 | 30 | 10 | $\varphi_1(t) = t^3 - \cos(\pi t/2)$ | 1 |
| **7** | – | 30 | 40 | 30 | $x_1(t) = 2\sin(\pi t/2) + \cos(\pi t/2)$ | 2 |
| **8** | 8 | 10 | 30 | 25 | $\varphi_1(t) = 5t + \cos(\pi t/2)$ | 2 |
| **9** | – | 18 | 30 | 18 | $x_1(t) = 5t + \cos(\pi t/3)$ | 3 |
| **10** | 15 | 30 | 50 | 20 | $\varphi_1(t) = 2t^2 + \sin(\pi t/4)$ | 2 |
| **11** | – | 30 | 40 | 25 | $x_1(t) = (t^2 - 3t)$ | 2 |
| **12** | 12 | 20 | 40 | 28 | $\varphi_1(t) = 3t^2 + 6\sin(\pi t/6)$ | 3 |
| **13** | – | 25 | 60 | 42 | $x_1(t) = 2t^2 + \cos(\pi t/2)$ | 1 |
| **14** | 10 | 30 | 45 | 30 | $\varphi_1(t) = 3t^2 + 2\cos(\pi t/2)$ | 2 |

*Окончание табл. 2.1*

| Номер варианта задания | $R_1$,см | $R_2$, см | $R_3$, см | $r_3$, см | $x_1(t)$, см<br>$\varphi_1(t)$, рад | $t_1$, с |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **15** | – | 20 | 30 | 20 | $x_1(t)=3t^2-\cos(\pi t/3)$ | 3 |
| **16** | 12 | 18 | 40 | 20 | $\varphi_1(t)=2t^3+\cos(\pi t/2)$ | 1 |
| **17** | – | 20 | 35 | 15 | $x_1(t)=2\sin(\pi t/2)-\cos(\pi t/2)$ | 2 |
| **18** | 15 | 18 | 40 | 25 | $\varphi_1(t)=5t+\cos(\pi t/2)$ | 1 |
| **19** | – | 22 | 50 | 18 | $x_1(t)=t^2+\cos(\pi t/3)$ | 3 |
| **20** | 10 | 20 | 45 | 10 | $\varphi_1(t)=2t^2+\sin(\pi t/4)$ | 4 |
| **21** | – | 20 | 40 | 20 | $x_1(t)=t+(3t-4)^2$ | 2 |
| **22** | 8 | 18 | 42 | 18 | $\varphi_1(t)=2t^2+12\cos(\pi t/6)$ | 3 |
| **23** | – | 45 | 60 | 40 | $x_1(t)=4t^2+\sin(\pi t/2)$ | 1 |
| **24** | 5 | 15 | 30 | 20 | $\varphi_1(t)=2t^2+4\cos(\pi t/2)$ | 2 |
| **25** | – | 15 | 35 | 25 | $x_1(t)=2t^2+\cos(\pi t/3)$ | 3 |
| **26** | 18 | 20 | 35 | 20 | $\varphi_1(t)=2t^3+\sin(\pi t/2)$ | 1 |
| **27** | – | 15 | 35 | 15 | $x_1(t)=2\sin(\pi t/2)-\cos(\pi t/2)$ | 1 |
| **28** | 10 | 12 | 40 | 25 | $\varphi_1(t)=2t^2+\cos(\pi t/2)$ | 1 |
| **29** | – | 35 | 50 | 10 | $x_1(t)=t^3-\cos(\pi t/2)$ | 1 |
| **30** | 10 | 20 | 40 | 10 | $\varphi_1(t)=2t^2+\cos(\pi t/4)$ | 4 |

## Пример выполнения задания К1. Определение скоростей и ускорений точек при поступательном и вращательном движениях твёрдого тела

По заданному уравнению движения звена 1 механизма (рис. 2.5, *а*) определить скорость, нормальное, касательное и полное ускорения точки *M* на момент времени $t_1$, а также скорость и ускорение звена 4, если значения радиусов колес механизма и закон движения звена 1: $R_2 = 20$ см, $r_2 = 5$ см, $R_3 = 8$ см, $r_3 = 4$ см, $x_1 = 2t^2 - 5t$ см, $t_1 = 1$ с.

*Решение*

Отметим на схеме положительные направления отсчета углов поворота дисков 2 и 3, соответствующие заданному положительному направлению движения звена 1.

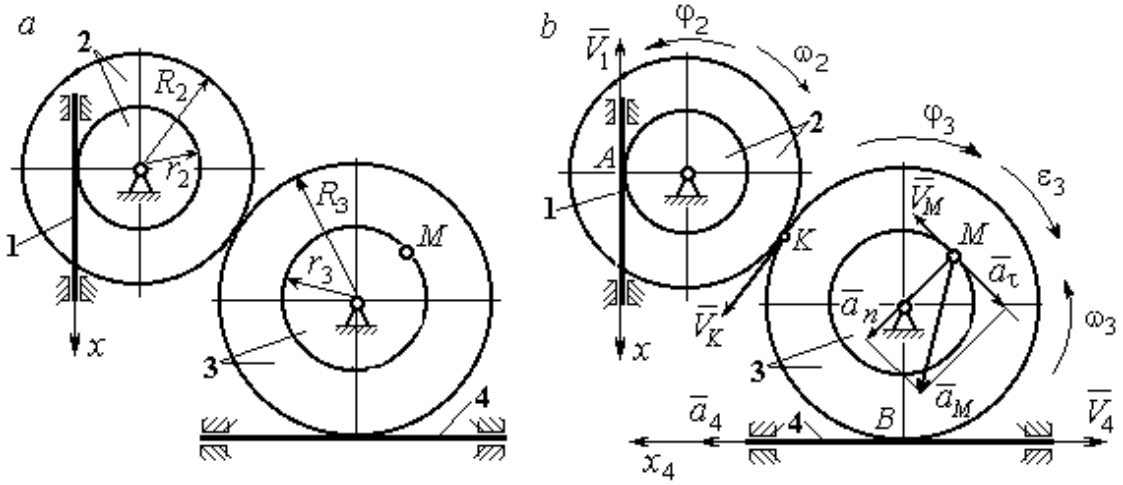



Рис. 2.5. Кинематика вращательного движения твердого тела:
*a* – схема механизма; *b* – расчетная схема для определения скоростей и ускорений точек механизма

Направления показаны на рис 2.5, *b* дуговыми стрелками $\varphi_2$, $\varphi_3$, а положительное направление движения звена 4 – направлением оси $x_4$.

Звено 1 движется поступательно. Движение задано координатным способом в виде закона изменения координаты $x$. Дифференцируем по времени уравнение движения: $\dot{x} = 4t - 5$ см/с. В момент времени $t_1 = 1$ с значение производной: $\dot{x}(1)$ = –1 см/с. Отрицательное значение производной $\dot{x}$ показывает, что в данный момент времени звено 1 движется в отрицательном направлении оси *x*. Скорость звена 1 равна модулю производной: $V_1 = |\dot{x}|$. На рис. 2.5, *b* направление движения звена 1 в момент времени $t_1 = 1$ с показано вектором скорости $\vec{V}_1$, направленным в сторону, противоположную положительному направлению оси *x*. Эту же скорость будет иметь точка *A* – точка контакта звена 1 с диском 2, лежащая на расстоянии $r_2$ от оси вращения диска. Следовательно, $V_1 = V_A = \omega_2 r_2$, где $\omega_2$ – угловая скорость диска 2. Отсюда угловая скорость диска: $\omega_2 = \dfrac{V_A}{r_2} = \dfrac{|4t-5|}{5} = |\dot{\varphi}_2|$ рад/с.

При $t_1 = 1$ с значение производной отрицательно: $\dot{\varphi}_2(1)$ = – 0,2 рад/с. Это означает, что в заданный момент времени вращение диска 2 с угловой скоростью

$\omega_2(1)=|\dot{\varphi}_2(1)|$ = 0,2 рад/с происходит в отрицательном для диска 2 направлении. На рис. 2.5, *b* направление вращения диска 2 показано дуговой стрелкой $\omega_2$ в сторону, противоположную положительному направлению отсчета угла $\varphi_2$. При передаче вращения диска 2 диску 3 величины угловых скоростей дисков обратно пропорциональны радиусам дисков, которым принадлежит точка контакта: $\frac{\omega_2}{\omega_3}=\frac{R_3}{R_2}$. Тогда, угловая скорость диска 3 $\omega_3=\omega_2\frac{R_2}{R_3}=|2t-2{,}5|$ = $|\dot{\varphi}_3|$ рад/с.

В момент времени $t_1=1$с значение производной $\dot{\varphi}_3$ отрицательно: $\dot{\varphi}_3(1)=$ – 0,5 рад/с, и, следовательно, вращение диска 3 в данный момент времени с угловой скоростью $\omega_3(1)$ = $|\dot{\varphi}_3(1)|=0{,}5$ рад/с происходит в сторону, противоположную положительному направлению отсчета угла $\varphi_3$, как показано на рис. 2.5, *b*. Величина (модуль) скорости точки *M* рассчитывается по формуле: $V_M=\omega_3 r_3$. В момент времени $t_1=1$ с модуль скорости $V_M(1)=2$ см/с. Вектор скорости $\vec{V}_M$ расположен по касательной к траектории движения точки *M* (окружности) и направлен в сторону вращения диска 3 (см. рис. 2.5, *b*).

Звено 4 движется поступательно. Скорость звена 4 равна скорости точки касания его с диском 3: $V_4=V_B=\omega_3 R_3$ = $|2t-2{,}5|\cdot 8$ = $|\dot{x}_4|$. В момент времени $t_1=1$ с значение производной от координаты движения звена 4 отрицательно: $\dot{x}_4(1)=-4$ см/с. В результате, вектор скорости $\vec{V}_4(1)$, равный по модулю $V_4(1)$ = 4 см/с, направлен вдоль оси $x_4$ в сторону, противоположную ее положительному направлению (см. рис. 2.5, *b*).

Угловое ускорение диска 3: $\varepsilon_3(t)=|\dot{\omega}_3|=|\ddot{\varphi}_3|$ = 2 рад/с$^2$. Из того, что угловая скорость $\omega_3$ и угловое ускорение $\dot{\omega}_3$ диска 3 имеют разные знаки, следует, что вращение диска 3 замедленное. Угловое ускорение диска направлено в сторону положительного направления отсчета угла поворота $\varphi_3$, диска 3 (см. рис. 2.5, *b*).

Касательное ускорение $a_\tau$ точки *M* рассчитывается по формуле $a_\tau=\varepsilon_3 r_3$ и в момент времени $t_1=1$ с: $a_\tau=8$ см/с$^2$. Так как вращение диска 3 замедленное,

вектор касательного ускорения точки $M$ $\vec{a}_\tau(t)$ направлен в сторону, противоположную вектору скорости $\vec{V}_M(1)$ (см. рис. 2.5, *b*). Нормальное ускорение $a_n$ точки $M$ рассчитывается как $a_n = \omega_3^2 r_3$. В момент времени $t_1 = 1$ с величина нормального ускорения: $a_n(1)$ = 1 см/с$^2$. Вектор нормального ускорения $\vec{a}_n(1)$ направлен по радиусу к центру диска 3 (см. рис. 2.5, *b*). Полное ускорение точки $M$ в заданный момент времени: $a_M(1) = \sqrt{a_\tau^2(1) + a_n^2(1)}$ = 8,06 см/с$^2$. Вектор полного ускорения $\vec{a}_M$ направлен по диагонали прямоугольника, построенного на векторах $\vec{a}_n$ и $\vec{a}_\tau$.

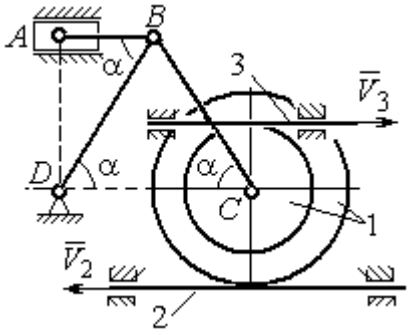
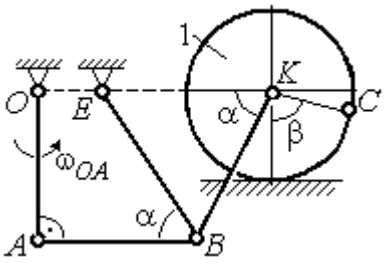
Ускорение $a_4$ звена 4 находится из условия, что звено 4 движется поступательно и прямолинейно. При прямолинейном движении нормальная составляющая ускорения равна нулю. Тогда $a_4 = a_{4\tau} = \dot{V}_4 = = \dot{V}_B = |\dot{\omega}_3| R_3 = \varepsilon_3 R_3$.

Так как угловое ускорение диска 3 является постоянной величиной, ускорение $a_4$ не зависит от времени: $a_4$ = 16 см/с$^2$. Вектор ускорения $\vec{a}_4$ направлен вдоль оси $x_4$ в сторону положительных значений.

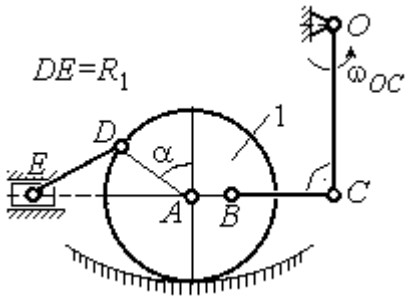
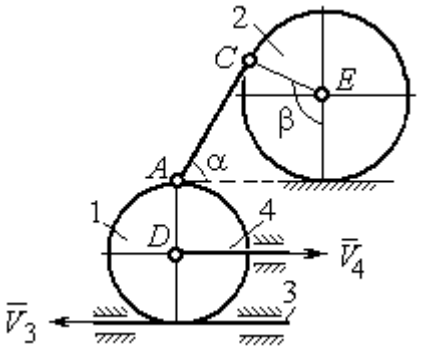
## 2.5. Задание К2. Определение скоростей точек твёрдого тела при плоскопараллельном движении

Для заданного положения плоского механизма определить скорости точек и угловые скорости звеньев механизма.

Варианты заданий показаны на рис. 2.6 – 2.8. Исходные данные вариантов заданий выбираются из таблиц, приведённых на рисунках схем механизмов.

| **Варианты № 1, 11, 21** | **Варианты № 2, 12, 22** |
|---|---|
|  <br>Найти: $V_A, V_B, V_C, \omega_{AB}, \omega_{BC}, \omega_1, \omega_{BD}$ |  <br>Найти: $V_A, V_B, V_K$, $\omega_1, \omega_{AB}, \omega_{OA}$, $\omega_{BE}, \omega_{BK}$ |

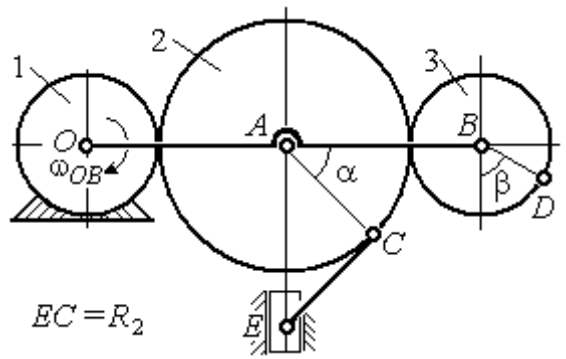
| Номер варианта задания | $R_1$, см | $r_1$, см | $AD$, см | α, град | $V_2$, см/с | $V_3$, см/с | Номер варианта задания | $R_1$, см | $OA$, см | $OE$, см | α, град | β, град | $V_C$, см/с |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 10 | 5 | 20 | 30 | 8 | 10 | **2** | 3 | 5 | 4 | 30 | 60 | 10 |
| **11** | 12 | 8 | 25 | 45 | 10 | 4 | **12** | 4 | 8 | 6 | 45 | 90 | 8 |
| **21** | 10 | 6 | 15 | 60 | 5 | 5 | **22** | 5 | 12 | 2 | 60 | 120 | 12 |

| **Варианты № 3, 13, 23** | **Варианты № 4, 14, 24** |
|---|---|
|  <br>Найти: $V_A, V_B, V_C$, $V_D, V_E$, $\omega_{BC}, \omega_1, \omega_{DE}$ |  <br>Найти: $V_A, V_C, V_E$, $\omega_1, \omega_2, \omega_{AC}$ |

| Номер варианта задания | $R_1$, см | $OC$, см | $AB$, см | $BC$, см | α, град | $\omega_{OC}$, рад/с | Номер варианта задания | $R_1$, см | $R_2$, см | α, град | β, град | $V_3$, см/с | $V_4$, см/с |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **3** | 12 | 18 | 10 | 35 | 60 | 4 | **4** | 10 | 15 | 30 | 60 | 8 | 4 |
| **13** | 10 | 15 | 10 | 25 | 90 | 8 | **14** | 6 | 10 | 45 | 90 | 4 | 6 |
| **23** | 15 | 20 | 5 | 20 | 120 | 6 | **24** | 10 | 12 | 60 | 120 | 3 | 3 |

Рис. 2.6. Задание К2. Определение скоростей точек тела при плоскопараллельном движении. Номера вариантов задания 1 – 4, 11 – 14, 21 – 24

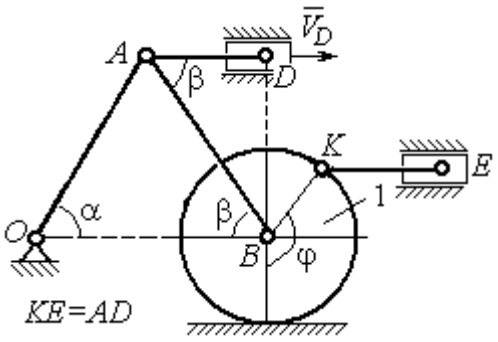
**Варианты № 5, 15, 25**




Найти: $V_A$, $V_B$, $V_C$, $V_D$, $V_E$, $\omega_2$, $\omega_3$, $\omega_{EC}$

| Номер варианта задания | $R_1$, см | $R_2$, см | $R_3$, см | α, град | β, град | $\omega_{OB}$, рад/с |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **5** | 10 | 20 | 12 | 60 | 0 | 6 |
| **15** | 6 | 18 | 10 | 90 | 90 | 8 |
| **25** | 20 | 25 | 15 | 120 | 180 | 4 |

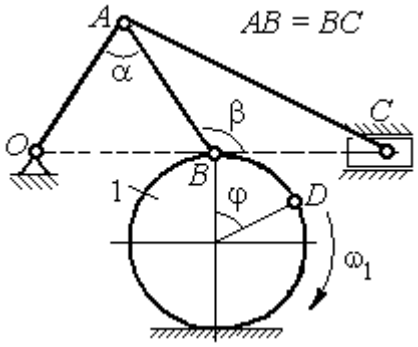
**Варианты № 6, 16, 26**




Найти: $V_A, V_B, V_K, V_E$, $\omega_1$, $\omega_{OA}$, $\omega_{AB}$, $\omega_{AD}$, $\omega_{KE}$

| Номер варианта задания | $R_1$, см | $OA$, см | α, град | β, град | φ, град | $V_D$, см/с |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **6** | 10 | 20 | 30 | 60 | 60 | 12 |
| **16** | 12 | 26 | 30 | 30 | 90 | 8 |
| **26** | 15 | 30 | 60 | 60 | 120 | 15 |

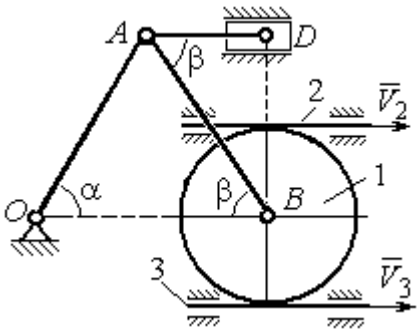
**Варианты № 7, 17, 27**




Найти: $V_A, V_B, V_C$, $\omega_1$, $\omega_{OA}$, $\omega_{AB}$, $\omega_{AC}$

| Номер варианта задания | $R_1$, см | $AB$, см | α, град | β, град | φ, град | $V_D$, см/с |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **7** | 10 | 20 | 30 | 60 | 60 | 12 |
| **17** | 12 | 25 | 60 | 120 | 90 | 16 |
| **27** | 8 | 16 | 30 | 60 | 120 | 10 |

**Варианты № 8, 18, 29**

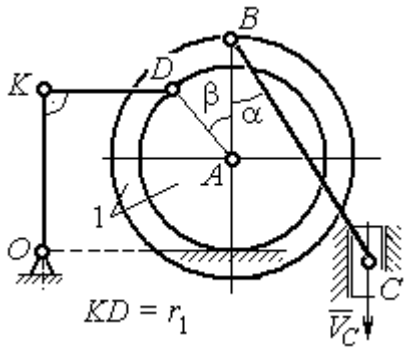
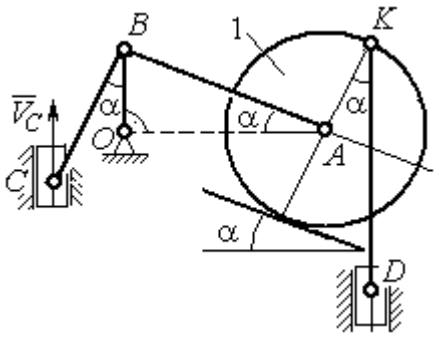



Найти: $V_A, V_B, V_D$, $\omega_1$, $\omega_{OA}$, $\omega_{AB}$, $\omega_{AD}$

| Номер варианта задания | $R_1$, см | $OA$, см | α, град | β, град | $V_2$, см/с | $V_3$, см/с |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **8** | 10 | 20 | 30 | 60 | 12 | 4 |
| **18** | 12 | 26 | 30 | 30 | 8 | 2 |
| **28** | 15 | 30 | 60 | 60 | 6 | 3 |

Рис. 2.7. Задание К2. Определение скоростей точек тела при плоскопараллельном движении. Номера вариантов задания 5 – 8, 15 – 18, 25 – 28

*Окончание вариантов задания К2*

| **Варианты № 9, 19, 29** | **Варианты № 10, 20, 30** |
|---|---|
|  Найти: $\omega_{OK}$, $\omega_{KD}$, $\omega_{BC}$, $\omega_1$, $V_A, V_B, V_K, V_D$ |  Найти: $V_A, V_B, V_D, V_K$, $\omega_{CB}, \omega_1$, $\omega_{OB}, \omega_{AB}, \omega_{KD}$ |

| Номер варианта задания | $R_1$, см | $r_1$, см | α, град | β, град | $BC$, см | $V_C$, см/с | Номер варианта задания | $R_1$, см | $CB$, см | $OB$, см | $KD$, см | α, град | $V_C$, см/с |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **9** | 20 | 12 | 45 | 60 | 60 | 8 | **10** | 10 | 20 | 30 | 60 | 30 | 4 |
| **19** | 24 | 16 | 60 | 90 | 50 | 4 | **20** | 12 | 26 | 30 | 50 | 45 | 2 |
| **29** | 16 | 10 | 30 | 120 | 40 | 6 | **30** | 15 | 30 | 60 | 60 | 60 | 3 |

Рис. 2.8. Задание К2. Определение скоростей точек тела при плоскопараллельном движении. Номера вариантов задания 9 – 10, 19 – 20, 29 – 30

## Пример выполнения задания К2. Определение скоростей точек твёрдого тела при плоскопараллельном движении

**Задача 1.** Плоский механизм (рис. 2.9) состоит из стержня $OC$ и подвижных дисков 2 и 3 радиусами $r_2$, $r_3$, шарнирно закрепленными на стержне, соответственно, в точках $A$ и $C$. Стержень $OC$ вращается вокруг неподвижного центра $O$ с угловой скоростью $\omega_{OC}$. Диск 2, увлекаемый стержнем $OC$, катится без проскальзывания по неподвижной поверхности диска 1 радиусом $r_1$. Диск 3, также увлекаемый стержнем $OC$, катится без проскальзывания по подвижному диску 2. В точке $D$, расположенной на краю диска 3, шарнирно прикреплен стержень 4, к которому в точке $E$ шарнирно

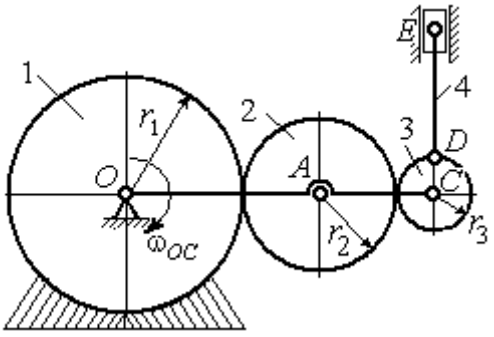


Рис. 2.9. Схема плоского механизма

прикреплен поршень *E*, способный совершать только вертикальное перемещение. Для заданного положения механизма (см. рис. 2.9), когда стержень *OC* горизонтален, стержень *DE* направлен по линии вертикального диаметра диска 3, найти скорости точек *A, C, D, E,* угловые скорости дисков 2, 3 и стержня 4, если: $r_1$ = 6 см, $r_2$ = 4 см, $r_3$ = 2 см, *DE* = 10 см, $\omega_{OC}$ = 1 рад/с.

*Решение*

Определим скорость точки *A*, общей для стержня *OC* и диска 2: $V_A = \omega_{OC}(r_1 + r_2)$ = 10 см/с. Вектор скорости $\vec{V}_A$ перпендикулярен стержню *OC* и направлен в сторону его вращения (рис. 2.10).

Диск 2 катится по неподвижной поверхности диска 1. Точка касания диска 2 с неподвижным диском 1 является мгновенным центром скоростей диска 2. На рис. 2.10 центр скоростей диска 2 обозначен точкой $P_2$. В этом случае скорость точки *A* может быть определена через угловую скорость диска $\omega_2$ следующим образом: $V_A = \omega_2 \cdot AP_2 = 4\omega_2$. Так как $V_A$ = 10 см/с, получим $\omega_2$ = 2,5 рад/с.

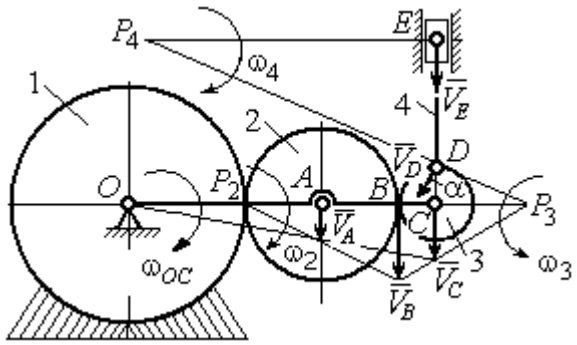


Рис. 2.10. Расчетная схема для определения скоростей точек механизма и угловых скоростей его звеньев

Для того чтобы найти угловую скорость диска 3, необходимо определить положение его мгновенного центра скоростей. С этой целью вычислим скорости точек *B* и *C*. Скорость точки *B* может быть найдена через угловую скорость диска 2: $V_B = \omega_2 \cdot BP_2$ = 20 см/с. Вектор скорости $\vec{V}_B$ перпендикулярен отрезку $BP_2$ и направлен в сторону мгновенного вращения диска 2 вокруг своего центра скоростей $P_2$.

Скорость точки *C* определяется через угловую скорость стержня *OC*: $V_C = \omega_{OC}(r_1 + 2r_2 + r_3)$ = 16 см/с. Вектор скорости $\vec{V}_C$ перпендикулярен стержню *OC* и направлен в сторону его вращения (см. рис. 2.10).

Построение мгновенного центра скоростей $P_3$ диска 3 по известным скоростям $\vec{V}_B$ и $\vec{V}_C$ показано на рис. 2.10. Его положение определяется из условия, что отношение скоростей двух точек тела, совершающего плоскопараллельное движение, равно отношению расстояний от этих точек до мгновенного центра скоростей: $\frac{V_B}{V_C} = \frac{r_3 + CP_3}{CP_3}$. Разрешая пропорцию относительно неизвестной величины $CP_3$, получим: $CP_3 = 8$ см. Скорость точки $C$ выражается через угловую скорость диска 3 $V_C = \omega_3 \cdot CP_3$. Отсюда величина угловой скорости диска 3: $\omega_3 = \frac{V_C}{CP_3} =$ 2 рад/с. Направление мгновенного вращения диска 3 вокруг своего центра скоростей определяется известными направлениями скоростей точек $C$ и $B$, принадлежащих диску 3 (см. рис. 2.10). Скорость точки $D$ $V_D = \omega_3 \cdot DP_3 = 2 \cdot \sqrt{2^2 + 8^2}$ = 16,5 см/с. Вектор скорости $\vec{V}_D$ перпендикулярен отрезку $DP_3$ и направлен в сторону мгновенного вращения диска 3 вокруг центра $P_3$.

Для определения скорости поршня $E$ воспользуемся теоремой о проекциях скоростей точек плоской фигуры, согласно которой проекции скоростей двух точек плоской фигуры на ось, проходящую через эти точки, равны между собой. Проведем ось через точки $D$ и $E$. По построению, угол $\alpha$ между вектором $\vec{V}_D$ и осью $DE$ равен углу $\angle DP_3C$ (см. рис. 2.10). Тогда, $\cos\alpha = \frac{CP_3}{DP_3} = \frac{8}{\sqrt{2^2 + 8^2}} = 0{,}97$, откуда $\alpha = 14^\circ$. На основании теоремы о проекциях скоростей точек плоской фигуры имеем равенство: $V_D \cos\alpha = V_E \cos 0$, откуда скорость точки $E$: $V_E$ =16 см/с.

Мгновенный центр скоростей стержня 4 – точка $P_4$ – определяется как точка пересечения перпендикуляров к векторам скоростей $\vec{V}_D$ и $\vec{V}_E$, восстановленных, соответственно, из точек $D$ и $E$ (см. рис. 2.10). Угловая скорость стержня 4, совершающего мгновенный поворот вокруг своего центра скоростей, равна: $\omega_4 = \frac{V_E}{EP_4}$, где $EP_4$ – расстояние от точки $E$ до мгновенного центра скоростей звена 4,

$EP_4 = DE \cdot \mathrm{ctg}\alpha$ = 40 см. В результате, $\omega_4$ = 0,4 рад/с. Направление мгновенного вращения звена 4 вокруг своего центра скоростей определяется направлением скорости точки *D*.

**Задача 2**. В плоском стержневом механизме (рис. 2.11) кривошипы *OA* и *ED* вращаются вокруг неподвижных центров *O* и *E*. В крайней точке *D* кривошипа *ED* к нему прикреплён шатун *DB*, второй конец которого в точке *B* прикреплён к кривошипу *OA*. Шатун *AC* прикреплён в точке *A* к кривошипу *AO*, а другим своим концом – к ползуну *C*, способному совершать только вертикальное движение. Все соединения шарнирные. В заданном положении механизма кривошип *OA* вертикален, шатун *DB* расположен горизонтально, кривошип *ED* наклонен под углом 60° к горизонтали, а шатун *AC* отклонён на угол 30° от вертикального положения кривошипа *AO*. Найти скорости всех отмеченных на схеме точек и угловые скорости всех звеньев, если линейные размеры звеньев механизма *AC* = 6 см, *AB* = 2 см, *BO* = 8 см, *DB* = 10 см и скорость ползуна в данный момент $V_C$ = 4 см/с.

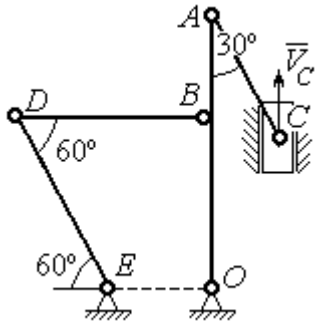



Рис. 2.11. Стержневой механизм

*Решение*

Кривошипы *OA* и *ED* совершают вращательные движения вокруг неподвижных центров. Скорости $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_B$ точек *A* и *B* перпендикулярны кривошипу *OA*, а скорость $\vec{V}_D$ точки *D* перпендикулярна кривошипу *ED*. Направления векторов скоростей точек показаны на рис. 2.12.

Шатун $AC$ совершает плоскопараллельное движение. Его мгновенный центр скоростей $P_1$ находится как точка пересечения перпендикуляров к скоростям $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_C$. Угловая скорость звена $AC$ равна $\omega_{AC} = \frac{V_C}{P_1C} = \frac{V_C}{AC \cdot \sin 30^\circ} = \frac{4}{3}$ рад/с. Далее, полагая, что точка $A$ принадлежит шатуну $AC$, найдем её скорость:

$$V_A = \omega_{AC} \cdot P_1A = \frac{4}{3} AC \cdot \cos 30^\circ = 4\sqrt{3} \text{ см/с.}$$

Теперь, исходя из того, что точка $A$ принадлежит как шатуну $AC$, так и кривошипу $OA$, найдём его угловую скорость: $\omega_{AO} = \frac{V_A}{AO} = 0{,}4\sqrt{3}$ рад/с. Скорость точки $B$ кривошипа $V_B = \omega_{AO} \cdot OB = 3{,}2\sqrt{3}$ см/с.

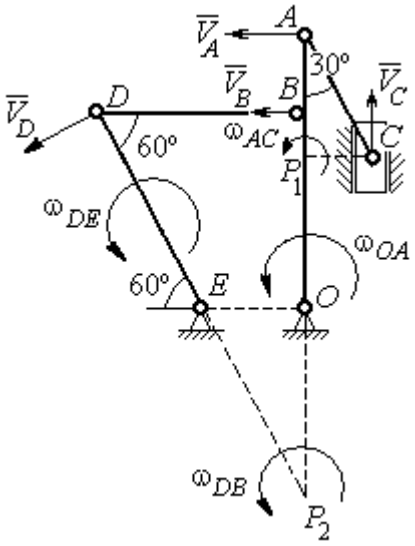


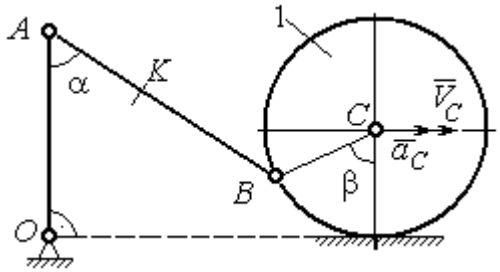

Рис. 2.12. Расчётная схема определения скоростей точек механизма и угловых скоростей его звеньев

Шатун $DB$ совершает плоскопараллельное движение. Зная направления скоростей точек $B$ и $D$, построим мгновенный центр скоростей $P_2$ звена $DB$ как точку пересечения перпендикуляров к скоростям $\vec{V}_B$ и $\vec{V}_D$ (см. рис. 2.12). Тогда, угловая скорость шатуна $DB$ $\omega_{DB} = \frac{V_B}{P_2B} = \frac{3{,}2\sqrt{3}}{DB \cdot \operatorname{tg} 60^\circ} = 0{,}32$ рад/с. Скорость точки $D$ $V_D = \omega_{DB} \cdot P_2D = 0{,}32 \frac{DB}{\sin 30^\circ} = 6{,}4$ см/с. Угловая скорость кривошипа $DE$ $\omega_{DE} = \frac{V_D}{DE} = \frac{6{,}4}{(OB / \sin 60^\circ)} = 0{,}69$ рад/с.

## 2.6. Задание К3. Определение ускорений точек твёрдого тела при плоскопараллельном движении

Для заданного положения плоского механизма определить ускорения точек звеньев механизма и угловые ускорения звеньев. Варианты заданий и исходные данные приведены на рис. 2.13 – 2.15.

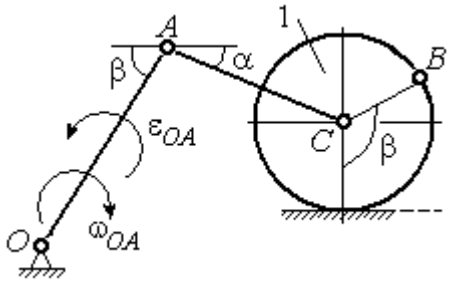
**Варианты № 1, 11, 21**




Найти: $a_A, a_K, \varepsilon_{AB}$

| Номер варианта задания | $AB$, см | $AK$, см | α, град | β, град | $R_1$, см | $V_C$, см/с | $a_C$, см/с$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 16 | 10 | 60 | 120 | 10 | 12 | 6 |
| **11** | 20 | 16 | 30 | 60 | 8 | 10 | 8 |
| **21** | 18 | 10 | 60 | 180 | 6 | 8 | 4 |

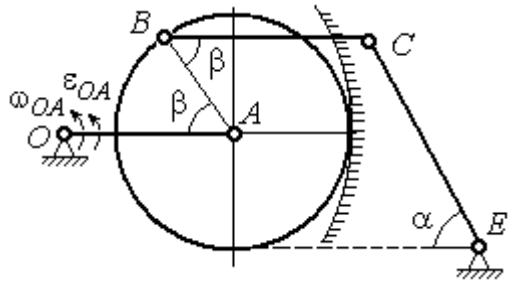
**Варианты № 2, 12, 22**




Найти: $a_C, a_B, \varepsilon_{AC}$

| Номер варианта задания | $R_1$, см | $OA$, см | $AC$, см | α, град | β, град | $\omega_{OA}$, рад/с | $\varepsilon_{OA}$, рад/с$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **2** | 5 | 10 | 12 | 30 | 60 | 2 | 4 |
| **12** | 8 | 24 | 20 | 30 | 120 | 1 | 2 |
| **22** | 6 | 12 | 15 | 60 | 90 | 2 | 3 |

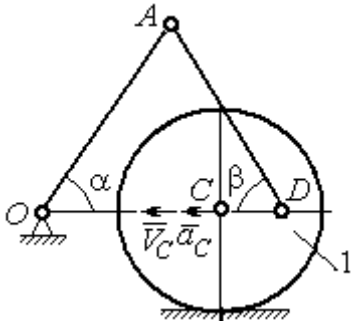
**Варианты № 3, 13, 23**




Найти: $a_C$, $a_B$, $\varepsilon_{BC}$

| Номер варианта задания | $BC$, см | $AO$, см | α, град | β, град | $R_1$, см | $\omega_{OA}$, рад/с | $\varepsilon_{OA}$, рад/с$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **3** | 16 | 15 | 60 | 90 | 10 | 2 | 3 |
| **13** | 18 | 12 | 90 | 60 | 8 | 3 | 2 |
| **23** | 14 | 12 | 30 | 120 | 10 | 2 | 4 |

**Варианты № 4, 14, 24**

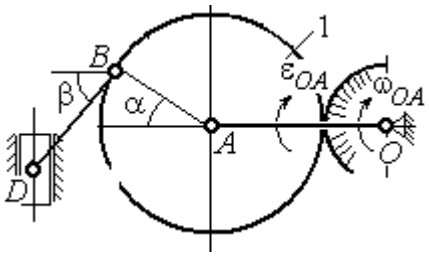



Найти: $a_A, a_D, \varepsilon_{DA}$

| Номер варианта задания | $R_1$, см | $OA$, см | $DC$, см | α, град | β, град | $V_C$, см/с | $a_C$, см/с$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **4** | 10 | 28 | 5,78 | 60 | 30 | 10 | 2 |
| **14** | 8 | 24 | 4,62 | 30 | 90 | 8 | 3 |
| **24** | 6 | 20 | 6 | 45 | 45 | 12 | 2 |

Рис. 2.13. Задание К3. Определение ускорений точек тела при плоскопараллельном движении. Номера вариантов задания 1 – 4, 11 – 14, 21 – 24

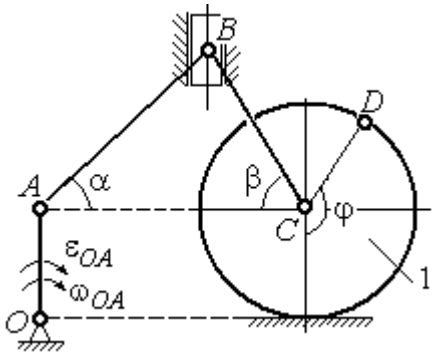
**Варианты № 5, 15, 25**




Найти: $a_D, a_B, \varepsilon_{BD}$

| Номер варианта задания | *OA*, см | *BD*, см | α, град | β, град | $R_1$, см | $\omega_{OA}$, рад/с | $\varepsilon_{OA}$, рад/с$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **5** | 16 | 10 | 60 | 30 | 10 | 4 | 3 |
| **15** | 18 | 8 | 90 | 45 | 12 | 2 | 4 |
| **25** | 14 | 12 | 30 | 60 | 8 | 3 | 2 |

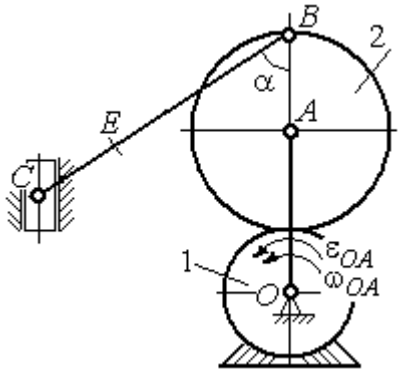
**Варианты № 6, 16, 26**




Найти: $a_B, a_D, \varepsilon_{BC}$

| Номер варианта задания | $R_1$, см | *AB*, см | φ, град | α, град | β, град | $\omega_{OA}$, рад/с | $\varepsilon_{OA}$, рад/с$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **6** | 6 | 18 | 60 | 30 | 30 | 2 | 3 |
| **16** | 8 | 20 | 90 | 60 | 30 | 2 | 4 |
| **26** | 5 | 16 | 120 | 30 | 60 | 3 | 4 |

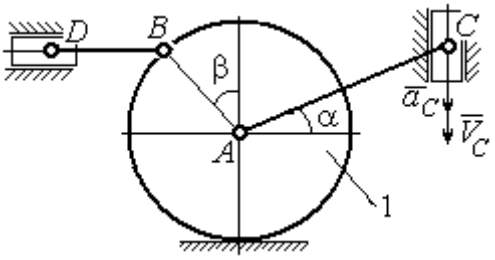
**Варианты № 7, 17, 27**




Найти: $a_E, a_C, \varepsilon_{BC}$

| Номер варианта задания | *BC*, см | *BE*, см | α, град | $R_1$, см | $R_2$, см | $\omega_{OA}$, рад/с | $\varepsilon_{OA}$, рад/с$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **7** | 22 | 10 | 60 | 2 | 10 | 2 | 3 |
| **17** | 28 | 15 | 30 | 3 | 6 | 3 | 4 |
| **27** | 20 | 8 | 45 | 4 | 8 | 2 | 2 |

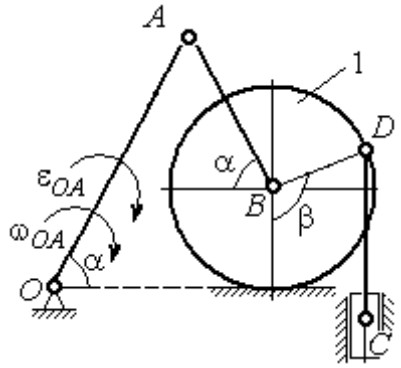
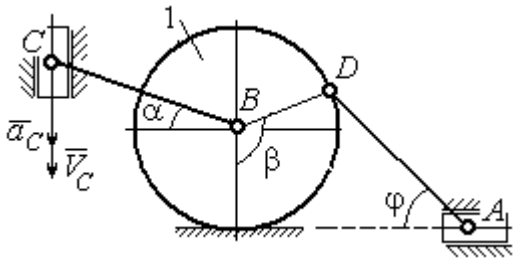
**Варианты № 8, 18, 28**




Найти: $a_D, a_B, \varepsilon_{BD}$

| Номер варианта задания | $R_1$, см | *BD*, см | *AC*, см | α, град | β, град | $V_C$, см/с | $a_C$, см/с$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **8** | 4 | 5 | 12 | 60 | 60 | 12 | 5 |
| **18** | 6 | 10 | 16 | 45 | 90 | 10 | 8 |
| **28** | 8 | 8 | 16 | 30 | 120 | 8 | 6 |

Рис. 2.14. Задание К3. Определение ускорений точек тела при плоскопараллельном движении. Номера вариантов задания 5 – 8, 15 – 18, 25 – 28

| **Варианты № 9, 19, 29** | **Варианты № 10, 20, 30** |
|---|---|
|  Найти: $a_C, a_B, \varepsilon_{AB}$ |  Найти: $a_A, a_B, \varepsilon_{CB}$ |

| Номер варианта задания | *OA*, см | *DC*, см | α, град | β, град | $R_1$, см | $\omega_{OA}$, рад/с | $\varepsilon_{OA}$, рад/с$^2$ | Номер варианта задания | $R_1$, см | *BC*, см | φ, град | α, град | β, град | $V_C$, см/с | $a_C$, см/с$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **9** | 18 | 10 | 30 | 120 | 4 | 2 | 3 | **10** | 6 | 14 | 60 | 30 | 120 | 15 | 3 |
| **19** | 20 | 12 | 60 | 60 | 6 | 3 | 4 | **20** | 5 | 18 | 45 | 60 | 90 | 10 | 5 |
| **29** | 18 | 8 | 60 | 90 | 4 | 2 | 3 | **30** | 4 | 16 | 30 | 45 | 60 | 12 | 4 |

Рис. 2.15. Задание К3. Определение ускорений точек тела при плоскопараллельном движении. Номера вариантов задания 9 – 10, 19 – 20, 29 – 30

## Примеры решения задания К3. Определение ускорений точек тела при плоскопараллельном движении

**Задача 1**. Ступенчатый барабан 1 с радиусами ступенек $R = 0{,}5$ м и $r = 0{,}3$ м катится окружностью малой ступеньки по горизонтальной поверхности без скольжения (рис. 2.16). Барабан приводится в движение шатуном *AC*, один конец которого соединён с центром барабана в точке *A*, а другой – с ползуном *C*, перемещающимся вертикально. В положении механизма, когда шатун *AC* отклонён от вертикали на угол 60°, найти ускорение точки *B* барабана, лежащей на его горизонтальном диаметре, если заданы скорость и ускорение ползуна *C*: $V_C = 9$м/с, $a_C = 4$ м/с$^2$.

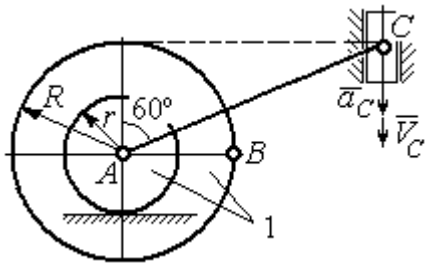



Рис. 2.16. Схема движения плоского механизма

*Решение*

Найдём угловые скорости $\omega_{AC}$, $\omega_1$ шатуна $AC$ и барабана 1. Шатун совершает плоское движение. Его мгновенный центр скоростей $P_2$ находится на пересечении перпендикуляров к скоростям $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_C$ (рис. 2.17). По условию, скорость точки $C$ направлена вертикально вниз. Точка $A$ принадлежит как шатуну $AC$, так и барабану 1. При качении барабана по горизонтальной поверхности скорость его центра – точки $A$ параллельна поверхности качения барабана.

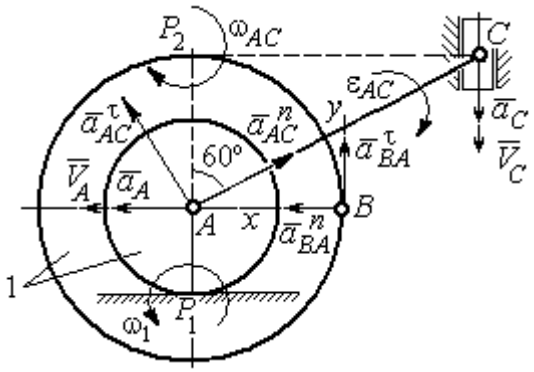


Рис. 2.17. Расчётная схема определения скоростей и ускорений точек механизма

Угловая скорость шатуна $\omega_{AC} = \dfrac{V_C}{CP_2} = \dfrac{9}{R\mathrm{tg}60^\circ} = 6\sqrt{3}$ рад/с. Скорость точки $A$ шатуна $V_A = \omega_{AC} \cdot AP_2 = 3\sqrt{3}$ м/с. Угловая скорость барабана 1 $\omega_1 = \dfrac{V_A}{AP_1} = 10\sqrt{3}$ рад/с. При расчёте угловой скорости барабана учтено, что качение барабана по неподвижной поверхности представляет собой плоское движение, при котором мгновенный центр скоростей находится в точке касания с поверхностью (в точке $P_1$ на рис. 2.17).

Выразим ускорение $\vec{a}_A$ точки $A$ через полюс $C$ на основании векторного равенства: $\vec{a}_A = \vec{a}_C + \vec{a}_{AC}^{\tau} + \vec{a}_{AC}^{n}$, где $\vec{a}_C$ – ускорение точки $C$, выбранной в качестве полюса; $\vec{a}_{AC}^{\tau}$, $\vec{a}_{AC}^{n}$ – касательная и нормальная составляющие ускорения точки $A$ при вращении шатуна $AC$ вокруг полюса $C$. Вектор нормального ускорения $\vec{a}_{AC}^{n}$ направлен вдоль шатуна $AC$ от точки $A$ к полюсу $C$ и равен по величине $a_{AC}^{n} = \omega_{AC}^2 \cdot AC = (6\sqrt{3})^2 \cdot 2R = 108$ м/с$^2$. Вектор касательного ускорения $\vec{a}_{AC}^{\tau}$, модуль которого вычисляется по формуле $a_{AC}^{\tau} = \varepsilon_{AC} \cdot AC$, направлен перпендикулярно отрезку $AC$.

На данном этапе величина вектора касательного ускорения не может быть вычислена, поскольку угловое ускорение шатуна $AC$ $\varepsilon_{AC}$ неизвестно. На рис. 2.17 направление вектора касательного ускорения $\vec{a}_{AC}^{\tau}$ выбрано из предположения, что

вращение шатуна ускоренное и направление углового ускорения совпадает с направлением его угловой скорости.

Направление вектора $\vec{a}_A$ ускорения точки $A$ определяется из того, что центр барабана движется по прямой, параллельной горизонтальной поверхности качения. На рис. 2.17 направление вектора ускорения $\vec{a}_A$ выбрано из предположения, что качение барабана ускоренное.

Выберем ось $x$ вдоль линии $AC$ (рис. 2.18) и спроектируем векторное равенство $\vec{a}_A = \vec{a}_C + \vec{a}^{\tau}_{AC} + \vec{a}^{n}_{AC}$ на эту ось. При таком выборе оси проекция неизвестного ускорения $\vec{a}^{\tau}_{AC}$ обращается в нуль. Получим $a_A \cos 30^\circ = a_C \cos 60^\circ - a^n_{AC}$. Отсюда найдём ускорение центра барабана $a_A = \dfrac{1}{\cos 30^\circ}\left(a_C \cos 60^\circ - a^n_{AC}\right) = -122{,}4$ м/с$^2$. Отрицательное значение ускорения точки $A$ означает, что на рис. 2.17, 2.18 вектор ускорения $\vec{a}_A$ должен иметь противоположное направление. Таким образом, вектор ускорения $\vec{a}_A$ направлен в сторону, противоположную вектору скорости $\vec{V}_A$, и движение барабана замедленное.

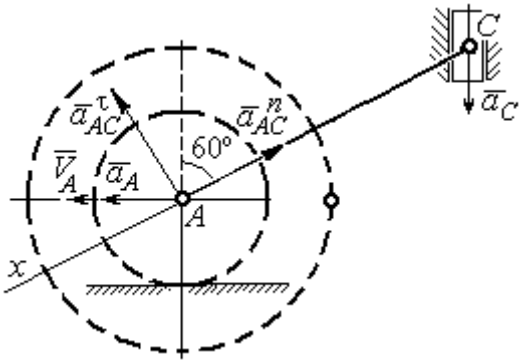


Рис. 2.18. Схема для определения ускорения центра барабана

Для того чтобы найти ускорение точки $B$, выразим его через полюс $A$ на основании векторного равенства $\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}^{\tau}_{BA} + \vec{a}^{n}_{BA}$, где $\vec{a}_A$ – ускорение точки $A$, выбранной в качестве полюса; $\vec{a}^{\tau}_{BA}$, $\vec{a}^{n}_{BA}$ – касательная и нормальная составляющие ускорения точки $B$ при вращении барабана вокруг полюса $A$.

Модуль вектора нормального ускорения $\vec{a}^{n}_{BA}$ равен по величине $a^n_{BA} = \omega_1^2 \cdot BA = (10\sqrt{3})^2 \cdot R = 150$ м/с$^2$. Вектор направлен вдоль радиуса барабана от точки $B$ к полюсу $A$ (см. рис. 2.17).

Модуль вектора касательного ускорения $\vec{a}^{\tau}_{BA}$ вычисляется по формуле $a^{\tau}_{BA} = \varepsilon_1 \cdot BA$, где $\varepsilon_1$ – угловое ускорение барабана. Значение углового ускорения катящегося барабана (в отличие от углового ускорения $\varepsilon_{AC}$ шатуна $AC$) может быть найдено. Расчёт основан на том, что при движении барабана расстояние $AP_1$ от точки $A$ до центра скоростей барабана $P_1$ остаётся постоянным, равным $r$. Тогда выражение $V_A = \omega_1 \cdot AP_1 = \omega_1 \cdot r$ для расчёта скорости точки $A$ можно продифференцировать. Получим $\frac{dV_A}{dt} = \frac{d\omega_1}{dt} \cdot r$. Так как точка $A$ движется по прямой, производная от скорости точки равна её полному ускорению, а производная от угловой скорости барабана равна его угловому ускорению. Тогда имеем: $a_A = \varepsilon_1 \cdot r$, откуда находим угловое ускорение $\varepsilon_1 = \frac{a_A}{r} = 40{,}8$ рад/с$^2$, а затем и модуль вектора касательного ускорения $a^{\tau}_{BA} = \varepsilon_1 \cdot BA = 20{,}4$ м/с$^2$.

Заметим, что для вычисления углового ускорения $\varepsilon_{AC}$ шатуна $AC$ подобные рассуждения неприменимы. Формулу $V_A = \omega_{AC} \cdot AP_2$ невозможно продифференцировать, так как при движении механизма расстояние $AP_2$ от точки $A$ до центра скоростей $P_2$ шатуна $AC$ является неизвестной функцией времени.

Выберем систему координат $xBy$ как показано на рис. 2.17, и спроецируем на эти оси векторное равенство $\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}^{\tau}_{BA} + \vec{a}^{n}_{BA}$. Полагая, что движение барабана ускоренное (т. е. вектора ускорений $\vec{a}_A$ и $\vec{a}^{\tau}_{BA}$ направлены, как показано на рис. 2.17), получим значения составляющих ускорения точки $B$: $a_{Bx} = a_A + a^{n}_{BA}$, $a_{By} = a^{\tau}_{BA}$. Подставляя значения ускорений, найдём $a_{By} = 20{,}4$ м/с$^2$, $a_{Bx} = -122{,}4 + 150 = 27{,}6$ м/с$^2$. Вектор полного ускорения точки $B$ направлен по диагонали прямоугольника, построенного на векторах $\vec{a}_{Bx}$, $\vec{a}_{By}$. Величина ускорения точки $B$: $a_B = \sqrt{a^2_{Bx} + a^2_{By}} = 34{,}32$ м/с$^2$.

**Задача 2**. В плоском механизме (рис. 2.19) кривошип *OA* вращается вокруг оси *O* с угловой скоростью $\omega_{OA}$ и угловым ускорением $\varepsilon_{OA}$. Диск 2, шарнирно присоединённый к кривошипу в точке *A*, катится без проскальзывания по неподвижному диску 1. Радиусы дисков $R_1$ и $R_2$. На краю диска 2 в точке *B* шарнирно прикреплен стержень *BC*, соединенный с центром *C* диска 3. Радиус диска 3 равен радиусу диска 2: $R_3 = R_2$. Диск 3 катится без скольжения по горизонтальной поверхности, по прямой. Для положения механизма, изображенного на рис. 2.19, определить ускорение точки *D* и угловое ускорение стержня *BC*, если $\omega_{OA} = 4$ рад/с, $\varepsilon_{OA} = 2$ рад/с$^2$, $R_1 = 4$ см, $R_2 = 8$ см. Длина стержня $BC = 20$ см.

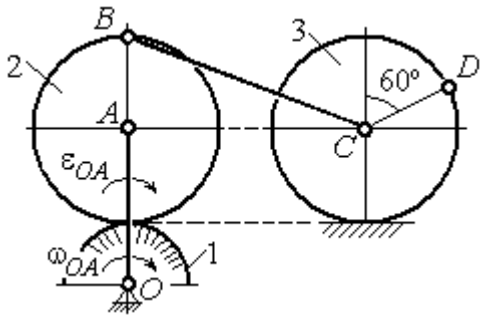


Рис. 2.19. Схема движения плоского механизма

*Решение*

**Определение угловых скоростей звеньев механизма**.

Рассмотрим вращательное движение кривошипа *OA*. Скорость точки *A*: $V_A = \omega_{OA} \cdot OA = 48$ см/с. Вектор скорости $\vec{V}_A$ направлен перпендикулярно кривошипу *OA* в сторону движения кривошипа (рис. 2.20).

При движении диска 2 точка $P_2$ соприкосновения второго диска с неподвижным первым является мгновенным центром скоростей диска 2. Угловая скорость диска 2: $\omega_2 = \dfrac{V_A}{AP_2} = \dfrac{48}{8} = 6$ рад/с.

Скорость точки *B* диска 2: $V_B = \omega_2 BP_2 = 6 \cdot 16 = 96$ см/с.

Для определения угловой скорости стержня $BC$ заметим, что скорости двух точек стержня $\vec{V}_B$ и $\vec{V}_C$ параллельны, но точки $B$ и $C$ не лежат на общем перпендикуляре к скоростям. В этом случае мгновенный центр скоростей стержня $BC$ отсутствует (бесконечно удалён), угловая скорость стержня равна нулю: $\omega_{BC} = 0$, а стержень совершает мгновенное поступательное движение. В результате имеем: $V_C = V_B = 96$ см/с.

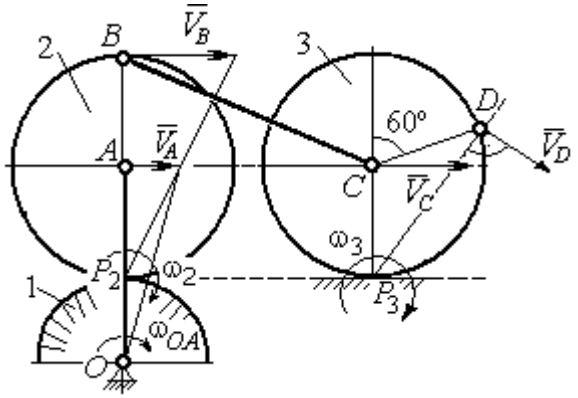



Рис. 2.20. Расчетная схема для определения угловых скоростей звеньев механизма

При качении диска 3 по неподвижной поверхности без проскальзывания точка $P_3$ касания его с поверхностью является мгновенным центром скоростей. Тогда угловая скорость диска 3: $\omega_3 = \dfrac{V_C}{CP_3} = 12$ рад/с. Скорость точки $D$ диска 3: $V_D = \omega_3 \cdot DP_3$. Величину $DP_3$ находим из треугольника $P_3DC$. В результате $DP_3 = 2R_3\cos 30^\circ = 13{,}8$ см и $V_D = 165{,}6$ см/с. Вектор скорости $\vec{V}_D$ направлен в сторону движения диска 3 перпендикулярно линии $DP_3$ и (см. рис. 2.20).

**Определение ускорений точек механизма**.

Представим ускорение $\vec{a}_C$ точки $C$ векторной суммой $\vec{a}_C = \vec{a}_B + \vec{a}^{\,n}_{CB} + \vec{a}^{\,\tau}_{CB}$, где $\vec{a}_B$ – ускорение точки $B$, выбранной в качестве полюса; $\vec{a}^{\,n}_{CB}$, $\vec{a}^{\,\tau}_{CB}$ – нормальная и касательная составляющие ускорения точки $C$ при вращении стержня $BC$ вокруг полюса $B$, $a^n_{CB} = \omega^2_{CB} \cdot CB$, $a^\tau_{CB} = \varepsilon_{CB} \cdot CB$.

Нормальная составляющая ускорения точки $C$ $a^n_{CB} = 0$, так как стержень $CB$ совершает мгновенное поступательное движение и $\omega_{BC} = 0$.

Направление касательной составляющей $\vec{a}^{\tau}_{CB}$ неизвестно, так как неизвестно направление углового ускорения стержня $\varepsilon_{CB}$. Для определённости выберем направление углового ускорения стержня *BC* в сторону против хода часовой стрелки. На рис. 2.21 это направление показано дуговой стрелкой $\varepsilon_{CB}$.

В соответствии с выбранным направлением углового ускорения вектор $\vec{a}^{\tau}_{CB}$ строится перпендикулярно линии стержня *BC* в сторону углового ускорения $\varepsilon_{CB}$ (см. рис. 2.21).

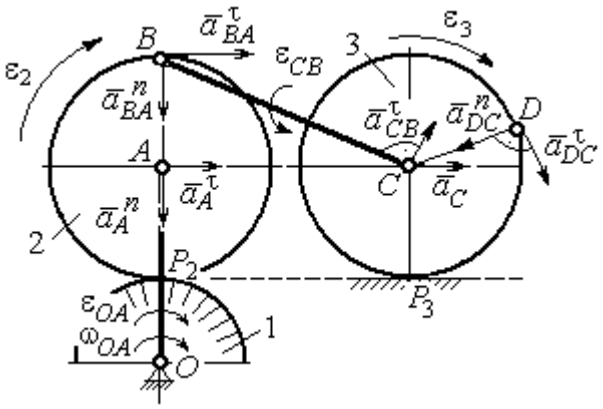



Рис. 2.21. Расчетная схема для определения ускорений точек механизма и угловых ускорений его звеньев

Выразим ускорение точки *B* через полюс *A*: $\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}^{n}_{BA} + \vec{a}^{\tau}_{BA}$, где $\vec{a}_A$ – ускорение полюса *A*; $\vec{a}^{n}_{BA}$, $\vec{a}^{\tau}_{BA}$ – нормальная и касательная составляющие ускорения точки *B* при вращении диска 2 вокруг полюса *A*. Величина нормальной составляющей ускорения точки *B* $a^{n}_{BA} = \omega_2^2 \cdot BA$ = 288 см/с$^2$. Вектор $\vec{a}^{n}_{BA}$ направлен вдоль радиуса *BA* от точки *B* к полюсу *A* (см. рис. 2.21). Касательное ускорение точки *B* при вращении диска 2 вокруг полюса *A* вычисляется по формуле $a^{\tau}_{BA} = \varepsilon_2 \cdot BA$. Для определения углового ускорения $\varepsilon_2$ диска 2 заметим, что во время движения диска 2 расстояние $AP_2$ остается постоянным, равным $R_2$. Дифференцируя равенство $V_A = \omega_2 \cdot AP_2 = \omega_2 R_2$, получим: $\dfrac{dV_A}{dt} = \dfrac{d\omega_2}{dt} R_2$, или $a^{\tau}_A = \varepsilon_2 R_2$, откуда $\varepsilon_2 = \dfrac{a^{\tau}_A}{R_2}$.

Для того чтобы найти величину $a^{\tau}_A$, рассмотрим вращательное движение кривошипа *OA* вокруг неподвижной оси *O*. Ускорение точки *A* представляется в виде векторного равенства $\vec{a}_A = \vec{a}^{n}_A + \vec{a}^{\tau}_A$, где $\vec{a}^{n}_A$ и $\vec{a}^{\tau}_A$ – известные нормальная и касательная составляющие ускорения точки *A* кривошипа *OA*:

$a_A^n = \omega_{OA}^2 \cdot OA$ = 192 см/с², $a_A^\tau = \varepsilon_{OA} \cdot OA$ = 24 см/с². Направления векторов нормального ускорения $\vec{a}_A^{\,n}$ и касательного ускорения $\vec{a}_A^{\,\tau}$ показаны на рис. 2.21.

Теперь найдём величину углового ускорения диска 2 и модуль касательного ускорения $a_{BA}^\tau$ точки $B$ при вращении диска 2 вокруг полюса $A$: $\varepsilon_2 = \dfrac{a_A^\tau}{R_2} =$ = 3 рад/с², $a_{BA}^\tau = \varepsilon_2 \cdot BA$ = 24 см/с².

Для определения ускорения точки $C$ имеем векторное равенство $\vec{a}_C = \vec{a}_A^{\,n} + \vec{a}_A^{\,\tau} + \vec{a}_{BA}^{\,n} + \vec{a}_{BA}^{\,\tau} + \vec{a}_{CB}^{\,\tau}$. Выберем оси $Cx$, $Cy$, как показано на рис. 2.22, – вдоль отрезка $BC$ и перпендикулярно ему и спроецируем на них имеющееся векторное равенство. Получим:

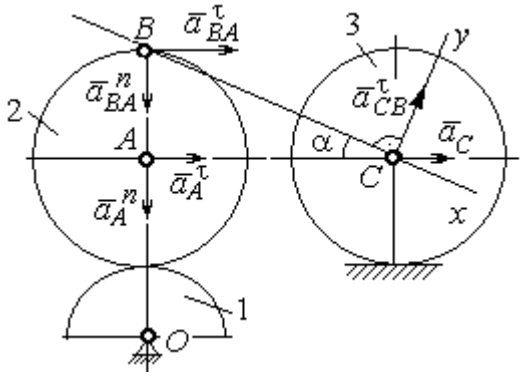


Рис. 2.22. Расчетная схема для вычисления ускорения точки С

$$a_C\cos\alpha = a_A^n\sin\alpha + a_A^\tau\cos\alpha + a_{BA}^n\sin\alpha + a_{BA}^\tau\cos\alpha;$$

$$a_C\sin\alpha = a_A^n\cos\alpha + a_A^\tau\sin\alpha + a_{BA}^n\cos\alpha + a_{BA}^\tau\sin\alpha + a_{CB}^\tau,$$

где $\alpha$ – угол между стержнем $BC$ и линией центров $AC$; $\sin\alpha = \dfrac{AB}{BC}$ = 0,4; $\cos\alpha = 0{,}92$. Решая систему, найдём: $a_C$ = 256,7 см/с², $a_{CB}^\tau$ = – 358,12 см/с².

Модуль углового ускорения стержня $BC$: $\varepsilon_{CB} = \dfrac{\left|a_{CB}^\tau\right|}{BC}$ = 17,9 рад/с².

Знак «минус» величины $a_{CB}^\tau$ означает, что вектор касательного ускорения $\vec{a}_{CB}^{\,\tau}$ на рис. 2.21 – 2.22 следует направить в противоположную сторону. Направление углового ускорения стержня $BC$, показанное на рис. 2.21 дуговой стрелкой $\varepsilon_{CB}$, также следует заменить на противоположное.

Выразим ускорение точки *D* через полюс *C*: $\vec{a}_D = \vec{a}_C + \vec{a}^n_{DC} + \vec{a}^\tau_{DC}$, где $\vec{a}_C$ – известное ускорение точки *C*; $\vec{a}^n_{DC}$, $\vec{a}^\tau_{DC}$ – нормальное и касательное составляющие ускорения точки *D* при вращении диска 3 вокруг полюса *C*. Величина нормального ускорения точки *D*: $a^n_{DC} = \omega_3^2 \cdot DC = 1152$ см/с$^2$. Вектор ускорения $\vec{a}^n_{DC}$ направлен по радиусу от точки *D* к полюсу *C* (рис. 2.23).

Для расчёта касательной составляющей $a^\tau_{DC}$ ускорения точки *D* найдём угловое ускорение диска 3. Продифференцируем по времени равенство $V_C = \omega_3 \cdot CP_3 = \omega_3 R_3$. Получим: $\frac{dV_C}{dt} = \frac{d\omega_3}{dt} R_3$, или $a_C = \varepsilon_3 R_3$. Угловое ускорение диска 3: $\varepsilon_3 = \frac{a_C}{R_3} = 32{,}09$ рад/с$^2$. Тогда величина касательной составляющей ускорения точки *D*: $a^\tau_{DC} = \varepsilon_3 \cdot DC = 256{,}7$ см/с$^2$. Направление вектора $\vec{a}^\tau_{DC}$ соответствует ускоренному движению диска 3.

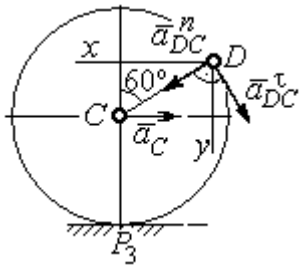


Рис.2.23. Расчетная схема для определения ускорения точки *D*

Проведём оси *Dx* и *Dy*, как показано на рис. 2.23, и спроецируем векторное равенство ускорения точки *D* на оси:

$$a_{Dx} = -a_C + a^n_{DC}\cos 30^\circ - a^\tau_{DC}\cos 60^\circ, \quad a_{Dy} = a^n_{DC}\cos 60^\circ + a^\tau_{DC}\cos 30^\circ.$$

Решая систему, находим значения проекций модуля ускорения $a_{Dx} = 612{,}5$ см/с$^2$, $a_{Dy} = 798{,}3$ см/с$^2$. Величина ускорения точки *D*:

$$a_D = \sqrt{a^2_{Dx} + a^2_{Dy}} = 1006{,}2 \text{ см/с}^2.$$

# 3. СЛОЖНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТОЧКИ

## 3.1. Основные понятия сложного движения точки

В неподвижной системе координат рассматривается подвижное твердое тело и точка, перемещающаяся относительно тела.

Траектория точки в её движении относительно тела называется **относительной траекторией.** Скорость точки в этом движении называют **относительной скоростью**, ускорение – **относительным ускорением**.

Траектория точки, перемещающейся вместе с телом, называется переносной траекторией точки, скорость точки при таком её движении – **переносной скоростью**, а ускорение – **переносным ускорением**.

Суммарное движение точки вместе с телом и относительно тела называется **сложным движением**. Траектория точки относительно неподвижной системы координат называется **абсолютной траекторией точки**, скорость и ускорение – **абсолютной скоростью и абсолютным ускорением.**

При вычислении абсолютной скорости используется теорема о сложении скоростей: **при сложном движении абсолютная скорость точки равна геометрической сумме относительной и переносной скоростей:** $\vec{V} = \vec{V}_e + \vec{V}_r$, где $\vec{V}$, $\vec{V}_e$, $\vec{V}_r$ – вектора абсолютной, переносной и относительной скоростей точки.

В случае, когда относительное движение точки задается естественным способом в виде закона изменения пути $S = S(t)$, величина относительной скорости точки равна модулю производной: $V_r = \left|\dot{S}_r\right|$. Если переносное движение точки есть вращение тела вокруг неподвижной оси, скорость точки в переносном движении будет: $V_e = \omega_e h_e$, где $\omega_e$ – величина угловой скорости вращения тела; $h_e$ – кратчайшее расстояние от места положения точки на теле до оси вращения тела.

При вычислении абсолютного ускорения используется теорема Кориолиса о сложении ускорений: **при сложном движении абсолютное ускорение точки равно геометрической сумме трех ускорений – относительного, переносного и ускорения Кориолиса** $\vec{a} = \vec{a}_e + \vec{a}_r + \vec{a}_к$, где $\vec{a}$ – вектор абсолютного ускорения точки; $\vec{a}_e, \vec{a}_r$ – вектора соответственно переносного и относительного ускорений точки; $\vec{a}_к$ – вектор ускорения Кориолиса. (Иногда его называют поворотным ускорением.)

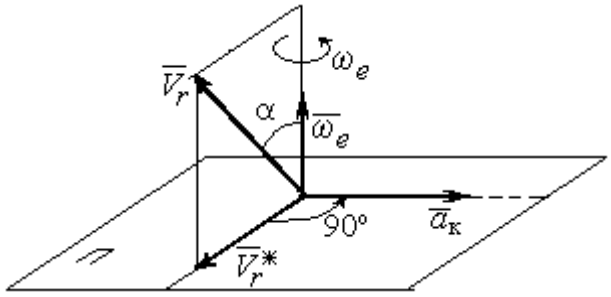


Рис. 3.1. Определение направления ускорения Кориолиса по правилу Жуковского

Вектор ускорения Кориолиса определяется векторным произведением $\vec{a}_к = 2(\vec{\omega}_e \times \vec{V}_r)$, где $\vec{\omega}_e$ – вектор угловой скорости переносного движения; $\vec{V}_r$ – вектор относительной скорости точки. Модуль ускорения Кориолиса: $|\vec{a}_к| = 2|\vec{\omega}_e| \cdot |\vec{V}_r| \sin\alpha$, где $\alpha$ – угол между вектором угловой скорости переносного движения и вектором относительной скорости точки (см. рис. 3.1). Направление вектора ускорения Кориолиса может быть получено по правилу построения вектора векторного произведения.

На рис. 3.1 показана последовательность выбора направления вектора ускорения Кориолиса по правилу Н. Е. Жуковского. Правило состоит в следующем: пусть имеется точка, движущаяся с относительной скоростью $\vec{V}_r$. Построим плоскость П, перпендикулярную вектору переносной угловой скорости $\vec{\omega}_e$, и спроецируем вектор $\vec{V}_r$ на эту плоскость. Проекцию обозначим $\vec{V}_r^*$ (см. рис. 3.1). Чтобы получить направление ускорения Кориолиса, следует вектор проекции относительной скорости $\vec{V}_r^*$ повернуть на 90° в плоскости П вокруг оси переносного вращения в направлении этого вращения.

Если сложное движение точки происходит в плоскости, перпендикулярной оси переносного вращения, направление ускорения Кориолиса можно получить

простым поворотом вектора относительной скорости на угол 90° вокруг оси переносного вращения в направлении этого вращения.

Относительное ускорение $\vec{a}_r$ представляется как сумма векторов относительного касательного $\vec{a}_r^{\tau}$ и относительного нормального $\vec{a}_r^{n}$ ускорений: $\vec{a}_r = \vec{a}_r^{\tau} + \vec{a}_r^{n}$. Переносное ускорение точки $\vec{a}_e$ тела имеет своими составляющими переносное касательное $\vec{a}_e^{\tau}$ и переносное нормальное $\vec{a}_e^{n}$ ускорения так, что $\vec{a}_e = \vec{a}_e^{\tau} + \vec{a}_e^{n}$.

Таким образом, абсолютное ускорение точки в сложном движении можно представить в виде векторного равенства

$$\vec{a} = \vec{a}_r^{\tau} + \vec{a}_r^{n} + \vec{a}_e^{\tau} + \vec{a}_e^{n} + \vec{a}_{\text{к}}.$$

Модули относительного касательного и относительного нормального ускорений при естественном способе задания относительного движения точки равны: $a_r^{\tau} = \left|\dot{V}_r\right|$, $a_r^{n} = \dfrac{V_r^2}{\rho}$, где $\rho$ – радиус кривизны относительной траектории. При движении точки по окружности радиус кривизны равен радиусу окружности, при движении по прямой – бесконечности, и в этом случае $a_r^{n} = 0$.

При вращательном переносном движении точки значения переносного касательного и нормального ускорений вычисляются по формулам: $a_e^{\tau} = \varepsilon_e h_e$, $a_e^{n} = \omega_e^2 h_e$, где $\varepsilon_e$ – угловое ускорение вращательного переносного движения, $\varepsilon_e = \left|\dot{\omega}_e\right|$; $h_e$ – расстояние от точки до оси вращения тела; $\omega_e$ – величина угловой скорости вращения тела.

Вектора ускорений строятся по общим правилам построения векторов нормального и касательного ускорений.

При поступательном переносном движении ускорение Кориолиса и переносное нормальное ускорение равны нулю: $a_{\text{к}} = 0$, $a_e^{n} = 0$. Абсолютное ускорение точки при поступательном переносном движении можно представить в виде векторного равенства $\vec{a} = \vec{a}_r^{\tau} + \vec{a}_r^{n} + \vec{a}_e^{\tau}$.

## 3.2. Задание К4. Определение скорости и ускорения точки при сложном движении

Задание включает две задачи с вращательным и поступательным видами переносного движения точки.

**Задача 1.** Вращение тела относительно неподвижной оси задается законом изменения угла поворота: $\varphi_e = \varphi_e(t)$ или законом изменения его угловой скорости: $\omega_e = \omega_e(t)$. Движение точки относительно тела отсчитывается от её начального положения в точке $C$ и задается законом изменения длины дуги окружности или отрезка прямой линии: $CM = S_r = S_r(t)$.

Определить абсолютные скорость и ускорение точки в заданный момент времени $t_1$.

**Задача 2.** Поступательное движение тела, несущего точку, задается законом изменения координаты $x_e = x_e(t)$. Движение точки относительно тела отсчитывается от её начального положения в точке $C$ и задается законом изменения длины дуги окружности или отрезка прямой линии: $CM = y_r = y_r(t)$.

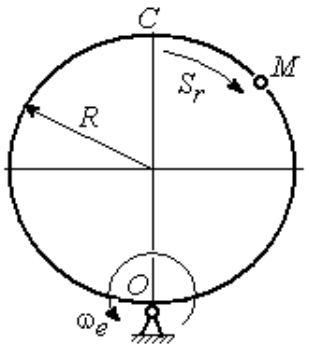
Определить абсолютные скорость и ускорение точки в момент времени $t_2$, который либо задаётся в исходных данных задачи, либо на схемеописаны условия, из которых он находится.

Номера вариантов заданий даны на рис. 3.2 – 3.5.

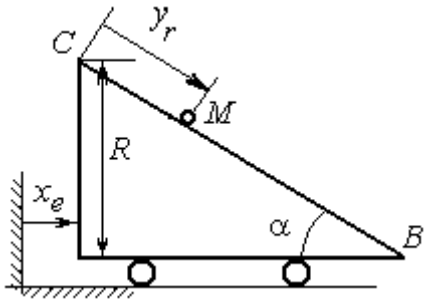
Варианты исходных данных приведены в табл. 3.1.

**Варианты № 1, 11, 21**

Задача 1



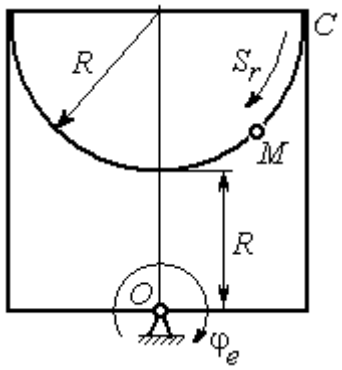

Задача 2



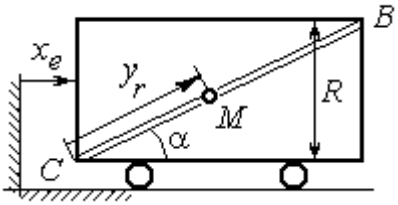

В момент $t = t_2$ точка $M$ прошла половину пути $CB$

**Варианты № 2, 12, 22**

Задача 1



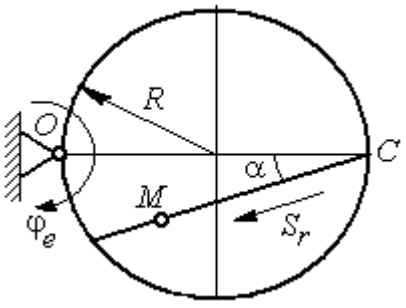

Задача 2




В момент $t = t_2$ точка $M$ прошла 2/3 пути $CB$

**Варианты № 3, 13, 23**

Задача 1




Задача 2

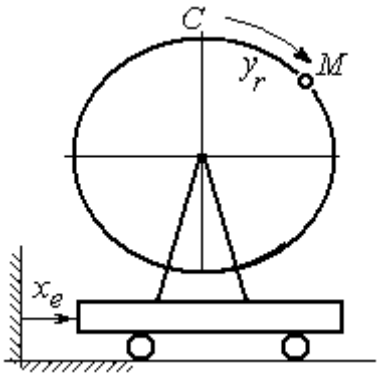
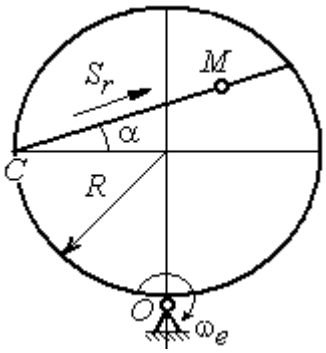


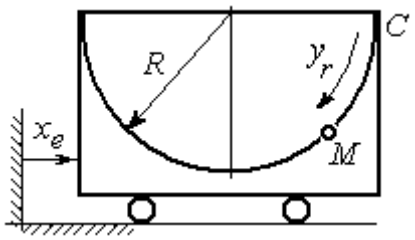

Рис. 3.2. Задание К4. Сложное движение точки.
Номера вариантов задания 1 – 3, 11 – 13, 21 – 23

**Варианты № 4, 14, 24**

Задача 1

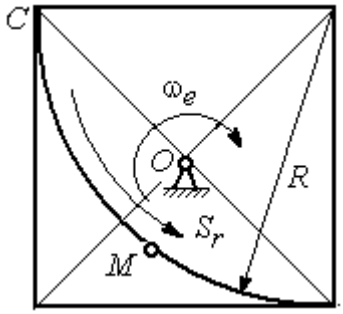



Задача 2

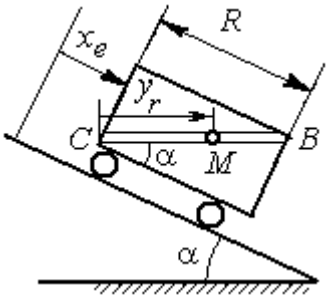



**Варианты № 5, 15, 25**

Задача 1



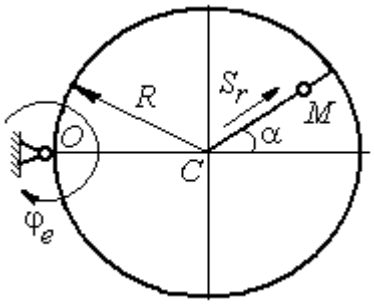

Задача 2




В момент $t = t_2$ точка *M* прошла путь *CB*

**Варианты № 6, 16, 26**

Задача 1




Задача 2

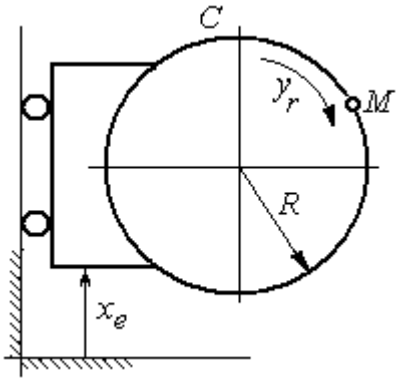
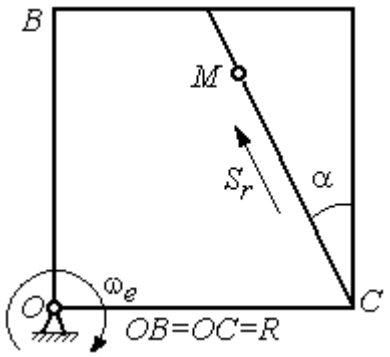


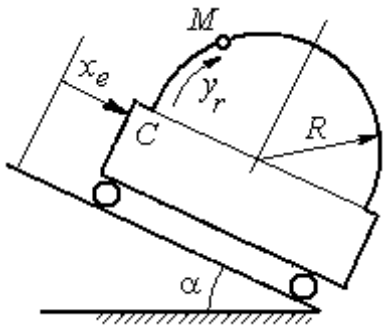

Рис. 3.3. Задание К4. Сложное движение точки.
Номера вариантов задания 4 – 6, 14 – 16, 24 – 26

**Варианты № 7, 17, 27**

Задача 1

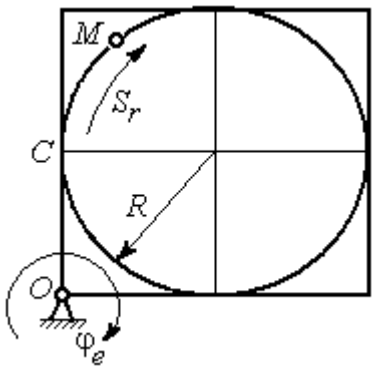



Задача 2

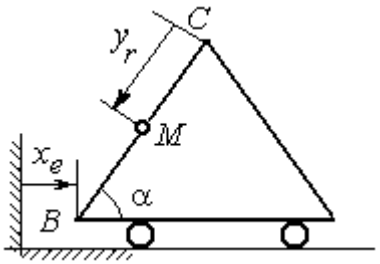



**Варианты № 8, 18, 28**

Задача 1



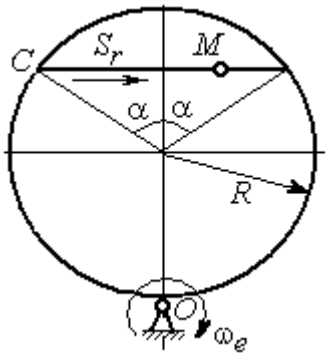

Задача 2




В момент $t = t_2$ точка $M$ прошла половину пути $CB = R$

**Варианты № 9, 19, 29**

Задача 1




Задача 2

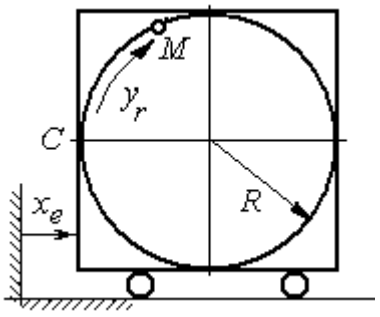



Рис. 3.4. Задание К4. Сложное движение точки.
Номера вариантов задания 7 – 9, 17 – 19, 27 – 29

*Окончание вариантов задания К4*

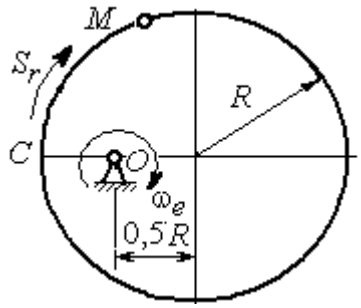
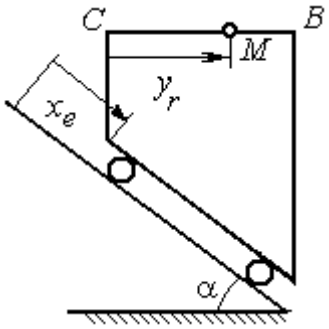
| **Варианты № 10, 20, 30** | |
|---|---|
| Задача 1 | Задача 2 |
|  |  <br>В момент $t = t_2$ точка $M$ прошла половину пути $CB = R$ |

Рис. 3.5. Задание К4. Сложное движение точки.
Номера вариантов задания 10, 20, 30

Таблица 3.1

**Исходные данные для заданий по сложному движению точки**

| Номер варианта задания | Номер задачи | $R$, см | $\alpha$, град | $C\breve{M} = S_r(t)$, см<br>$C\breve{M} = y_r(t)$, см | $\varphi_e(t)$, рад; $\omega_e(t)$, рад/с<br>$x_e(t)$, см | $t_1$, с<br>$t_2$, с |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 1 | 3 | – | $S_r = 2\pi\sin(\pi t/6)$ | $\omega_e = 4t^2$ | 1 |
| | 2 | 4 | 30 | $y_r = 4t^2$ | $x_e = 2\cos(\pi t/6)$ | – |
| **2** | 1 | 2 | – | $S_r = 4\pi\sin^2(\pi t/6)$ | $\varphi_e = 6\cos(\pi t/3)$ | 1 |
| | 2 | 3 | 60 | $y_r = t^2 + t$ | $x_e = 1 + \cos(\pi t)$ | – |
| **3** | 1 | 4 | 30 | $S_r = 2\sqrt{3}\left[t + \sin(\pi t/2)\right]$ | $\varphi_e = 4t - t^2$ | 1 |
| | 2 | 6 | – | $y_r = \pi\left[2t + \sin\pi t\right]$ | $x_e = 5t - t^2$ | 1 |
| **4** | 1 | 4 | 60 | $S_r = 2(t^3 + t)$ | $\omega_e = 6\cos(\pi t/6)$ | 1 |
| | 2 | 3 | – | $y_r = \pi\left[2t + \cos(\pi t/2)\right]$ | $x_e = t^3 - 4t$ | 1 |
| **5** | 1 | 6 | – | $S_r = 4\pi\sin^2(\pi t/6)$ | $\omega_e = 6\cos(\pi t/3)$ | 1 |
| | 2 | 2 | 30 | $y_r = t^2 + 2t$ | $x_e = t^2 - 4t$ | – |
| **6** | 1 | 6 | 60 | $S_r = t + 10\sin(\pi t/6)$ | $\varphi_e = 2t^2 - 5t$ | 1 |
| | 2 | 3 | – | $y_r = 4\pi\sin(\pi t/6)$ | $x_e = \left[1 - \cos(\pi t/4)\right]$ | 1 |
| **7** | 1 | 8 | 30 | $S_r = 2(t^3 + 3t)$ | $\omega_e = 6\cos(\pi t/6)$ | 1 |
| | 2 | 4 | 30 | $y_r = 2\pi t^2$ | $x_e = t^3 - 5t$ | 1 |

*Продолжение табл. 3.1*

| Номер варианта задания | Номер задачи | $R$, см | $\alpha$, град | $CM = S_r(t)$, см<br>$CM = y_r(t)$, см | $\varphi_e(t)$, рад; $\omega_e(t)$, рад/с<br>$x_e(t)$, см | $t_1$, с<br>$t_2$, с |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **8** | 1 | 8 | – | $S_r = 2\pi\left[t^2 + \sin\pi t\right]$ | $\varphi_e = t^2 - 5t$ | 2 |
| | 2 | 6 | 30 | $y_r = t(t+1)$ | $x_e = \cos\pi t$ | – |
| **9** | 1 | 8 | 30 | $S_r = 2t^2$ | $\omega_e = \cos(\pi t/8)$ | 2 |
| | 2 | 3 | – | $y_r = 4\pi\sin^2(\pi t/4)$ | $x_e = (3-2t)^2$ | 1 |
| **10** | 1 | 6 | – | $S_r = \pi(2t^3 + \sin\pi t)$ | $\omega_e = 5t - 2t^3$ | 1 |
| | 2 | 4 | 30 | $y_r = t^2 + 2t$ | $x_e = 1 + \cos\pi t$ | – |
| **11** | 1 | 6 | – | $S_r = 8\pi\sin(\pi t/12)$ | $\omega_e = 2 + \cos(\pi t/4)$ | 2 |
| | 2 | 6 | 60 | $y_r = 4\sin\pi t$ | $x_e = t^2 - 2t$ | – |
| **12** | 1 | 18 | – | $S_r = \pi(2t^2 + 2t)$ | $\varphi_e(t) = 3t - t^2$ | 2 |
| | 2 | 6 | 30 | $y_r = 2t^2 + t$ | $x_e = 1 + \cos(\pi t)$ | – |
| **13** | 1 | 10 | 60 | $S_r = t^3 + t$ | $\varphi_e = 6\cos(\pi t/6)$ | 2 |
| | 2 | 6 | – | $y_r = 6\pi\cos(\pi t/3)$ | $x_e = t(t+1)$ | 1 |
| **14** | 1 | 4 | 30 | $S_r = 8\sqrt{3}\sin(\pi t/12)$ | $\omega_e = (3-2t)^2$ | 2 |
| | 2 | 3 | – | $y_r = 2\pi\sin(\pi t/6)$ | $x_e = 2t^2 - 5t$ | 1 |
| **15** | 1 | 8 | – | $S_r = 4\pi\sin^2(\pi t/4)$ | $\omega_e = 2 + \cos(\pi t/4)$ | 1 |
| | 2 | 5 | 60 | $y_r = 5t + t^2$ | $x_e = \cos(\pi t/6)$ | – |
| **16** | 1 | 12 | 90 | $S_r = 3\left[t + \sin(\pi t/2)\right]$ | $\varphi_e = 2t - 3t^2$ | 1 |
| | 2 | 15 | – | $y_r = \pi(4t + t^2)$ | $x_e = 6\sin(\pi t/3)$ | 1 |
| **17** | 1 | 6 | 45 | $S_r = 3\sqrt{2}\left[t^2 + 2\sin\pi t\right]$ | $\omega_e(t) = 4t^2 - 6$ | 1 |
| | 2 | 6 | 60 | $y_r = 8\pi\sin(\pi t/12)$ | $x_e = \sqrt{2}\sin(\pi t/8)$ | 2 |
| **18** | 1 | 8 | – | $S_r = 4\pi\sqrt{2}\sin(\pi t/8)$ | $\varphi_e = 18t - 4t^2$ | 2 |
| | 2 | 8 | 60 | $y_r = 3t + 2t^2$ | $x_e = \sin\pi t$ | – |
| **19** | 1 | 8 | 60 | $S_r = 2\sqrt{3}\left[t + \sin(\pi t/2)\right]$ | $\omega_e = 5t - t^2$ | 1 |
| | 2 | 9 | – | $y_r = 6\pi\cos(\pi t/3)$ | $x_e = \cos(\pi t/6)$ | 1 |
| **20** | 1 | 4 | – | $S_r = 4\pi\sin(\pi t/6)$ | $\omega_e = 3t - 5$ | 1 |
| | 2 | 6 | 60 | $y_r = 3t + 2t^2$ | $x_e = \pi\sin\pi t$ | – |
| **21** | 1 | 3 | – | $S_r = 4\pi\sqrt{2}\sin(\pi t/8)$ | $\omega_e = 6t - 14$ | 2 |
| | 2 | 8 | 45 | $y_r = (t^2 + 3t)$ | $x_e = t + 2\sin\pi t$ | – |

*Окончание табл. 3.1*

| Номер варианта задания | Номер задачи | $R$, см | $\alpha$, град | $C\breve{M} = S_r(t)$, см<br>$C\breve{M} = y_r(t)$, см | $\varphi_e(t)$, рад; $\omega_e(t)$, рад/с<br>$x_e(t)$, см | $t_1$, с<br>$t_2$, с |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **22** | 1 | 4 | – | $S_r = 2\pi(t^2 + 2t)$ | $\varphi_e = 6\cos(\pi t/6)$ | 1 |
| | 2 | 9 | 60 | $y_r = 8\sin\pi t$ | $x_e = 5t - t^2$ | – |
| **23** | 1 | 6 | 45 | $S_r = 12\sin(\pi t/8)$ | $\varphi_e = t^2 + \cos(\pi t/4)$ | 2 |
| | 2 | 6 | – | $y_r = 6\pi[t + \sin(\pi t/6)]$ | $x_e = 5t - t^2$ | 1 |
| **24** | 1 | 6 | 45 | $S_r = 12\sin(\pi t/8)$ | $\omega_e = t + 4\cos(\pi t/4)$ | 2 |
| | 2 | 6 | – | $y_r = \pi(t^2 + 2t)$ | $x_e = 6\cos(\pi t/6)$ | 1 |
| **25** | 1 | 6 | – | $S_r = 2\pi t^2$ | $\omega_e = 3\sin(\pi t/3)$ | 1 |
| | 2 | 4 | 45 | $y_r = 2t(t + 3t)$ | $x_e = 2(t^3 - 3t)$ | – |
| **26** | 1 | 6 | 120 | $S_r = t^2 + t$ | $\varphi_e = 12\cos(\pi t/12)$ | 2 |
| | 2 | 9 | – | $y_r = \pi\sqrt{3}\sin(\pi t/3)$ | $x_e = 2(t^2 - 3t)$ | 1 |
| **27** | 1 | 10 | 60 | $S_r = \sqrt{3}(t^2 + t)$ | $\omega_e = 6\cos(\pi t/6)$ | 2 |
| | 2 | 9 | 30 | $y_r = \sqrt{3}\pi\sin(\pi t/3)$ | $x_e = t + 4\cos(\pi t/4)$ | 1 |
| **28** | 1 | 2 | – | $S_r = 6\pi\sin(\pi t/6)$ | $\varphi_e = 2t + \cos(\pi t/2)$ | 1 |
| | 2 | 6 | | $y_r = 2t + 3t^2$ | $x_e = t + \sin\pi t$ | – |
| **29** | 1 | 8 | 30 | $S_r = (t^2 + 2t)$ | $\omega_e = 6\sin(\pi t/12)$ | 2 |
| | 2 | 3 | – | $y_r = 2\pi\sqrt{3}\sin(\pi t/3)$ | $x_e = 5t - t^2$ | 1 |
| **30** | 1 | 2 | – | $\pi(t^2 + 2t)$ | $\omega_e(t) = 6\cos(\pi t/6)$ | 1 |
| | 2 | 3 | 60 | $y_r = t + t^2$ | $x_e = t + \sin\pi t$ | – |

## Пример выполнения задания К4. Сложное движение точки

**Задача 1**. Фигура, состоящая из половины диска и равнобедренного треугольника (рис. 3.6), вращается вокруг оси, перпендикулярной плоскости фигуры и проходящей через вершину *A* треугольника. Вращательное движение задается законом изменения угла поворота фигуры $\varphi_e = 5t - 2t^2$ рад.

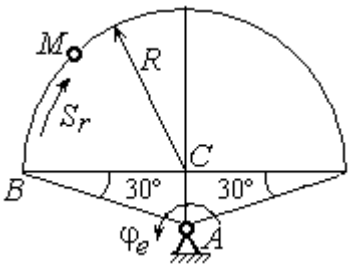


Рис. 3.6. Схема сложного движения точки

Положительное направление вращения отмечено на схеме дуговой стрелкой $\varphi_e$. По ободу диска от точки *B* движется точка *M*. Движение точки относительно диска задается законом изменения длины дуги окружности: $\overset{\cup}{BM} = S_r = 9\pi t^2$ см. Положительное направление движения точки *M* на рис. 3.6 показано дуговой стрелкой $S_r$. Радиус диска $R$ = 9 см.

Найти абсолютную скорость и абсолютное ускорение точки *M* в момент времени $t_1$ = 1с.

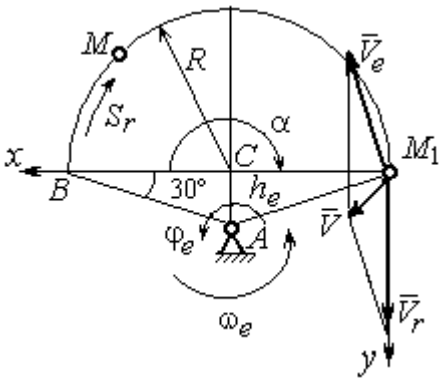


Рис. 3.7. Расчетная схема для вычисления абсолютной скорости точки при сложном движении

*Решение*

Вращение фигуры будет для точки *M* переносным движением. Относительное движение точки *M* – её движение по окружности обода диска.

Для определения **положения точки** *M* на ободе диска вычислим расстояние, которое она прошла на заданный момент времени. Длина дуги окружности, пройденной точкой за 1 с: $S_r(1) = 9\pi$ см. Положение точки *M* определяется центральным углом $\alpha = \dfrac{S_r(1)}{R} = \dfrac{9\pi}{9} = \pi$. Положение точки в момент времени $t_1$ = 1 с отмечено на рис. 3.7 точкой $M_1$.

Для определения **скорости переносного движения** точки вычисляем значение производной: $\dot{\varphi}_e = 5 - 4t$. Угловая скорость вращения фигуры: $\omega_e = |\dot{\varphi}_e|$. При $t_1$ = 1 с $\dot{\varphi}_e(1) = 1$ рад/с. Положительная величина производной $\dot{\varphi}_e(1)$ показывает,

что вращение фигуры в данный момент происходит в положительном направлении, что отмечено дуговой стрелкой $\omega_e$ на рис. 3.7.

В момент времени $t_1$ = 1 с точка $M$ находится в положении $M_1$. Скорость $V_e$ переносного движения точки в момент времени $t_1$ = 1 с $V_e(1) = \omega_e(1)h_e$, где расстояние от точки $M_1$ до оси вращения фигуры $h_e = AM_1 = \dfrac{R}{\cos 30^\circ} = 6\sqrt{3}$ см. Тогда $V_e(1) = 6\sqrt{3}$ см/с.

Вектор скорости переносного движения точки $\vec{V}_e$ перпендикулярен линии $AM_1$ и направлен в сторону вращения фигуры (см. рис. 3.7).

Относительное движение точки задано естественным способом, как закон изменения длины дуги $BM$. В этом случае **скорость относительного движения** точки $V_r = \left|\dot{S}_r\right| = \left|18\pi t\right|$. При $t_1$ = 1 с $V_r(1) = \left|\dot{S}_r(1)\right|$ = 18π = 56,5 см/с. Положительное значение производной $\dot{S}_r(1)$ указывает, что относительное движение точки в положении $M_1$ происходит в положительном направлении, указанном на рис. 3.7 дуговой стрелкой $S_r$. Вектор $\vec{V}_r$ относительной скорости точки в положении $M_1$ направлен по касательной к траектории относительного движения в сторону положительного направления движения (см. рис. 3.7).

**Абсолютную скорость точки** находим по теореме сложения скоростей $\vec{V} = \vec{V}_e + \vec{V}_r$. Направление вектора абсолютной скорости, полученное по правилу сложения векторов, показано на рис. 3.5. Для определения величины абсолютной скорости выбираем прямоугольные оси координат $M_1xy$ (см. рис. 3.7) и проецируем обе части векторного равенства теоремы сложения скоростей на эти оси. Получим:

$$V_x = V_e\cos 60^\circ = 3\sqrt{3} = 5{,}2 \text{ см/с};$$

$$V_y = -V_e\cos 30^\circ + V_r = -6\sqrt{3}\cdot\frac{\sqrt{3}}{2} + 56{,}5 = 29{,}5 \text{ см/с}.$$

Модуль абсолютной скорости: $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = \sqrt{5{,}2^2 + 29{,}5^2}$ = 29,95 см/с.

**Абсолютное ускорение точки** определяем по теореме Кориолиса, которая при вращательном переносном движении имеет вид:

$$\vec{a} = \vec{a}_r^{\,\tau} + \vec{a}_r^{\,n} + \vec{a}_e^{\,\tau} + \vec{a}_e^{\,n} + \vec{a}_{\text{к}}.$$

**Относительное касательное ускорение** $a_r^{\tau}$ вычисляется по формуле: $a_r^{\tau} = \left|\ddot{S}_r\right|$. По условию задачи вторая производная $\ddot{S}_r = 18\pi$ = 56,5 см/с$^2$ – постоянная величина. Так как значение второй производной $\ddot{S}_r$ положительно, вектор ускорения $\vec{a}_r^{\,\tau}$ направлен по касательной к траектории относительного движения в точке $M_1$ в сторону положительного направления относительного движения, отмеченного дуговой стрелкой $S_r$.

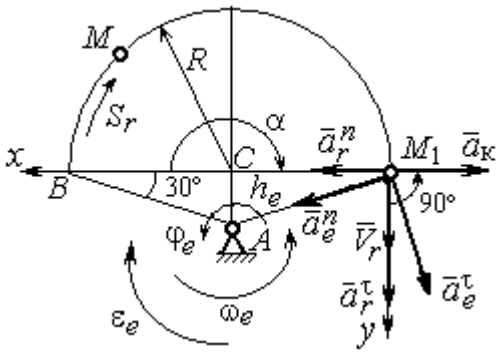


Рис. 3.8. Расчетная схема для определения абсолютного ускорения точки

**Относительное нормальное ускорение** точки вычисляется по формуле $a_r^n = \dfrac{V_r^2}{R}$ и в момент $t_1 = 1$ с равно: $a_r^n(1) = \dfrac{V_r^2(1)}{R} = \dfrac{(18\pi)^2}{9}$ = 355,3 см/с$^2$. Вектор ускорения $\vec{a}_r^{\,n}$ направлен по радиусу диска к центру $C$ (см. рис. 3.8).

**Переносное касательное ускорение** вычисляется по формуле: $a_e^{\tau} = \varepsilon_e h_e$, где угловое ускорение $\varepsilon_e = \left|\ddot{\varphi}_e\right|$. Вычислим производную $\ddot{\varphi}_e = -4$ рад/с$^2$. Угловое ускорение $\varepsilon_e = \left|\ddot{\varphi}_e\right|$ = 4 рад/с$^2$ постоянно и не зависит от времени.

Отрицательное значение производной $\ddot{\varphi}_e < 0$ при условии, что расчетная величина угловой скорости положительна: $\dot{\varphi}_e > 0$, означает, что вращательное движение замедленное и переносное угловое ускорение $\varepsilon_e$ направлено в сторону, противоположную направлению вращения.

Вектор $\vec{a}_e^{\,\tau}$ переносного касательного ускорения точки в её положении $M_1$ перпендикулярен линии $AM_1$ и направлен противоположно вектору переносной

скорости $\vec{V}_e$ (см. рис. 3.8). Модуль переносного касательного ускорения: $a_e^\tau$ = $a_e^\tau = \varepsilon_e h_e = 24\sqrt{3}$ = 41,6 см/с$^2$.

**Переносное нормальное ускорение** $a_e^n$ рассчитывается по формуле: $a_e^n = \omega_e^2 h_e$ и в момент времени $t_1$ = 1 с $a_e^n(1) = \omega_e^2(1) h_e$ = $6\sqrt{3}$ = 10,4 см/с$^2$. Вектор переносного нормального ускорения $\vec{a}_e^{\,n}$ направлен по линии $AM_1$ к оси вращения (см. рис. 3.8).

По условию задачи вектор скорости относительного движения точки $\vec{V}_r$ лежит в плоскости, перпендикулярной оси переносного вращения, то есть перпендикулярен вектору угловой скорости переносного движения $\vec{\omega}_e$. Тогда модуль **ускорения Кориолиса** при $t_1$ = 1 с $a_к = 2\omega_e V_r$ = $2 \cdot 1 \cdot 18\pi$ = 113,1 см/с$^2$.

Так как вектор относительной скорости точки $\vec{V}_r \perp \vec{\omega}_e$, то по правилу Жуковского для определения направления ускорения Кориолиса достаточно повернуть вектор относительной скорости точки $\vec{V}_r$ на 90° в сторону переносного движения вокруг оси, параллельной оси вращения и проходящей через точку $M_1$ (см. рис. 3.8). Для определения абсолютного ускорения спроецируем на прямоугольные оси $xM_1y$ (см. рис. 3.8) векторное равенство $\vec{a} = \vec{a}_r^{\,\tau} + \vec{a}_r^{\,n} + \vec{a}_e^{\,\tau} + \vec{a}_e^{\,n} + \vec{a}_к$. Получим: $a_y = a_e^\tau \cos 30^\circ + a_e^n \cos 60^\circ + a_r^\tau$ = 97,9 см/с$^2$,

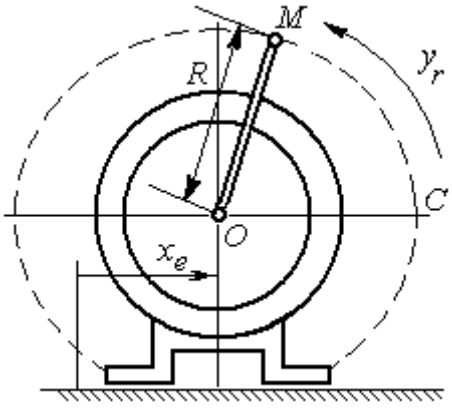


Рис. 3.9. Схема движения точки стержня, укреплённого на электромоторе

$a_x = -a_e^\tau \cos 60^\circ + a_e^n \cos 30^\circ + a_r^n - a_к$ =228,4 см/с$^2$. Модуль абсолютного ускорения: $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$ = 248,5 см/с$^2$.

**Задача 2.** К вращающемуся валу электромотора прикреплён стержень $OM$ длины $R$ = 6 см. Во время работы электромотора точка $M$ стержня из начального положения $C$ перемещается по дуге окружности согласно уравнению $CM = y_r = \pi t^2$ см.

При этом электромотор, установленный без креплений, совершает горизонтальные гармонические колебания на фундаменте по закону $x_e = 5\sin(\pi t/3)$ см. Определить абсолютное ускорение точки $M$ в момент времени $t_1 = 1$ с.

*Решение*

Точка $M$ совершает сложное движение – относительно электромотора и вместе с ним. Относительным движением точки будет её движение по дуге окружности радиуса $R$, переносным – поступательное горизонтальное, прямолинейное движение электромотора.

Найдём положение точки относительно электродвигателя в заданный момент времени. Угол $\alpha$, отсчитываемый стержнем $OM$ от начального положения $OC$, в момент времени $t_1 = 1$ с составляет $\alpha = \dfrac{y_r(t_1)}{R} = \dfrac{\pi}{6} = 30°$. Положение точки в момент времени $t_1 = 1$ с отмечено на рис. 3.10 буквой $M_1$.

Относительное движение точки задано естественным способом, как закон изменения длины дуги. Относительная скорость $V_r = \dot{y}_r = 2\pi t$. В момент времени $t_1 = 1$ с $V_r =$ 6,28 см/с. Вектор $\vec{V}_r$ относительной скорости направлен перпендикулярно стержню $OM_1$.

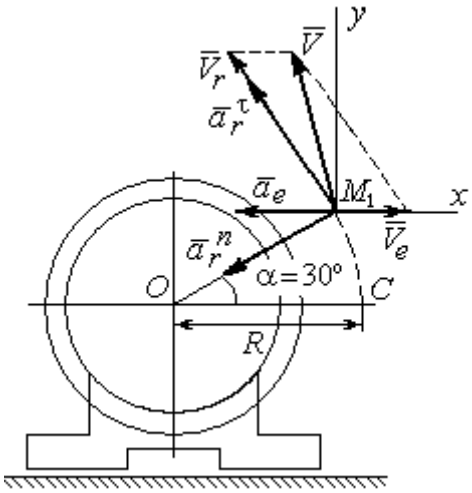



Рис. 3.10. Расчётная схема вычисления абсолютной скорости и абсолютного ускорения точки

Скорость точки в переносном движении – это скорость горизонтального движения электродвигателя:

$$V_e = \dot{x}_e = \frac{5\pi}{3}\cos(\pi t/3).$$

В момент времени $t_1 = 1$с $V_e = \dfrac{5\pi}{3}\cos 60^\circ =$ 2,62 см/с. Вектор $\vec{V}_e$ переносной скорости точки $M$ направлен параллельно линии движения электродвигателя (см. рис. 3.10).

Абсолютная скорость точки определяется на основании теоремы сложения скоростей при сложном движении: $\vec{V}_M = \vec{V}_e + \vec{V}_r$. Для того чтобы найти величину

абсолютной скорости, выберем оси $xM_1y$, как показано на рис. 3.10, и спроецируем векторное равенство сложения скоростей на эти оси. Получим: $V_{Mx} = V_e - V_r\cos 60^\circ$ = – 0,52 см/с (проекция направлена в отрицательную сторону оси $x$), $V_{My} = V_r\cos 30^\circ$ = 5,44 см/с. Модуль абсолютной скорости $V_M = \sqrt{V_{Mx}^2 + V_{My}^2}$ = 5,46 см/с. Вектор абсолютной скорости направлен по диагонали параллелограмма, построенного на векторах $\vec{V}_e$ и $\vec{V}_r$.

При поступательном переносном движении точки $\omega_e$ = 0 и потому $a_к$ = 0. Относительное ускорение точки при движении по окружности раскладывается на две составляющие $\vec{a}_r = \vec{a}_r^{\,\tau} + \vec{a}_r^{\,n}$, направленные вдоль стержня $OM$ и перпендикулярно ему. Кроме того, при прямолинейном относительном движении $a_e^n$ = 0. В результате, теорема о сложении ускорений принимает вид $\vec{a}_M = \vec{a}_r^{\,\tau} + \vec{a}_r^{\,n} + \vec{a}_e$, где модули векторов вычисляются по формулам $a_r^\tau = \dot{V}_r$, $a_r^n = \dfrac{V_r^2}{R}$, $a_e = a_e^\tau = \dot{V}_e$ = $-\dfrac{5\pi^2}{9}\sin(\pi t/3)$ и в момент времени $t_1 = 1$с равны $a_r^\tau$ = 6,28 см/с$^2$, $a_r^n$ = 6,57 см/с$^2$, $a_e$ = – 4,75 см/с$^2$. Направления векторов ускорений показаны на рис. 3.10. Для вычисления модуля абсолютного ускорения точки спроецируем векторное равенство сложения ускорений на оси выбранной ранее системы координат $xM_1y$. Получим:

$$a_{Mx} = -a_r^\tau\cos 60^\circ - a_r^n\cos 30^\circ - a_e = -4{,}08 \text{ см/с}^2;$$

$$a_{My} = a_r^\tau\cos 30^\circ - a_r^n\cos 60^\circ = 2{,}15 \text{ см/с}^2.$$

Величина абсолютного ускорения $a_M = \sqrt{a_{Mx}^2 + a_{My}^2}$ = 4,61 см/с$^2$.

# 4. ДИНАМИКА ТОЧКИ

## 4.1. Дифференциальные уравнения движения точки

Движение точки под действием системы сил $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, …, $\vec{F}_K$ в прямоугольной декартовой системе координат *Oxyz* описывается **дифференциальными уравнениями:** $m\frac{d^2x}{dt^2} = \sum F_{kx}$, $m\frac{d^2y}{dt^2} = \sum F_{ky}$, $m\frac{d^2z}{dt^2} = \sum F_{kz}$ или, обозначая вторые производные от координат по времени двумя точками, уравнениями: $m\ddot{x} = \sum F_{kx}$, $m\ddot{y} = \sum F_{ky}$, $m\ddot{z} = \sum F_{kz}$, где $m$ – масса точки; $x, y, z$ – текущие координаты точки; $\ddot{x}$, $\ddot{y}$, $\ddot{z}$ – проекции вектора ускорения точки на оси координат; $\sum F_{kx}$, $\sum F_{ky}$, $\sum F_{kz}$ – алгебраические суммы проекций сил на оси координат.

Интегрирование дифференциальных уравнений производится в зависимости от их вида методами, известными из курса математики.

## 4.2. Задание Д1. Интегрирование дифференциальных уравнений движения точки

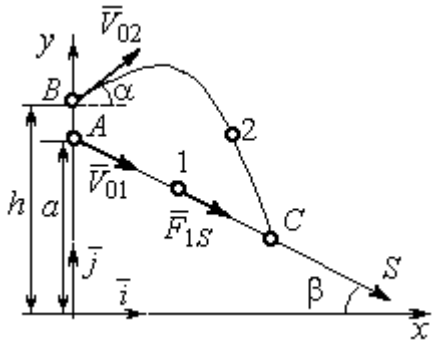
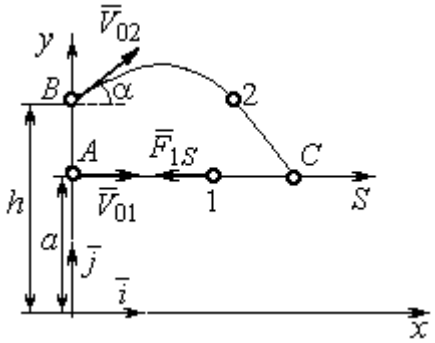
Две материальные точки движутся в вертикальной плоскости *xOy*. Точка 1 массой $m_1$, получив в начальном положении *A* скорость $V_{01}$, движется вдоль гладкой оси *AS*, наклоненной под углом $\beta$ к горизонту. Во время движения на точку 1 действуют сила тяжести и постоянная сила $\vec{F}_1$, направленная вдоль оси *AS*. Направление вектора проекции силы на ось $\vec{F}_{1S}$ показано на схеме.

Одновременно с точкой 1 начинает движение точка 2 массой $m_2$ из положения *B* на оси *y*. На точку 2 действуют сила тяжести и постоянная сила $\vec{F}_2$. Направление вектора силы $\vec{F}_2$ определяется его разложением по единичным векторам $\vec{i}$, $\vec{j}$ координатных осей *x*, *y*.

Определить величину и направление (угол $\alpha$) начальной скорости $V_{02}$ точки 2, чтобы в момент времени $t_1$ точки 1 и 2 встретились на оси *AS* в точке *C*.

Момент времени $t_1$ задаётся в условиях задачи или определяется по дополнительным условиям встречи.

Варианты заданий представлены на рис. 4.1, 4.2. Исходные данные приведены в табл. 4.1.

| **Варианты № 1, 11, 21** | **Варианты № 2, 12, 22** |
|---|---|
|  Встреча в точке $C$ в момент, когда скорость точки 1 увеличилась в 1,5 раза относительно начальной |  Встреча в точке $C$ в момент, когда точка 1 максимально удалилась от места старта |

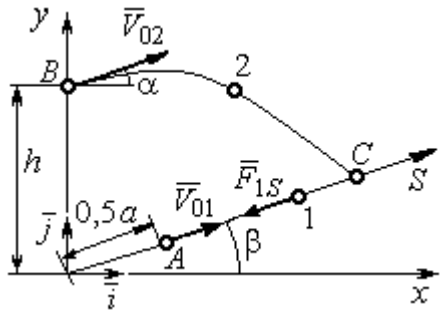
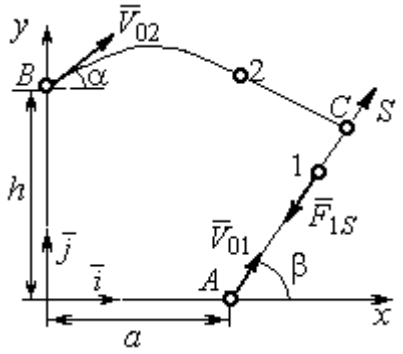
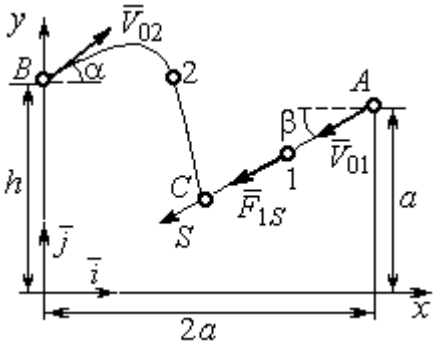
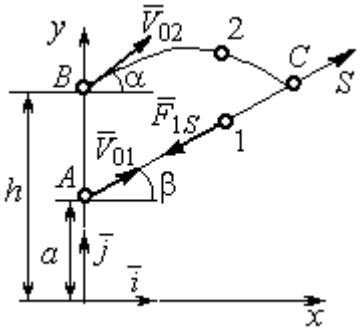
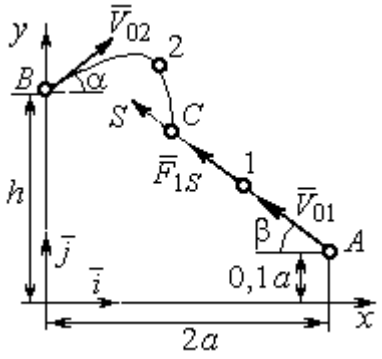
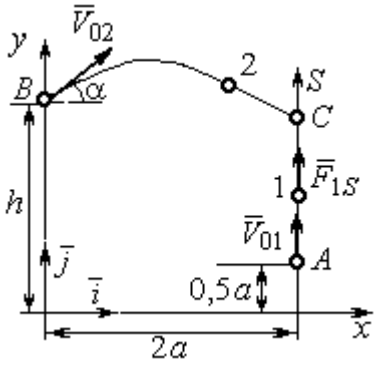
| **Варианты № 3, 13, 23** | **Варианты № 4, 14, 24** |
|---|---|
|  Встреча в точке $C$ в момент, когда скорость точки 1 уменьшилась в 2 раза относительно начальной |  Встреча в точке $C$ в момент времени $t_1 = 0{,}5$ с |

Рис. 4.1. Задание Д1. Интегрирование уравнений движения точки.
Номера вариантов задания 1 – 4, 11 – 14, 21 – 24

| **Варианты № 5, 15, 25** | **Варианты № 6, 16, 26** |
|---|---|
|  |  |
| Встреча в точке *C* в момент, когда скорость точки 1 увеличилась в 1,5 раза относительно начальной | Встреча в точке *C*, когда точка 1 максимально удалилась от места старта |

| **Варианты № 7, 17, 27** | **Варианты № 8, 18, 28** |
|---|---|
|  |  |
| Встреча в точке *C* в момент времени $t_1 = 0{,}4$ с | Встреча в точке *C* в момент максимального подъёма точки 1 |

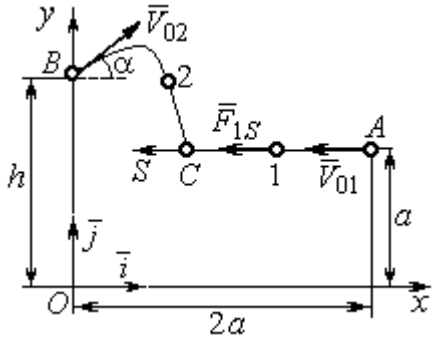
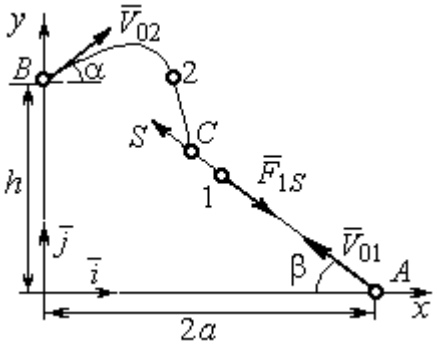
| **Варианты № 9, 19, 29** | **Варианты № 10, 20, 30** |
|---|---|
|  |  |
| Встреча в точке *C* в момент времени $t_1 = 0{,}6$ с | Встреча в точке *C* в момент, когда точка 1 достигла максимальной высоты подъёма |

Рис. 4.2. Задание Д1. Интегрирование уравнений движения точки.
Номера вариантов задания 5 – 10, 15 – 20, 25 – 30

Таблица 4.1

**Исходные данные задания Д1. Интегрирование уравнений движения точки**

| Номер варианта задания | $m_1$, кг | $F_{1S}$, Н | $V_{01}$, м/с | β, град | $m_2$, кг | $\vec{F}_2$, Н | $a$, м | $h$, м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 1 | 3 | 3 | 30 | 2 | $7\vec{i}$ | 2 | 4 |
| **2** | 3 | 6 | 2 | 0 | 2 | $4\vec{i}+12\vec{j}$ | 1,5 | 1 |
| **3** | 2 | 5 | 4 | 35 | 1,5 | $10\vec{i}+4\vec{j}$ | 2 | 2,5 |
| **4** | 1 | 10 | 2 | 60 | 2 | $4\vec{i}+8\vec{j}$ | 2,2 | 2 |
| **5** | 1 | 3 | 3 | 30 | 2 | $5\vec{i}$ | 3 | 4,5 |
| **6** | 0,8 | 6 | 6 | 50 | 3 | $3\vec{i}+12\vec{j}$ | 1,5 | 4 |
| **7** | 2 | 5 | 4,5 | 40 | 1 | $10\vec{i}+2\vec{j}$ | 3 | 2,5 |
| **8** | 1 | 2 | 3,5 | 90 | 2 | $6\vec{i}+8\vec{j}$ | 1,2 | 2 |
| **9** | 2 | 4 | 4 | 0 | 1 | $3\vec{i}+2\vec{j}$ | 2 | 2,5 |
| **10** | 1 | 3 | 3 | 55 | 1,5 | $4\vec{i}$ | 1 | 1,5 |
| **11** | 0,5 | 2 | 3 | 60 | 2 | $3\vec{i}+8\vec{j}$ | 1,5 | 2,5 |
| **12** | 0,2 | 3 | 4 | 0 | 1 | $5\vec{i}-2\vec{j}$ | 1 | 2,5 |
| **13** | 1 | 2 | 6 | 50 | 1,5 | $6\vec{i}-4\vec{j}$ | 0,8 | 2 |
| **14** | 0,5 | 6 | 4 | 35 | 1 | $3\vec{i}-2\vec{j}$ | 2,5 | 2 |
| **15** | 0,2 | 3 | 3 | 50 | 2 | $2\vec{i}-2\vec{j}$ | 3 | 4 |
| **16** | 2 | 4 | 6 | 40 | 2 | $3\vec{i}+12\vec{j}$ | 1 | 1,5 |
| **17** | 1 | 6 | 5 | 60 | 1,5 | $5\vec{i}+4\vec{j}$ | 3 | 2,5 |
| **18** | 1 | 2 | 2 | 90 | 2 | $4\vec{i}+4\vec{j}$ | 2 | 2 |
| **19** | 1 | 3 | 2 | 2 | 2 | $2\vec{i}+10\vec{j}$ | 1 | 1,5 |
| **20** | 5 | 4 | 2 | 30 | 1 | $3\vec{i}-2\vec{j}$ | 1,5 | 1,5 |
| **21** | 0,2 | 4 | 4 | 45 | 1 | $6\vec{i}-2\vec{j}$ | 1 | 3 |
| **22** | 0,4 | 3 | 2 | 0 | 2 | $4\vec{i}+6\vec{j}$ | 1,5 | 2,5 |
| **23** | 1 | 3 | 8 | 60 | 2 | $4\vec{i}+2\vec{j}$ | 1,2 | 1,5 |
| **24** | 0,5 | 8 | 3 | 30 | 2 | $6\vec{i}+7\vec{j}$ | 2 | 1,5 |
| **25** | 2 | 4 | 4 | 60 | 1 | $2\vec{i}-2\vec{j}$ | 3,5 | 4 |
| **26** | 1 | 3 | 5 | 50 | 2 | $4\vec{i}+6\vec{j}$ | 0,5 | 1,5 |
| **27** | 1,5 | 3 | 6 | 30 | 2 | $4\vec{i}+4\vec{j}$ | 2 | 2,5 |
| **28** | 2 | 5 | 3 | 90 | 2 | $6\vec{i}+7\vec{j}$ | 2 | 1,5 |
| **29** | 2 | 4 | 4 | 0 | 1 | $5\vec{i}-2\vec{j}$ | 1,5 | 2 |
| **30** | 1 | 3 | 2,5 | 70 | 2 | $4\vec{i}+6\vec{j}$ | 1 | 1 |

**Пример выполнения задания Д1. Интегрирование дифференциальных уравнений движения точки**

На рис. 4.3 представлена схема движения материальных точек в вертикальной плоскости *xOy*. Точка 1 массой $m_1 = 2$ кг, получив в начальном положении *A* скорость $V_{01} = 4$ м/с, движется вдоль гладкой оси *AS* с углом наклона $\beta = 30^{\circ}$. Во время движения на точку 1 действуют сила тяжести $\vec{P}_1$ и постоянная сила $\vec{F}_1$, проекция которой на ось *AS* равна $F_{1S} = 4{,}5$ Н. Направление вектора проекции силы $\vec{F}_{1S}$ на ось *AS* показано на рис. 4.3.

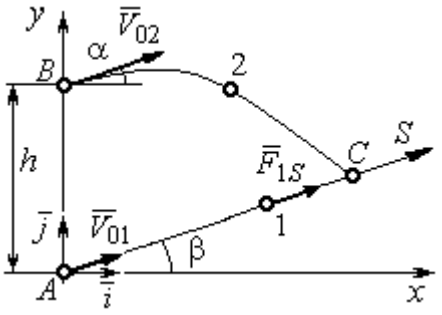


Рис. 4.3. Схема совместного движения точек

Одновременно с началом движения точки 1 из положения *B* на оси *y* высотой $h = 1$ м начинает движение точка 2 массой $m_2 = 1{,}2$ кг. На точку 2 действуют сила тяжести $\vec{P}_2$ и сила $\vec{F}_2$, направление которой определяется разложением по единичным векторам $\vec{i}$, $\vec{j}$ осей *x, y* декартовой системы координат: $\vec{F}_2 = 2{,}4\vec{i} + 4{,}5\vec{j}$, Н. Определить величину и направление (угол $\alpha$) начальной скорости $V_{02}$ точки 2, чтобы в момент времени $t_1$, когда скорость точки 1 уменьшилась в 2 раза по сравнению с начальным значением, обе они встретились на оси *AS* в точке *C*.

*Решение*

Рассмотрим движение точки 1. В текущий момент времени на точку 1 действует сила тяжести $\vec{P}_1$, нормальная реакция $\vec{N}_1$ наклонной оси *AS* и сила $\vec{F}_1$, величина проекции которой на ось *AS* равна $F_{1S}$ (рис. 4.4). Дифференциальное уравнение движения точки 1 $m_1\ddot{S} = F_{1S} - P_1\sin\beta$, или $m_1\dfrac{dV_{1S}}{dt} = 4{,}5 - m_1 g\sin\beta$. С учетом исходных данных, полагая ускорение свободного падения $g = 9{,}81$ м/с$^2$, дифференциальное уравнение движения точки 1 приводится к виду: $\dfrac{dV_{1S}}{dt} = -2{,}66$. Разделим

переменные, представив дифференциальное уравнение в виде $dV_{1S} = -2{,}66dt$. Проинтегрировав его, получим зависимость скорости точки 1 от времени: $V_{1S} = -2{,}66t + C_1$. Для того чтобы определить закон движения точки 1, представим скорость точки как производную от координаты $V_{1S} = \dfrac{dS}{dt}$. Получим дифференциальное уравнение $\dfrac{dS}{dt} = -2{,}66t + C_1$, проинтегрировав которое, найдём уравнение движения точки 1: $S = -1{,}33t^2 + C_1 t + C_2$. Константы интегрирования $C_1$, $C_2$ находятся из начальных условий: при $t = 0$, $S = 0$, $\dot{S} = V_{1S} = V_{01} = 4$ м/с. Подставляя первое из условий в уравнение движения точки 1, получим $C_2 = 0$. Подставим начальное значение скорости в уравнение $\dot{S} = -2{,}66t + C_1$, выражающее зависимость скорости точки 1 от времени. Получим $C_1 = 4$. Таким образом, движение точки 1 вдоль оси $AS$ описывается уравнением: $S = -1{,}33t^2 + 4t$.

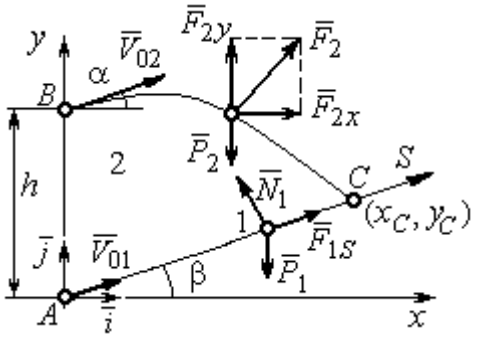


Рис. 4.4. Силы, действующие на точки 1 и 2, во время их движения

По условию задачи встреча двух точек происходит в момент времени $t_1$, когда скорость первой точки уменьшилась в 2 раза по сравнению с начальной: $V_{1S}(t_1) = \dfrac{V_{01}}{2} = 2$ м/с. Подставляя это условие в уравнение, выражающее зависимость скорости точки 1 от времени, получим: $2 = -2{,}66t_1 + 4$, откуда найдём момент времени встречи $t_1 = 0{,}75$ с. Расстояние $AC$, пройденное точкой 1 до встречи, определяется как путь, пройденный этой точкой за время $t_1 = 0{,}75$ с, $AC = S(t_1) = -1{,}33 \cdot 0{,}75^2 + 4 \cdot 0{,}75 = 2{,}25$ м. Координаты точки встречи $x_C$, $y_C$ определяются из равенств: $x_C = S(t_1)\cos 30^\circ = 1{,}95$ м; $y_C = S(t_1)\sin 30^\circ = 1{,}12$ м.

Рассмотрим движение точки 2. В текущий момент времени на нее действует сила тяжести $\vec{P}_2$ и сила $\vec{F}_2 = 2{,}4\vec{i} + 4{,}5\vec{j}$, проекции которой на оси координат

$F_{2x} = 2{,}4$ Н, $F_{2y} = 4{,}5$ Н. Дифференциальные уравнения движения точки 2 в проекциях на оси координат *x*, *y* имеют вид:

$$m_2\ddot{x} = F_{2x} = 2{,}4, \quad m_2\ddot{y} = -P_2 + F_{2y} = -m_2 g + 4{,}5,$$

или после подстановки исходных данных: $\ddot{x} = 2$, $\ddot{y} = -6{,}06$.

Представим в первом уравнении проекцию ускорения точки 2 на ось *x* как производную от соответствующей проекции скорости $\ddot{x} = \frac{dV_{2x}}{dt}$. После разделения переменных получим дифференциальное уравнение $dV_{2x} = 2dt$. Проинтегрируем его и найдем зависимость горизонтальной составляющей скорости точки 2 от времени: $V_{2x} = 2t + C_3$. Заменим в этом уравнении проекцию скорости точки на ось *x* на производную от координаты $V_{2x} = \frac{dx}{dt}$. После интегрирования получим уравнение, описывающее движение точки 2 вдоль оси *x*, $x = t^2 + C_3 t + C_4$. Для того чтобы найти постоянные $C_3$ и $C_4$, воспользуемся граничными условиями движения точки 2 – известной начальной координатой движения точки и вычисленной координатой точки встречи, то есть при $t = 0$, $x = 0$, а при $t_1 = 0{,}75$ с $x(t_1) = x_C = 1{,}95$ м. Подставляя граничные условия в уравнение движения точки 2, получим $C_4 = 0$, $C_3 = 1{,}85$. Таким образом, уравнение движения точки 2 вдоль оси *x*: $x = t^2 + 1{,}85t$.

Закон движения точки 2 вдоль оси *y* находим путем интегрирования второго дифференциального уравнения. Его представим в виде: $\frac{dV_{2y}}{dt} = -6{,}06$. После разделения переменных и первого интегрирования получим зависимость проекции скорости точки 2 на ось *y* от времени: $V_{2y} = -6{,}06t + C_5$. Заменив проекцию скорости точки 2 на ось *y* производной от координаты $V_{2y} = \frac{dy}{dt}$, вторично проинтегрируем. В результате движение точки 2 вдоль оси *y* описывается уравнением: $y = -3{,}03t^2 + C_5 t + C_6$. Для определения констант $C_5$ и $C_6$ используем граничные условия: при $t = 0$ $y(0) = h = 1$ м, а при $t_1 = 0{,}75$ с $y(t_1) = y_C = 1{,}12$ м. Получим $C_6 = 1$

, $C_5$ = 2,43. Таким образом, точка 2 движется вдоль оси $y$ по закону: $y = -3{,}03t^2 + 2{,}43t + 1$.

Проекции скорости точки 2 на оси координат как функции времени имеют вид: $V_{2x}(t) = \dot{x} = 2t + 1{,}85$, $V_{2y}(t) = \dot{y} = -6{,}06t + 2{,}43$. Значения проекций при $t$ = 0: $V_{02x} = V_{2x}(0) = 1{,}85$ м/с, $V_{02y} = V_{2y}(0) = 2{,}43$ м/с. Величина начальной скорости: $V_{02} = \sqrt{{V_{02x}}^2 + {V_{02y}}^2}$ = 3,05 м/с.

Угол наклона вектора скорости в начальный момент определяется из равенства: $\mathrm{tg}\alpha = \dfrac{V_{02y}}{V_{02x}} = \dfrac{2{,}43}{1{,}85} = 1{,}31$. Откуда $\alpha = 52{,}64^\circ$.

### 4.3. Колебания материальной точки

Силы, возникающие при отклонении материальной точки от положения равновесия и направленные так, чтобы вернуть точку в это положение, называются **восстанавливающими**. Восстанавливающие силы, линейно зависящие от расстояния от точки до положения её равновесия, называются **линейными восстанавливающими силами**. Так, сила упругости пружины $F = c\Delta\ell$, где $c$ – коэффициент жесткости (или просто жёсткость) пружины; $\Delta\ell$ – удлинение пружины, является линейной восстанавливающей силой.

Дифференциальное уравнение движения материальной точки массой $m$ вдоль оси О$x$ под действием линейной восстанавливающей силы, представляет собой уравнение гармонических колебаний и имеет вид:

$$m\ddot{x} + cx = 0, \text{ или } \ddot{x} + \omega^2 x = 0,$$

где $x$ – отклонение точки от положения равновесия, куда поместили начало координат; $\omega$ – угловая частота колебаний, $\omega^2 = \dfrac{c}{m}$. Единица измерения угловой частоты – рад/с.

Решение дифференциального уравнения свободных колебаний представляется суммой $x = C_1\cos\omega t + C_2\sin\omega t$, где постоянные интегрирования $C_1$ и $C_2$ находятся из начальных условий. **Амплитуда свободных колебаний** $A = \sqrt{C_1^2 + C_2^2}$. Промежуток времени, в течение которого точка совершает одно полное колебание, называется **периодом колебаний**: $T = \frac{2\pi}{\omega}$. Величина, обратная периоду $\nu = \frac{1}{T}$ определяет число полных колебаний точки за 1 с и называется **частотой колебаний**. Частота колебаний измеряется в герцах (Гц). Частота, равная 1 Гц, соответствует одному полному колебанию в секунду. Угловая частота связана с частотой колебаний соотношением $\omega = 2\pi\nu$.

Если на материальную точку кроме восстанавливающей силы действует сила сопротивления движению, пропорциональная скорости точки, $\vec{R} = -\mu\vec{V}$, где $\mu$ – коэффициент сопротивления, то дифференциальное уравнение движения точки с сопротивлением относительно положения равновесия имеет вид $m\ddot{x} + \mu\dot{x} + cx = 0$, или $\ddot{x} + 2n\dot{x} + \omega^2 x = 0$, где $n$ – коэффициент затухания, $n = \frac{\mu}{2m}$; $\omega$ – угловая частота собственных колебаний точки без учёта сопротивления, $\omega^2 = \frac{c}{m}$.

При $n < \omega$ движение точки представляет затухающие колебания. Общее решение дифференциального уравнения колебаний с сопротивлением $x = e^{-nt}(C_1\cos\omega_1 t + C_2\sin\omega_1 t) = Ae^{-nt}\sin(\omega_1 t + \alpha)$, где $C_1$ и $C_2$ – постоянные интегрирования; $\omega_1$ – угловая частота затухающих колебаний, $\omega_1 = \sqrt{\omega^2 - n^2}$; $A_1 = Ae^{-nt}$ – амплитуда затухающих колебаний, $A = \sqrt{C_1^2 + C_2^2}$; $\alpha$ – начальная фаза колебаний, $\mathrm{tg}\alpha = \frac{C_1}{C_2}$.

При $n > \omega$ движение точки апериодическое, затухающее. Общее решение дифференциального уравнения движения точки с таким сопротивлением имеет вид $x = e^{-nt}(C_1 e^{\omega_2 t} + C_2 e^{-\omega_2 t})$, где $\omega_2 = \sqrt{n^2 - \omega^2}$.

При $n = \omega$ движение точки происходит согласно уравнению $x = e^{-nt}(C_1 t + C_2)$.

Если кроме восстанавливающей силы на материальную точку действует переменная возмущающая сила, колебания точки называются **вынужденными.**

При действии гармонической возмущающей силы $F = H\sin pt$, где $H$, $p$ – амплитуда и угловая частота колебаний возмущающей силы, дифференциальное уравнение вынужденных колебаний материальной точки относительно положения равновесия и при отсутствии сил сопротивления имеет вид

$$m\ddot{x} + cx = H\sin pt, \text{ или } \ddot{x} + \omega^2 x = h\sin pt,$$

где $\omega$ – угловая частота собственных гармонических колебаний, $\omega^2 = \frac{c}{m}$; $h$ – относительная амплитуда возмущающей силы, $h = \frac{H}{m}$.

Общее решение неоднородного дифференциального уравнения вынужденных колебаний представляется как сумма общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного.

При отсутствии резонанса, когда частота собственных колебаний не совпадает с частотой возмущающей силы $p \neq \omega$, решение имеет вид: $x = C_1\cos\omega t + C_2\sin\omega t + \frac{h}{\omega^2 - p^2}\sin pt$, а в случае резонанса, когда $p = \omega$, – вид: $x = C_1\cos\omega t + C_2\sin\omega t - \frac{ht}{2p}\cos pt$. Значения произвольных постоянных $C_1$ и $C_2$ определяются из общего решения неоднородного уравнения с учетом начальных условий движения. Амплитуда собственных колебаний груза $A_{\text{соб}} = \sqrt{C_1^2 + C_2^2}$. Амплитуда вынужденных колебаний при отсутствии резонанса $A_{\text{вын}} = \frac{h}{\omega^2 - p^2}$.

При резонансе амплитуда вынужденных колебаний растет как линейная функция времени $A_{\text{вын}} = \dfrac{ht}{2p}$.

Если возмущающее воздействие заключается в **принудительном гармоническом колебании точки подвеса пружины**, например, по закону $S = a\sin pt$, где $a,\ p$ – амплитуда и угловая частота колебаний точки подвеса пружины, дифференциальное уравнение вынужденных колебаний материальной точки относительно положения равновесия при отсутствии сил сопротивления имеет вид $\ddot{x} + \omega^2 x = h\sin pt$, где $\omega$ – угловая частота собственных гармонических колебаний, $\omega^2 = \dfrac{c}{m}$; $h$ – относительная амплитуда возмущающего колебания, $h = \dfrac{ca}{m}$. Общее решение неоднородного дифференциального уравнения вынужденных колебаний при принудительном гармоническом колебании точки подвеса пружины может быть получено аналогично случаю возмущения гармонической силой.

Система пружин заменяется одной с эквивалентной жесткостью. Так, колебания груза на двух параллельных пружинах с коэффициентами жесткости $c_1$ и $c_2$ (рис. 4.5, *a*) можно рассматривать как колебания груза на одной пружине эквивалентной жесткости $c_{\text{экв}} = c_1 + c_2$, где $c_{\text{экв}}$ – коэффициент жесткости эквивалентной пружины. При последовательном соединении пружин (рис. 4.5, *b*) коэффициент жесткости эквивалентной пружины $c_{\text{экв}} = \dfrac{c_1 c_2}{c_1 + c_2}$. Если груз расположен между двумя пружинами (рис. 4.5, *c*), тогда $c_{\text{экв}} = c_1 + c_2$. Коэффициент жесткости эквивалентной пружины равен сумме коэффициентов жесткости пружин.

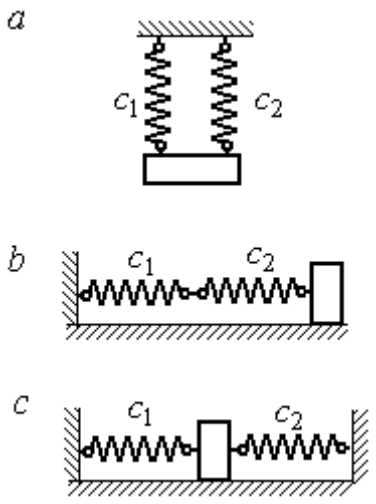



Рис. 4.5. Способы крепления груза на двух пружинах:
*a* – две параллельные пружины;
*b* – последовательно соединённые пружины; *c* – крепление груза между пружинами

### 4.4. Задание Д2. Исследование колебаний точки

Задание Д2 на исследование колебаний точки включает две задачи.

**Задача 1.** Исследование гармонических колебаний точки.

Найти уравнение движения груза массой $m_1$ (или одновременно двух грузов массой $m_1$ и $m_2$) на пружине жесткостью $c_1$ (или на двух пружинах жесткостью $c_1$ и $c_2$). Расположение грузов на пружине и описание условий, при которых начались колебания, приведено на схемах. Определить амплитуду и частоту колебаний.

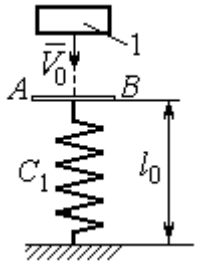
**Задача 2.** Исследование вынужденных колебаний точки.

Груз движется на пружинах, расположенных вертикально или горизонтально. При движении груза по горизонтальной поверхности трение не учитывается. Жёсткость пружин $c_1$ и $c_2$. Направление возмущающего усилия $F = F(t)$, приложенного к грузу, или возмущающего движения точки крепления пружин $S = S(t)$, а также описание условий начала колебаний приведено на схемах. В задачах, где на схемах присутствует амортизатор, создающий сопротивление движению груза, сила сопротивления пропорциональна скорости движения груза и находится по формуле: $\vec{R} = -\mu\vec{V}$ Н, где $\mu$ – коэффициент сопротивления; $V$ – скорость груза. Определить уравнение колебаний груза, амплитуды собственных и вынужденных колебаний.

Варианты заданий даны на рис. 4.6 – 4.9. Исходные данные в табл. 4.2.

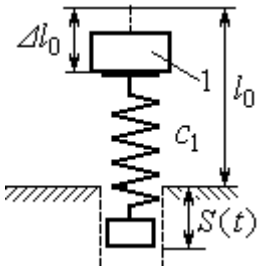
**Варианты № 1, 11, 21**

Задача 1




Невесомая пластина $AB$ укреплена на нерастянутой пружине. Груз 1, получив начальную скорость $V_0$, падает вертикально вниз. Через 1 с после начала падения груз достигает пластины и продолжает движение вместе с ней

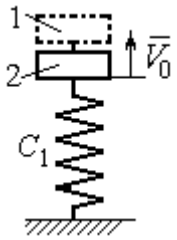
Задача 2




К верхнему концу пружины, сжатой на величину $\Delta\ell_0$, прикрепляют груз 1 и отпускают без начальной скорости. Одновременно нижний конец пружины начинает двигаться по закону $S = S(t)$

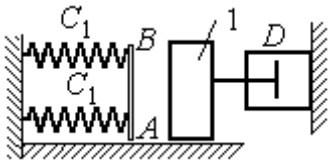
**Варианты № 2, 12, 22**

Задача 1




В положении статического равновесия двух грузов (1 и 2), установленных на пружине, груз 1 убрали, а грузу 2 сообщили скорость $V_0$, направленную вверх

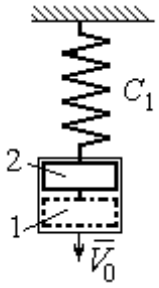
Задача 2




Груз 1 движется по гладкой горизонтальной поверхности с начальной скоростью $V_0$. Через 1 с груз упирается в площадку $AB$, укреплённую на недеформированных пружинах, соединённых параллельно, и продолжает движение вместе с ней. Во время движения (до упора в площадку $AB$ и вместе с ней) груз испытывает сопротивление, создаваемое демпфером $D$

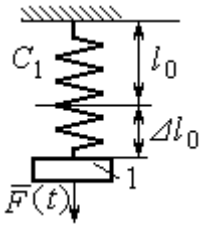
**Варианты № 3, 13, 23**

Задача 1




В положении статического равновесия груза 2, укреплённого на пружине, к нему присоединили груз 1 и оба груза толкнули вниз со скоростью $V_0$

Задача 2

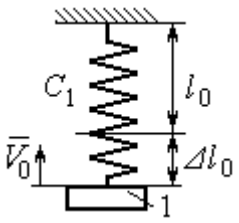



Недеформированную пружину оттянули вниз на расстояние $\Delta\ell_0$, подцепили груз 1 и отпустили без начальной скорости. Одновременно на груз стала действовать возмущающая сила $\vec{F}(t)$

Рис. 4.6. Задание Д2. Исследование колебаний точки.
Варианты задания 1 – 3, 11 – 13, 21 – 23

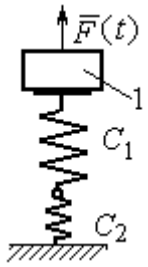
**Варианты № 4, 14, 24**

Задача 1




К недеформированной пружине подцепили груз 1, оттянули его вниз на расстояние $\Delta\ell_0$ и сообщили скорость $V_0$, направленную вверх

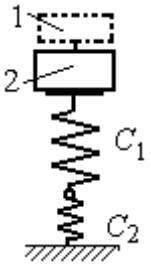
Задача 2




Грузу 1, укреплённому на двух последовательно соединённых пружинах в положении статического равновесия, сообщили начальную скорость $V_0$, направленную вниз. Одновременно на груз стала действовать возмущающая сила $\vec{F}(t)$

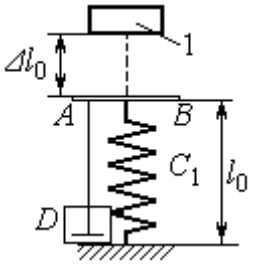
**Варианты № 5, 15, 25**

Задача 1




В положении статического равновесия грузов 1 и 2, укреплённых на двух вертикальных последовательно соединённых пружинах, убрали груз 1, а груз 2 отпустили без начальной скорости

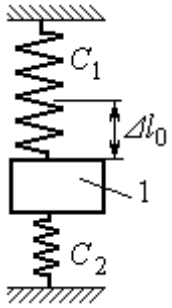
Задача 2




Груз 1 падает с высоты $\Delta\ell_0$ на площадку $AB$, установленную на недеформированной пружине, и продолжает движение вместе с ней. Демпфер $D$ создаёт сопротивление движению груза на пружине

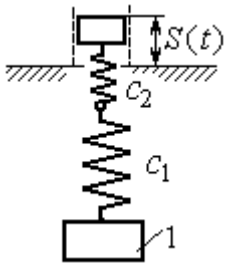
**Варианты № 6, 16, 26**

Задача 1




Груз 1 поместили между двумя недеформированными пружинами, затем оттянули вниз на расстояние $\Delta\ell_0$ и отпустили без начальной скорости

Задача 2

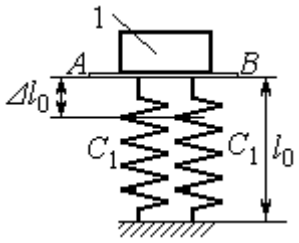



К недеформированным пружинам, соединённым последовательно, подцепили груз 1 и толкнули его вниз со скоростью $V_0$. Одновременно верхний конец пружины начинает двигаться по закону $S = S(t)$

Рис. 4.7. Задание Д2. Исследование колебаний точки.
Варианты задания 4 – 6, 14 – 16, 24 – 26

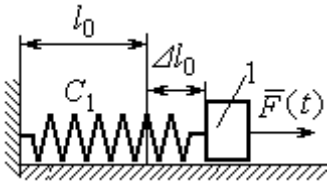
**Варианты № 7, 17, 27**

Задача 1




К недеформированным пружинам приложили груз 1, переместили его вниз на величину $\Delta\ell_0$ и сообщили скорость $V_0$, направленную вниз

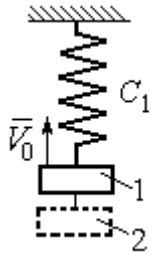
Задача 2




К нерастянутой пружине, расположенной на горизонтальной гладкой поверхности, подцепили груз 1, оттянули его на расстояние $\Delta\ell_0$ и отпустили. Одновременно на груз стала действовать горизонтальная возмущающая сила $\vec{F}(t)$

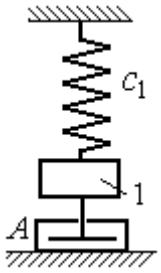
**Варианты № 8, 18, 28**

Задача 1




Грузы 1 и 2 находятся на пружине в положении статического равновесия. Груз 2 удаляют, а грузу 1 сообщают скорость $V_0$, направленную вверх

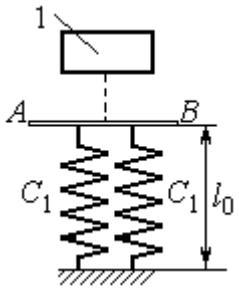
Задача 2




В положении статического равновесия груза 1 ему сообщили скорость $V_0$, направленную вниз. Демпфер $A$ создаёт сопротивление движению груза

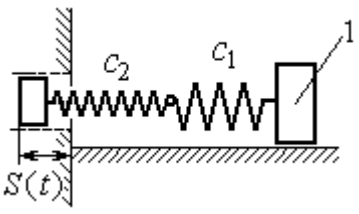
**Варианты № 9, 19, 29**

Задача 1




Груз 1 без начальной скорости падает вниз. Пройдя путь 1 м, груз достигает невесомой пластины $AB$, укреплённой на недеформированных, параллельно соединённых пружинах, и дальше движется вместе с ней

Задача 2



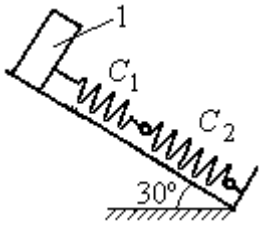

К двум горизонтальным пружинам, соединённым последовательно, в положении их нерастянутого состояния прицепили груз 1 и сообщили ему горизонтальную скорость $V_0$, направленную в сторону сжатия пружин. Одновременно левый конец пружинной системы начинает двигаться по закону $S = S(t)$

Рис. 4.8. Задание Д2. Исследование колебаний точки.
Варианты задания 7 – 9, 17 – 19, 27 – 29

*Окончание вариантов задания Д2*

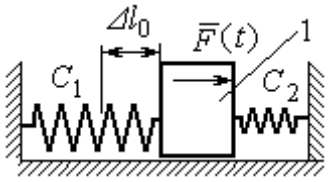
**Варианты № 10, 20, 30**

Задача 1




В положении статического равновесия груза 1, укреплённого на двух последовательно соединённых пружинах, сообщили скорость $V_0$, направленную вниз по наклонной плоскости

Задача 2




Между двумя горизонтальными недеформированными пружинами на гладкую поверхность поместили груз 1, оттянули его влево на расстояние $\Delta\ell_0$ и отпустили без начальной скорости. Одновременно на груз стала действовать возмущающая сила $\vec{F}(t)$

Рис. 4.9. Задание Д2. Исследование колебаний точки.
Варианты задания 10, 20, 30

Таблица 4.2

**Исходные данные задания Д2. Исследование колебаний точки**

| Номер варианта задания | Номер задачи | $m_1$, кг | $m_2$, кг | $V_0$, м/с | $c_1$, Н/м | $c_2$, Н/м | $\Delta\ell_0$, м | μ, Н·с/м | $F(t)$, Н | $S(t)$, м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 1 | 2,5 | – | 2,0 | 200 | – | – | – | – | – |
| | 2 | 2,0 | – | – | 210 | – | 0,1 | – | – | 0,02sin12$t$ |
| **2** | 1 | 1,5 | 2,0 | 4 | 250 | – | – | – | – | – |
| | 2 | 2,0 | – | 4 | 220 | – | – | 1,0 | – | – |
| **3** | 1 | 2,0 | 1,5 | 3 | 250 | – | – | – | – | – |
| | 2 | 1,2 | – | – | 200 | – | 0,14 | – | 12sin5$t$ | – |
| **4** | 1 | 2,0 | – | 3 | 180 | – | 0,1 | – | – | – |
| | 2 | 1,5 | – | 2 | 150 | 120 | – | – | 8sin12$t$ | – |
| **5** | 1 | 1,0 | 2,0 | – | 120 | 100 | – | – | – | – |
| | 2 | 1,0 | – | – | 50 | – | 0,5 | 18 | – | – |
| **6** | 1 | 1,2 | – | – | 120 | 180 | 0,12 | – | – | – |
| | 2 | 1,4 | – | 2,4 | 120 | 180 | – | – | – | 0,03sin14$t$ |
| **7** | 1 | 1,6 | – | 3,2 | 140 | – | 0,15 | – | – | – |
| | 2 | 1,5 | – | – | 120 | – | 0,12 | – | 12sin6$t$ | – |
| **8** | 1 | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 150 | – | – | – | – | – |
| | 2 | 2,0 | – | 3,5 | 120 | – | – | 15 | – | – |

*Продолжение табл. 4.2*

| Номер вари-анта задания | Номер задачи | $m_1$, кг | $m_2$, кг | $V_0$, м/с | $c_1$, Н/м | $c_2$, Н/м | $\Delta\ell_0$, м | μ, Н·с/м | $F(t)$, Н | $S(t)$, м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **9** | 1 | 1,5 | – | – | 100 | – | – | – | – | – |
| | 2 | 1,4 | – | 2,0 | 100 | 110 | – | – | – | 0,015sin8$t$ |
| **10** | 1 | 2,5 | – | 2,5 | 110 | 100 | – | – | – | – |
| | 2 | 2,0 | – | – | 110 | 52 | 0,08 | – | 5sin9$t$ | – |
| **11** | 1 | 2,0 | – | 4,0 | 300 | – | – | – | – | – |
| | 2 | 1,0 | – | – | 200 | – | 0,12 | – | – | 0,01sin4$t$ |
| **12** | 1 | 1,8 | 2,4 | 4 | 220 | – | – | – | – | – |
| | 2 | 1,0 | – | 5 | 240 | – | – | 0,6 | – | – |
| **13** | 1 | 1,5 | 1,5 | 2 | 200 | – | – | – | – | – |
| | 2 | 1,8 | – | – | 180 | – | 0,08 | – | 10sin10$t$ | – |
| **14** | 1 | 2,0 | – | 2 | 200 | – | 0,12 | – | – | – |
| | 2 | 2,0 | – | 2 | 150 | 120 | – | – | 10sin8$t$ | – |
| **15** | 1 | 1,5 | 2,0 | – | 120 | 250 | – | – | – | – |
| | 2 | 1,5 | – | – | 120 | – | 0,4 | 4 | – | – |
| **16** | 1 | 2,0 | – | – | 150 | 75 | 0,1 | – | – | – |
| | 2 | 2,0 | – | 2,5 | 150 | 75 | – | – | – | 0,01sin5$t$ |
| **17** | 1 | 1,5 | – | 2,1 | 160 | – | 0,11 | – | – | – |
| | 2 | 1,8 | – | – | 150 | – | 0,1 | – | 8sin12$t$ | – |
| **18** | 1 | 2,0 | 1,0 | 2,5 | 80 | – | – | – | – | – |
| | 2 | 1,5 | – | 2,5 | 50 | – | – | 21 | – | – |
| **19** | 1 | 1,6 | – | – | 120 | – | – | – | – | – |
| | 2 | 1,2 | – | 2,0 | 85 | 120 | – | – | – | 0,015sin7$t$ |
| **20** | 1 | 2,0 | – | 2,0 | 90 | 100 | – | – | – | – |
| | 2 | 2,5 | – | – | 100 | 90 | 0,12 | – | 6sin10$t$ | – |
| **21** | 1 | 2,0 | – | 1,6 | 220 | – | – | – | – | – |
| | 2 | 2,5 | – | – | 250 | – | 0,14 | – | – | 0,01sin10$t$ |
| **22** | 1 | 2,2 | 1,5 | 3 | 180 | – | – | – | – | – |
| | 2 | 1,5 | – | 4 | 280 | – | – | 0,8 | – | – |
| **23** | 1 | 2,2 | 1,2 | 2 | 220 | – | – | – | – | – |
| | 2 | 1,6 | – | – | 200 | – | 0,12 | – | 5sin7$t$ | – |

*Окончание табл. 4.2*

| Номер варианта задания | Номер задачи | $m_1$, кг | $m_2$, кг | $V_0$, м/с | $c_1$, Н/м | $c_2$, Н/м | $\Delta\ell_0$, м | μ, Н·с/м | $F(t)$, Н | $S(t)$, м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **24** | 1 | 1,6 | – | 2,4 | 160 | – | 0,13 | – | – | – |
| | 2 | 1,0 | – | 3 | 150 | 300 | – | – | 6sin10$t$ | – |
| **25** | 1 | 0,8 | 1,2 | – | 120 | 80 | – | – | – | – |
| | 2 | 0,8 | – | – | 180 | – | 0,4 | 12 | – | – |
| **26** | 1 | 1,4 | – | – | 100 | 120 | 0,15 | – | – | – |
| | 2 | 1,8 | – | 2,2 | 150 | 120 | – | – | – | 0,015sin8$t$ |
| **27** | 1 | 2 | – | 4,0 | 150 | – | 0,12 | – | – | – |
| | 2 | 2 | – | – | 162 | – | 0,13 | – | 5sin9$t$ | – |
| **28** | 1 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 140 | – | – | – | – | – |
| | 2 | 1,5 | – | 3,1 | 180 | – | – | 12 | – | – |
| **29** | 1 | 1,0 | – | – | 140 | – | – | – | – | – |
| | 2 | 2,0 | – | 2,4 | 75 | 150 | – | – | – | 0,08sin5$t$ |
| **30** | 1 | 1,6 | – | 3 | 75 | 150 | – | – | – | – |
| | 2 | 1,5 | – | 3 | 80 | 70 | 0,15 | – | 8sin10$t$ | – |

## Пример выполнения задания Д2. Исследование колебаний точки

**Задача 1.** Груз 1 весом $P = 20$ Н, лежащий на гладкой наклонной плоскости, прикреплён к недеформированной пружине, расположенной параллельно плоскости (рис. 4.10). Угол наклона плоскости к горизонту 30º, коэффициент жесткости пружины $c = 400$ Н/м. В начальный момент груз переместили вверх по наклонной плоскости (сжали пружину) на расстояние $\Delta\ell_0 = 0{,}1$ м относительно нерастянутой пружины и отпустили без начальной скорости.

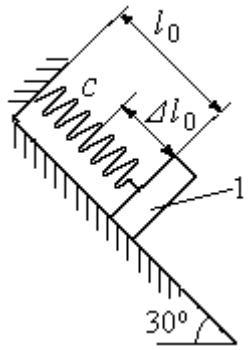


Рис. 4.10. Схема крепления груза и условия начала колебаний

Определить уравнение колебаний груза 1, а также частоту и амплитуду колебаний.

*Решение*

Расчетная схема колебаний груза 1 показана на рис. 4.11. Направим ось *Ox*, вдоль которой происходят колебания груза, вниз вдоль наклонной плоскости. Начало отсчёта координаты *x* выберем в положении статического равновесия груза (см. рис. 4.11) В произвольном положении груза, обозначенном координатой *x*, к нему приложены три силы: сила тяжести $\vec{P}$, реакция опоры наклонной плоскости $\vec{N}$ и сила упругости пружины $\vec{F}_{\text{упр}}$. Проекция силы упругости пружины на ось *Ox*: $F_{\text{упр}\,x} = -c\Delta\ell$, где $\Delta\ell$ – удлинение пружины относительно её нерастянутого положения, включающее её растяжение *x* относительно выбранного начала координат и растяжение $\lambda_{\text{ст}}$ при статическом равновесии груза на наклонной плоскости.

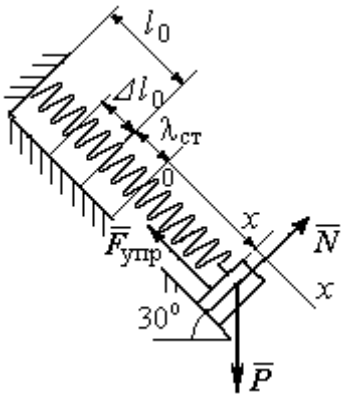


Рис. 4.11. Расчётная схема колебаний груза

С учетом выражения силы упругости получим дифференциальное уравнение движения груза в проекции на ось *Ox*:

$$m\ddot{x} = P\sin 30^\circ - c(x + \lambda_{\text{ст}}).$$

В положении статического равновесия сила упругости уравновешивается силой, равной проекции силы тяжести на ось *x*: $P\sin 30^\circ - c\lambda_{\text{ст}} = 0$. Подставляя это выражение условия статического равновесия груза в уравнение движения, получим дифференциальное уравнение колебаний груза:

$$m\ddot{x} = -cx, \text{ или } \ddot{x} + \omega^2 x = 0,$$

где $\omega$ – угловая частота колебаний; $\omega = \sqrt{\dfrac{c}{m}} = 14{,}01$ рад/с.

Общее решение уравнения колебаний $x = C_1\cos\omega t + C_2\sin\omega t$.

Для определения произвольных постоянных $C_1$ и $C_2$ вычислим координату $x_0$ начального положения груза на оси *Ox*.

Растяжение пружины в положении статического равновесия $\lambda_{ст} = \dfrac{P\sin 30^\circ}{c}$ = 0,025 м. Координата начального положения груза определяется величиной сжатия пружины и, поскольку начало отсчёта координаты *x* выбрано в положении статического равновесия груза, равна (со знаком!): $x_0 = -(\Delta\ell_0 + \lambda_{ст}) = -0{,}125$ м (см. рис. 4.11).

Подставляя значение координаты начального положения груза в общее решение уравнения колебаний при $t = 0$, получим $C_1 = -0{,}125$ м. Для определения второй константы вычислим скорость груза в произвольный момент времени: $\dot{x} = -C_1\omega\sin\omega t + C_2\omega\cos\omega t$. Подставим сюда начальное значение скорости груза при $t = 0$ $\dot{x} = V_0 = 0$, получим $C_2 = 0$. Окончательно уравнение движения груза 1 относительно положения статического растяжения пружины:

$$x(t) = -0{,}125\cos 14{,}01t \text{ м}.$$

Амплитуда колебаний груза $A = 0{,}125$ м.

**Задача 2.** Груз 1 весом $P = 20$ Н подвешен на недеформированной вертикальной пружине (рис. 4.12). Жесткость пружины $c = 800$ Н/м. В начальный момент груз был оттянут вниз в положение, при котором пружина растянулась на расстояние $\Delta\ell_0 = 0{,}1$ м, и в этом положении ему сообщена начальная скорость $V_0 = 2$ м/с, направленная вверх.

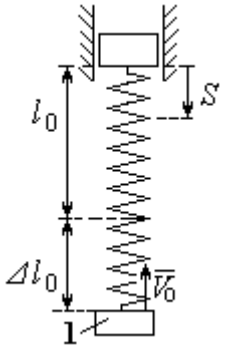


Рис. 4.12. Схема крепления груза и условия начала колебаний

Одновременно с началом движения груза верхний конец пружины стал совершать гармонические колебания по закону $S = a\sin 10t$, где $a = 0{,}02$ м.

Определить уравнение колебаний груза 1, а также частоту и амплитуду собственных колебаний.

*Решение*

Расчетная схема колебаний груза 1 показана на рис. 4.13. Направим ось *Ox*, вдоль которой происходят колебания груза, вертикально вниз. Начало отсчёта координаты *x* выберем в положении статического равновесия груза (см. рис. 4.13, *c*, *d*). В произвольном положении груза, обозначенном координатой *x*, к нему приложены две силы: сила тяжести $\vec{P}$ и сила упругости пружины $\vec{F}_{\text{упр}}$.

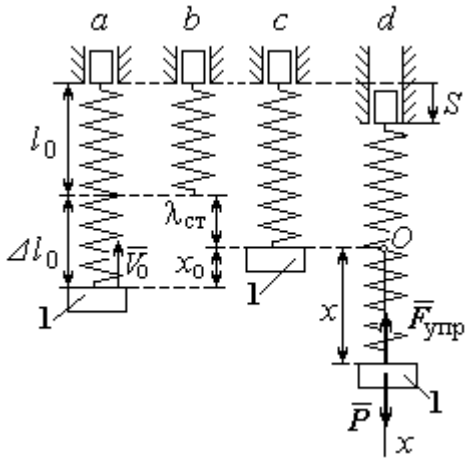



Рис. 4.13. Расчётная схема вынужденных колебаний груза: *a* – положение груза на начало колебаний; *b* – недеформированная пружина; *c* – статическое растяжение пружины под действием веса груза; *d* – положение груза в произвольный момент времени и перемещение точки подвеса пружины

Проекция силы упругости пружины на ось *Ox*

$$F_{\text{упр}\,x} = -c\Delta\ell = -c(x + \lambda_{\text{ст}} - S),$$

где $\Delta\ell$ – удлинение пружины, включающее её растяжение *x* относительно начала координат, растяжение $\lambda_{\text{ст}}$ при статическом равновесии груза и уменьшение растяжения при смещении верхнего конца, $\Delta\ell = (x + \lambda_{\text{ст}} - S)$.

С учетом выражения силы упругости получим дифференциальное уравнение движения груза в проекции на ось *Ox*:

$$m\ddot{x} = P - c(x + \lambda_{\text{ст}} - S).$$

В положении статического равновесия выполняется условие равенства сил: $P - c\lambda_{\text{ст}} = 0$.

После подстановки его в уравнение движения груза получаем дифференциальное уравнение вынужденных колебаний:

$$m\ddot{x} = -cx + cS, \text{ или } \ddot{x} + \omega^2 x = h\sin pt,$$

где $\omega$ – угловая частота собственных колебаний, $\omega = \sqrt{\frac{c}{m}}$, $\omega$ = 19,81 рад/с; $h$ – относительная амплитуда вынужденных колебаний, $h = \frac{ca}{m}$ = 7,85 м/с$^2$; $p$ – угловая частота вынужденных колебаний, $p$ = 10 рад/с.

При отсутствии резонанса (здесь $\omega \neq p$) общее решение уравнения вынужденных колебаний имеет вид $x = C_1 \cos\omega t + C_2 \sin\omega t + \frac{h}{\omega^2 - p^2} \sin pt$.

Для определения произвольных постоянных $C_1$ и $C_2$ вычислим координату $x_0$ начального положения груза на оси $Ox$. Координата начального положения груза (см. рис. 4.13, *b*) $x_0 = \Delta\ell_0 - \lambda_{ст}$. Растяжение пружины в положении статического равновесия $\lambda_{ст} = \frac{P}{c}$ = 0,02 м, тогда $x_0$ = 0,08 м. Подставляя значение координаты начального положения груза в общее решение уравнения вынужденных колебаний при $t$ = 0, получим: $C_1 = x_0$ = 0,08 м.

Для определения второй константы вычислим скорость груза в произвольный момент времени: $\dot{x} = -C_1 \omega \sin\omega t + C_2 \omega \cos\omega t + \frac{hp}{\omega^2 - p^2} \cos pt$. Проекция скорости груза в начальный момент на ось $Ox$ $V_{0x} = -V_0$. Подставив начальное значение скорости груза при $t$ = 0 $\dot{x} = V_{0x} = -V_0$, получим: $C_2 = -\frac{V_0}{\omega} - \frac{hp}{\omega(\omega^2 - p^2)} = -0{,}11$ м.

Окончательно уравнение движения груза 1 относительно положения статического равновесия, м.

$$x(t) = 0{,}08\cos 19{,}82t - 0{,}11\sin 19{,}82t - 0{,}03\sin 10t.$$

Амплитуда вынужденных колебаний $A_{вын} = \frac{h}{\omega^2 - p^2}$ = 0,03 м. Амплитуда собственных колебаний груза $A_{соб} = \sqrt{C_1^2 + C_2^2}$ = 0,14 м.

## 4.5. Теорема об изменении кинетической энергии точки

**Работой** $A(\vec{F})$ силы $\vec{F}$, постоянной по модулю и направлению, на конечном прямолинейном перемещении $S_1$ точки приложения силы называется величина $A(\vec{F}) = FS_1\cos\alpha$. Если угол $\alpha$ острый, работа силы положительна. Если угол $\alpha$ тупой, – отрицательна. При $\alpha$ = 90° сила перпендикулярна перемещению точки и работа силы равна нулю.

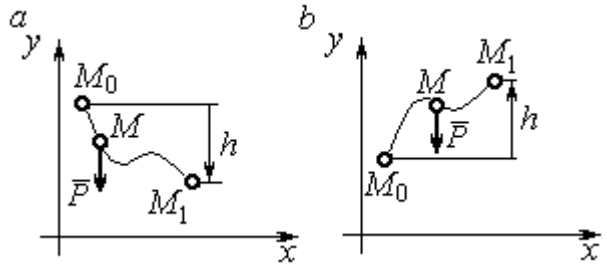



Рис. 4.14. Схема для вычисления работы силы тяжести:
*a* – перемещение точки сверху вниз;
*b* – перемещение точки снизу вверх

**Работа силы тяжести** материальной точки (вертикальной силы) при перемещении точки из положения $M_0$ в положение $M_1$ равна произведению модуля силы тяжести на вертикальное перемещение точки $A_{(M_0M_1)} = \pm Ph$, где $P$ – величина силы тяжести точки; $h$ – величина вертикального перемещения точки (рис. 4.14). Работа силы тяжести положительная, если начальная точка движения выше конечной, и отрицательная, – если ниже.

**Работа силы упругости пружины** на прямолинейном перемещении вдоль линии действия силы из положения недеформированной пружины на расстояние $h$ определяется формулой $A(F_{\text{упр}}) = -\dfrac{ch^2}{2}$, где $c$ – коэффициент жесткости (или просто жёсткость) пружины.

**Кинетической энергией материальной точки** называется скалярная величина $T = \dfrac{1}{2}mV^2$, где $m$ – масса точки; $V$ – её скорость. **Теорема об изменении кинетической энергии точки** заключается в том, что изменение кинетической энергии точки за конечный промежуток времени равно алгебраической сумме работ всех действующих на неё сил: $\dfrac{mV_1^2}{2} - \dfrac{mV_0^2}{2} = \sum A_{(M_0M_1)}$, где $V_0$, $V_1$ – скорость точки в начальном положении $M_0$ и в положении $M_1$; $\sum A_{(M_0M_1)}$ – сумма работ

всех сил, действующих на точку, при её перемещении из положения $M_0$ в положение $M_1$.

При несвободном движении точки сумма работ сил включает работу реакций связи. Если движение происходит без трения по неподвижной гладкой поверхности, то реакция связи направлена по нормали к поверхности и её работа при любом перемещении точки равна нулю.

Для определения реакций связи при несвободном движении точки используются уравнения движения точки в проекциях на оси естественной системы координат – касательную и нормальную: $m\frac{dV}{dt} = \sum F_\tau$, $m\frac{V^2}{\rho} = \sum F_n$, где $\sum F_\tau$, $\sum F_n$ – суммы проекций сил на касательную и нормальную оси естественной системы координат; $\rho$ – радиус кривизны траектории точки.

### 4.6. Задание Д3. Исследование движения точки с применением теоремы об изменении кинетической энергии

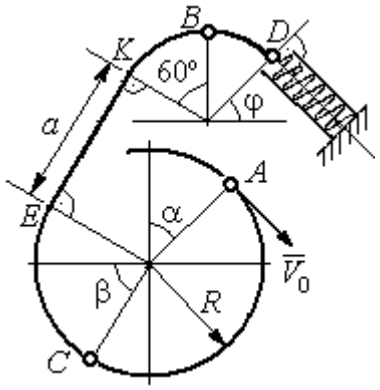
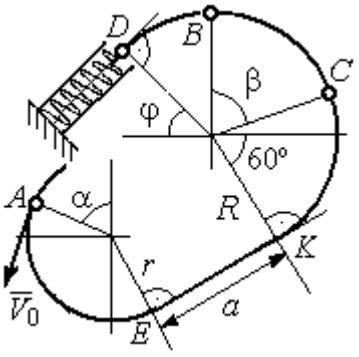
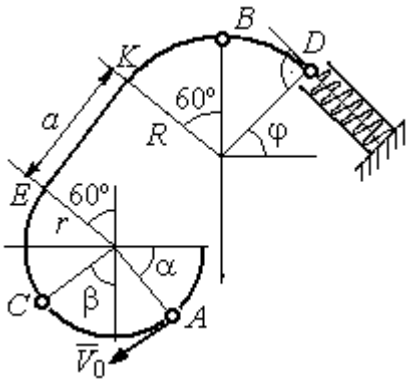
Тонкий стержень с надетым на него шариком массой $m$ расположен в вертикальной плоскости и состоит из дуг окружностей радиусами $r$ и $R = 2r$, соединённых прямолинейным отрезком $EK$, сопряжённым с дугами окружностей в точках $E$ и $K$. В этих точках шарик переходит с одного участка стержня на другой, не изменяя величины и направления скорости. Длина отрезка $EK = a$.

В точке $A$, положение которой на дуге окружности определяется углом $\alpha$, шарику сообщают начальную скорость $V_0$. По дугам окружностей шарик скользит без трения, а при движении по прямолинейному отрезку $EK$ на него действует постоянная сила трения с коэффициентом трения $f$. На участках с вертикальным отрезком $EK$ считать, что шарик прижимается к стержню силой, равной половине веса шарика.

Достигнув на дуге окружности точки $D$, шарик упирается в недеформированную пружину жёсткостью $c$ и, продолжая движение по сопряженной прямой, сжимает её. Положение точки $D$ определяется углом $\varphi$.

Определить величину максимального сжатия пружины, если шарик проходит наивысшее положении траектории – точку $B$ со скоростью $V_B = kV_0$. При найденном значении начальной скорости рассчитать давление шарика на стержень в точке $C$, положение которой на дуге определяется углом $\beta$.

Варианты заданий приведены на рис. 4.15, 4.16. Исходные данные задания в табл. 4.3.

| **Варианты № 1, 11, 21** | **Варианты № 2, 12, 22** | **Варианты № 3, 13, 23** |
|---|---|---|
|  |  |  |

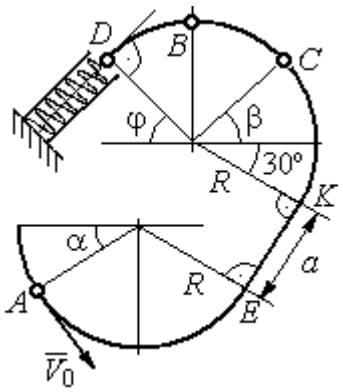
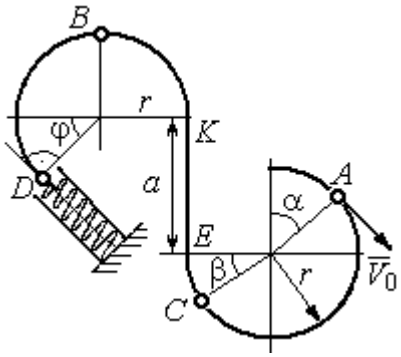
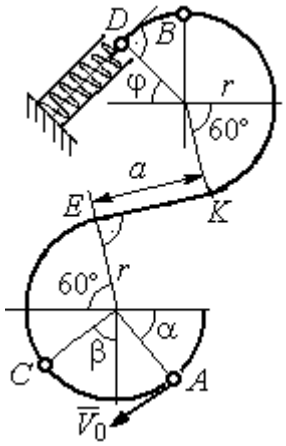
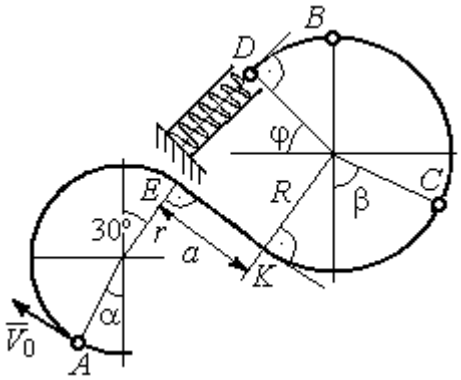
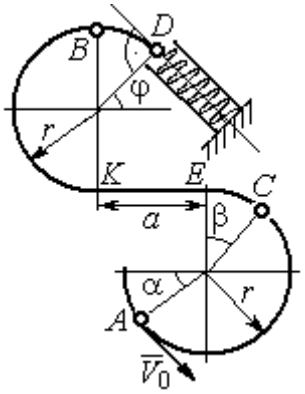
| **Варианты № 4, 14, 24** | **Варианты № 5, 15, 25** | **Варианты № 6, 16, 26** |
|---|---|---|
|  |  |  |

Рис. 4.15. Задание Д3. Исследование движения точки с применением теоремы об изменении кинетической энергии.
Номера вариантов задания 1 – 6, 11 – 16, 21 – 26

*Окончание вариантов задания Д3*

| **Варианты № 7, 17, 27** | **Варианты № 8, 18, 28** |
|---|---|
|  |  |

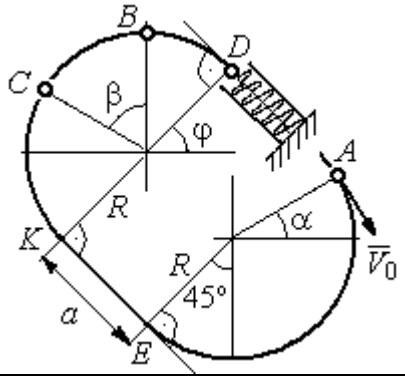
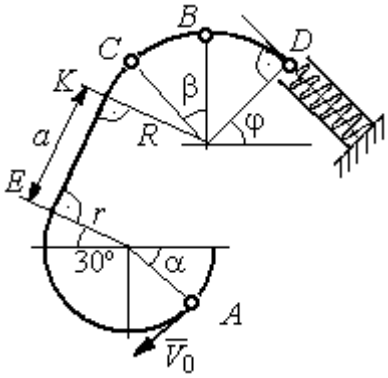
| **Варианты № 9, 19, 29** | **Варианты № 10, 20, 30** |
|---|---|
|  |  |

Рис. 4.16. Задание Д3. Исследование движения точки с применением теоремы об изменении кинетической энергии.
Номера вариантов задания 7 – 10, 17 – 20, 27 – 30

Таблица 4.3

**Исходные данные задания Д3. Исследование движения точки с применением теоремы об изменении кинетической энергии**

| Номер варианта задания | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** | **11** | **12** | **13** | **14** | **15** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *m*, кг | 0,8 | 0,5 | 0,6 | 0,4 | 1,0 | 0,6 | 0,9 | 0,5 | 0,3 | 0,4 | 0,8 | 0,6 | 0,5 | 0,3 | 1,0 |
| α, град | 30 | 45 | 0 | 30 | 30 | 0 | 0 | 45 | 30 | 0 | 60 | 30 | 30 | 45 | 60 |
| β , град | 60 | 30 | 60 | 0 | 60 | 30 | 60 | 60 | 30 | 45 | 30 | 60 | 60 | 30 | 30 |
| φ, град | 0 | 60 | 30 | 0 | 0 | 30 | 45 | 0 | 30 | 45 | 30 | 30 | 0 | 30 | 45 |
| *r*, м | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,3 | 0,6 | 0,5 | 0,3 | 0,6 | 0,4 | 0,5 | 0,3 | 0,5 | 0,4 | 0,5 | 0,8 |
| *a*, м | 0,5 | 0,6 | 0,9 | 1,4 | 0,8 | 1,2 | 0,5 | 0,5 | 1,4 | 0,5 | 0,8 | 0,5 | 0,8 | 0,6 | 0,6 |
| *f* | 0,4 | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,5 | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,3 | 0,4 | 0,3 |
| *k* | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,4 |
| *c*, Н/м | 100 | 80 | 90 | 80 | 120 | 100 | 90 | 80 | 60 | 80 | 90 | 60 | 80 | 60 | 110 |

*Окончание табл. 4.3*

| Номер варианта задания | **16** | **17** | **18** | **19** | **20** | **21** | **22** | **23** | **24** | **25** | **26** | **27** | **28** | **29** | **30** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $m$, кг | 0,6 | 0,5 | 0,6 | 0,4 | 0,8 | 0,5 | 0,4 | 1,0 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,6 | 0,8 |
| $\alpha$, град | 60 | 30 | 0 | 45 | 60 | 90 | 90 | 60 | 60 | 90 | 30 | 60 | 60 | 45 | 90 |
| $\beta$, град | 60 | 30 | 45 | 90 | 60 | 45 | 90 | 60 | 60 | 30 | 30 | 60 | 60 | 0 | 60 |
| $\varphi$, град | 45 | 60 | 60 | 60 | 30 | 90 | 0 | 90 | 45 | 60 | 60 | 90 | 30 | 60 | 0 |
| $r$, м | 0,6 | 0,4 | 0,8 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 0,4 | 0,4 | 0,8 | 0,6 | 0,4 |
| $a$, м | 0,4 | 1,2 | 0,9 | 1,2 | 1,2 | 0,9 | 0,6 | 1,5 | 1,4 | 0,8 | 1,2 | 0,9 | 0,6 | 0,8 | 0,5 |
| $f$ | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,4 |
| $k$ | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,3 |
| $c$, Н/м | 80 | 60 | 90 | 60 | 100 | 90 | 80 | 110 | 80 | 60 | 60 | 80 | 60 | 80 | 100 |

## Пример выполнения задания Д3. Исследование движения точки с применением теоремы об изменении кинетической энергии

Тонкий стержень, расположенный в вертикальной плоскости, состоит из двух дуг окружностей, сопряженных в точках $E$ и $K$ с прямолинейным отрезком $EK$ длиной $a$ = 0,6 м (рис. 4.17). Радиусы окружностей $R$ = 1 м и $r$ = 0,5 м. Диаметры дуг окружностей, проведённые в точках $E$ и $K$, составляют с горизонтом угол 30°. На стержень надет шарик массой $m$ = 0,5 кг. В точке $A$, положение которой на дуге радиуса $R$ определяется углом $\alpha$ = 60° (см. рис. 4.17), шарику сообщают начальную скорость $V_0$, после чего он начинает движение. По дугам окружностей шарик скользит без трения. При движении по прямой $EK$ на него действует постоянная сила трения с коэффициентом трения $f$ = 0,2. Достигнув точки $D$ на верхней дуге, шарик упирается в пружину жесткостью $c$ = 100 Н/м и, двигаясь по сопряжённой прямой без трения, сжимает её. Найти величину максимального сжатия пружины, если наивысшее положение на траектории (точку $B$) шарик проходит со скоростью $V_B = kV_0$ при $k$ = 0,3. При найденном значении начальной скорости рассчитать давление шарика на стержень в точке $C$, положение которой на дуге определяется углом $\beta = 90°$.

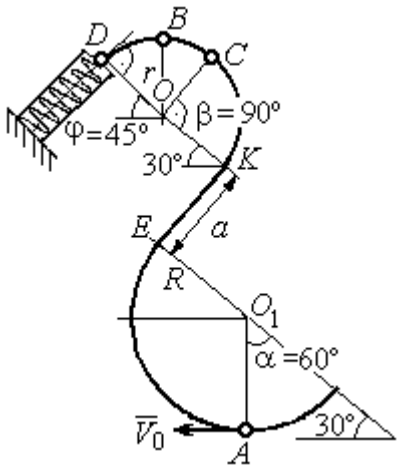


Рис. 4.17. Схема движения шарика

*Решение*

Рассмотрим движение шарика по стержню из начального положения $A$ в наивысшее положение – точку $B$.

При движении шарика по дугам окружностей работу совершает только сила тяжести. Реакция гладкой поверхности стержня в любой момент времени перпендикулярна поверхности стержня, и потому её работа при перемещении шарика равна нулю.

На участке движении шарика по прямой $EK$ на него действуют сила тяжести $\vec{P}$, нормальная реакция опоры $\vec{N}_{EK}$ и сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$ (рис. 4.18, $b$). Работу совершают сила тяжести и сила трения. Работа реакции опоры стержня равна нулю.

Обозначим $h_{(AB)}$ – перепад высот точек $A$ и $B$ на траектории; $V_A$ – начальная скорость шарика в точке $A$, $V_A = V_0$; $V_B$ – его скорость в точке $B$, $V_B = 0{,}3V_0$. Для вычисления перепада высот точек $A$ и $B$ имеем выражение (рис. 4.18, $a$):

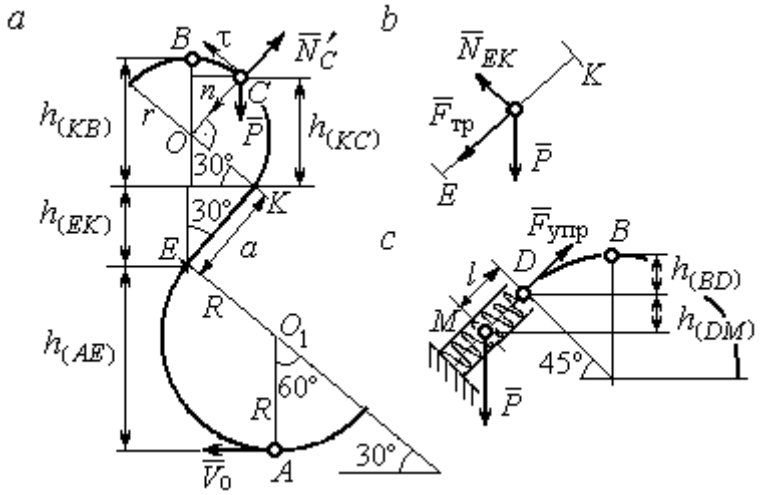



Рис. 4.18. Силы, действующие на шарик во время движения и перепады высот

$$h_{(AB)} = h_{(AE)} + h_{(EK)} + h_{(KB)} =$$

$$R(1+\sin 30^\circ) + a\cos 30^\circ +$$

$$r(1+\sin 30^\circ).$$

Будем считать шарик материальной точкой. Применяя теорему об изменении кинетической энергии точки при движении шарика из положения $A$ в положение $B$, получим: $\frac{mV_B^2}{2} - \frac{mV_A^2}{2} = A(\vec{P}) + A(\vec{F}_{\text{тр}})$, где $A(\vec{P}) = -Ph_{(AB)}$, $A(\vec{F}_{\text{тр}}) = -F_{\text{тр}}a$ – работы, соответственно, силы тяжести на участке движения $AB$ и силы трения на отрезке $EK$. Сила трения равна $F_{\text{тр}} = f \cdot N_{EK} = f \cdot mg\cos 60^\circ$ (рис. 4.18, $a$, $b$).

В результате, теорема об изменении кинетической энергии точки при движении шарика из начального положения $A$ в конечное положение $B$ принимает

вид: $\frac{m(0{,}3V_0)^2}{2} - \frac{mV_0^2}{2} = -\,mg\left[(R+r)(1+\sin 30^\circ) + a(\cos 30^\circ + f\cdot\cos 60^\circ)\right]$. После подстановки данных задачи, получим: $0{,}91V_0^2 = 55{,}517$, откуда находим необходимое значение начальной скорости шарика: $V_0$ = 7,81 м/с.

Найдём давление шарика на стержень в точке *C*.

Проведём в точке *C* оси естественной системы координат – касательную $C\tau$ и нормаль $Cn$ (рис. 4.18, *а*). Уравнение движения шарика в точке *C* в проекции на нормальную ось имеет вид: $m\frac{V_C^2}{r} = P\cos 30^\circ - N'_C$, где $V_C$ – скорость шарика в точке *C*, $N'_C$ – реакция стержня, приложенная к шарику. Направление реакции на рис. 4.18, *а* соответствует предположению, что шарик давит на стержень в направлении центра дуги окружности.

Для определения скорости шарика в точке *C* воспользуемся тем, что скорость шарика в точке *B* уже известна, и применим теорему об изменении кинетической энергии при движении шарика из начального положения *C* в конечное положение *B*. На этом участке движения работу совершает только сила тяжести шарика. Получим $\frac{mV_B^2}{2} - \frac{mV_C^2}{2} = -Ph_{(CB)}$, где $V_C$, $V_B$ – значения скорости шарика в точках *C* и *B*; $h_{(CB)}$ – перепад высот точек *C* и *B*; $h_{(CB)} = r(1-\sin 30^\circ)$ = 0,5$r$ (см. рис. 4.18, *а*). В результате теорема об изменении кинетической энергии принимает вид: $mV_C^2 = mV_B^2 + 2mgh_{(CB)}$ или $V_C^2 = V_B^2 + gr$. Отсюда, при условии $V_B$=0,3$V_0$ = 2,34 м/с, найдём $V_C$ = 3,22 м/с.

Реакция опоры шарика: $N'_C = P\cos 30^\circ - m\frac{V_C^2}{r}$ = – 6,12 Н.

Отрицательное значение реакции опоры шарика означает, что вектор реакции $\vec{N}'_C$ в точке *C* (см. рис. 4.18, *а*) направлен в противоположную сторону. Давление шарика на стержень в точке *C* равно модулю реакции опоры.

Найдём величину максимального сжатия пружины.

Рассмотрим движение шарика на участке от точки *B* до положения максимально сжатой пружины – точки *M*. Движение на этом участке происходит по дуге окружности *BD* и по прямой *DM*. При этом сила тяжести совершает работу на всём участке движения, а сила упругости – на отрезке сжатия пружины. Обозначим величину максимального сжатия пружины $MD = l$.

По теореме об изменении кинетической энергии точки при движении шарика из положения *B* в *M* получим: $\frac{mV_M^2}{2} - \frac{mV_B^2}{2} = A(\vec{P}) + A(\vec{F}_{\text{упр}})$, где $V_M$, $V_B$ – скорость шарика в точках *M* и *B*. Работа силы тяжести $A(\vec{P}) = Ph_{(BM)} =$ $= P\left[h_{(BD)} + h_{(DM)}\right] = mg\left[r\left(1 - \cos 45^\circ\right) + l\cos 45^\circ\right]$. Работа силы упругости на прямолинейном участке *DM* длиной *l*: $A(\vec{F}_{\text{упр}}) = -\frac{cl^2}{2}$. Условие максимального сжатия пружины означает, что в точке *M* скорость шарика обращается в нуль: $V_M = 0$, тогда теорема об изменении кинетической энергии точки принимает вид: $-\frac{mV_B^2}{2} = mg\left[r\left(1 - \cos 45^\circ\right) + l\cos 45^\circ\right] - \frac{cl^2}{2}$. Подставляя данные задачи и с учётом того, что скорость шарика в наивысшей точке *B* найдена из предыдущих рассуждений $V_B = 2{,}34$ м/с, получим квадратное уравнение для определения величины максимального сжатия пружины $50l^2 - 3{,}468l - 2{,}085 = 0$. В качестве ответа принимается положительный корень уравнения $l = 0{,}24$ м.

## . ДИНАМИКА МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

### 5.1. Описание движений твёрдых тел на основе общих теорем динамики системы

**Поступательное движение твердого тела** описывается теоремой о движении центра масс механической системы. В проекциях на координатные оси дифференциальные уравнения поступательного движения твердого тела имеют вид: $m\ddot{x}_C = \sum F^e_{kx}$, $m\ddot{y}_C = \sum F^e_{ky}$, $m\ddot{z}_C = \sum F^e_{kz}$, где $m$ – масса тела; $x_C, y_C, z_C$ – координаты центра масс тела; $F^e_{kx}$, $F^e_{ky}$, $F^e_{kz}$ – проекции на оси координат внешних сил, действующих на твердое тело.

**Вращательное движение твердого тела** относительно неподвижной оси $z$ описывается теоремой об изменении кинетического момента.

Дифференциальное уравнения вращательного движения тела имеет вид:

$$J_z \frac{d\omega}{dt} = \sum M_z(\vec{F}^e_k) \quad \text{или} \quad J_z\ddot{\varphi} = \sum M_z(\vec{F}^e_k),$$

где $\omega$ – угловая скорость тела; $\omega = \dot{\varphi}$; $\varphi$ – угол поворота тела; $\sum M_z(\vec{F}^e_k)$ – моменты внешних сил относительно оси $z$; $J_z$ – момент инерции тела относительно оси $z$.

Уравнение вращательного движения можно представить в алгебраической форме: $J_z\varepsilon = \sum M_z(\vec{F}^e_k)$, где $\varepsilon$ – угловое ускорение тела; $\varepsilon = \dot{\omega}$.

**Плоскопараллельное движение твердого тела** описывается на основании теорем о движении центра масс и изменении кинетического момента относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения. В проекции на координатные оси уравнения плоскопараллельного движения тела имеют вид:

$$ma_{Cx} = \sum F^e_{kx}, \quad ma_{Cy} = \sum F^e_{ky}, \quad J_{zC}\varepsilon = \sum M_{zC}(\vec{F}^e_k),$$

где $a_{Cx}$, $a_{Cy}$ – проекции ускорения центра масс тела на координатные оси; $F^e_{kx}$,

$F_{ky}^{e}$ – проекции на оси координат внешних сил, действующих на тело; $J_{zC}$ – момент инерции тела относительно оси z, проходящей через центр масс, перпендикулярно плоскости движения; $\varepsilon$ – угловое ускорение тела; $M_{zC}(\vec{F}_k^{\,e})$ – моменты внешних сил относительно оси, проходящей через центр масс.

Проводя динамический расчет механической системы, следует рассматривать движение тел системы в отдельности, предварительно освободив их от связей и заменив действие связей реакциями. Далее на основании общих теорем динамики системы следует составить уравнения движения каждого тела.

### 5.2. Задание Д4. Динамический расчет механической системы

Механизм состоит из трёх тел – груза 1, катка 2 и блока 3, соединенных нерастяжимыми нитями или невесомыми стержнями.

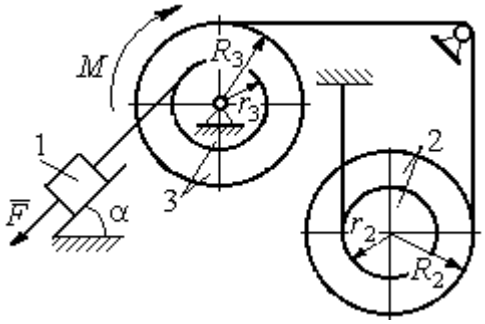
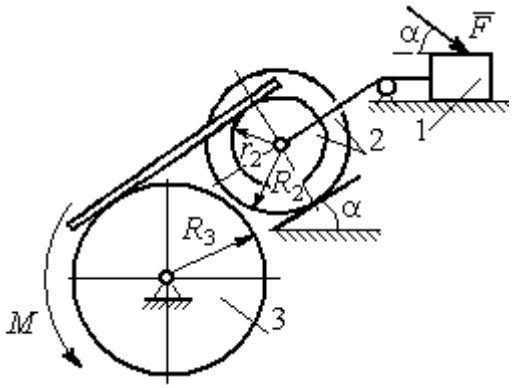
Движение механизма происходит в вертикальной плоскости под действием сил тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$, силы $\vec{F}$ и пары сил с моментом *M*. Направление действия силы $\vec{F}$ определяется углом α. Качение катка 2 происходит без скольжения. Проскальзывание между дисками и соединяющими их невесомыми стержнями или нитями отсутствует.

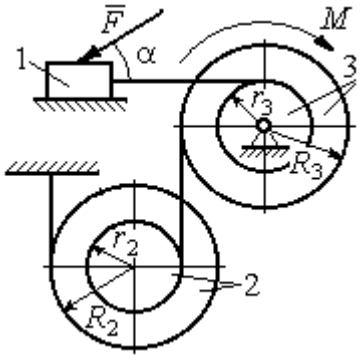
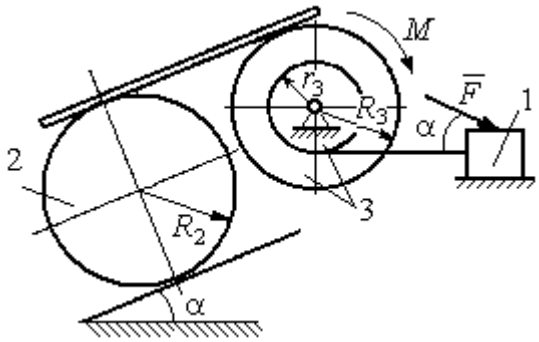
Радиусы ступеней катка 2 и блока 3 на схемах обозначены $R_2$, $r_2$ и $R_3$, $r_3$.

Сплошные диски считать однородными. Радиусы инерции неоднородных (ступенчатых) дисков относительно осей, проходящих через центры масс перпендикулярно плоскости движения, равны $i_{z2}$, $i_{z3}$.

Найти ускорение груза 1 и динамические реакции, действующие на ось блока 3.

Варианты заданий представлены на рис. 5.1, 5.2. Исходные данные приведены в табл. 5.1.

| Варианты № 1, 11, 21 | Варианты № 2, 12, 22 |
|---|---|
|  |  |

| Варианты № 3, 13, 23 | Варианты № 4, 14, 24 |
|---|---|
|  |  |

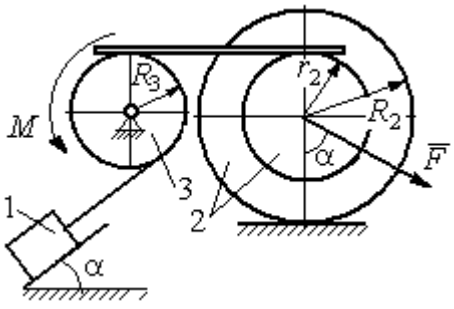
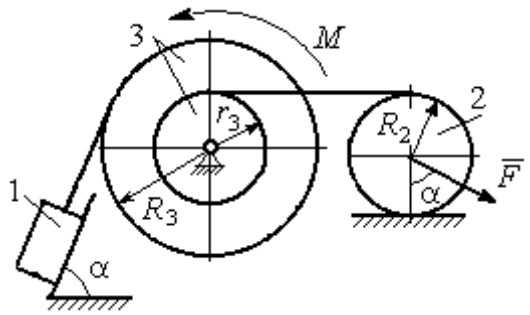
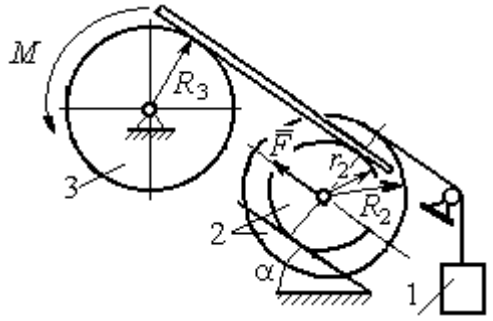
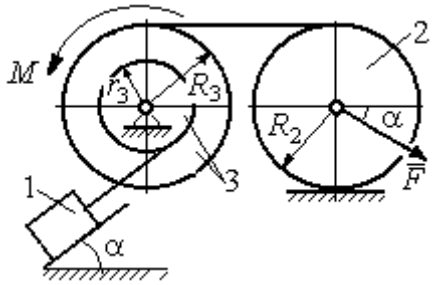
| Варианты № 5, 15, 25 | Варианты № 6, 16, 26 |
|---|---|
|  |  |

Рис. 5.1. Задание Д4. Динамический расчёт механической системы.
Номера вариантов задания 1 – 6, 11 – 16, 21 – 26

*Окончание вариантов задания Д4*

| **Варианты № 7, 17, 27** | **Варианты № 8, 18, 28** |
|---|---|
|  |  |

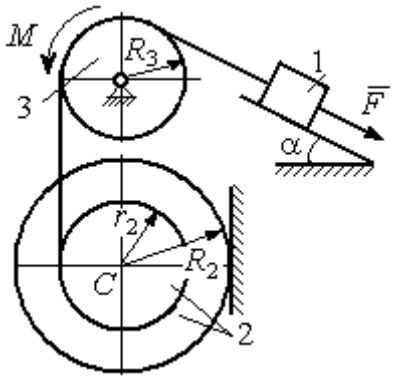
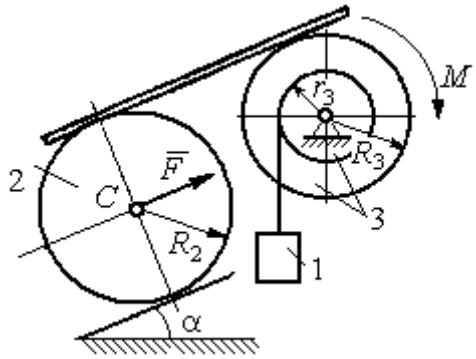
| **Варианты № 9, 19, 29** | **Варианты № 10, 20, 30** |
|---|---|
|  |  |

Рис. 5.2. Задание Д4. Динамический расчёт механической системы.
Номера вариантов задания 7 – 10, 17 – 20, 27 – 30

Таблица 5.1

**Исходные данные задания Д4. Динамический расчёт механической системы**

| Номер варианта задания | $P_1$, Н | $P_2$, Н | $P_3$, Н | $F$, Н | $M$, Н·м | $\alpha$, град | $R_2$, м | $r_2$, м | $R_3$, м | $r_3$, м | $i_{z2}$, м | $i_{z3}$, м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | $P$ | $P$ | $2P$ | $P$ | $2Pr$ | 60 | $3r$ | $r$ | $2r$ | $r$ | $2r$ | $r\sqrt{2}$ |
| **2** | $3P$ | $P$ | $3P$ | $3P$ | $Pr$ | 30 | $2r$ | $r$ | $2r$ | – | $2r$ | – |
| **3** | $4P$ | $3P$ | $4P$ | $2P$ | $2Pr$ | 60 | $2r$ | $r$ | $2r$ | $r$ | $2r$ | $2r$ |
| **4** | $2P$ | $2P$ | $4P$ | $P$ | $4Pr$ | 45 | $3r$ | – | $3r$ | $r$ | – | $r\sqrt{2}$ |
| **5** | $P$ | $3P$ | $3P$ | $2P$ | $3Pr$ | 30 | $3r$ | $r$ | $r$ | – | $2r$ | – |
| **6** | $P$ | $2P$ | $4P$ | $4P$ | $6Pr$ | 60 | $3r$ | – | $3r$ | $r$ | – | $r\sqrt{2}$ |
| **7** | $P$ | $2P$ | $3P$ | $2P$ | $3Pr$ | 45 | $3r$ | $r$ | $r$ | - | $r\sqrt{3}$ | – |

*Окончание табл. 5.1*

| Номер варианта задания | $P_1$, Н | $P_2$, Н | $P_3$, Н | $F$, Н | $M$, Н·м | $\alpha$, град | $R_2$, м | $r_2$, м | $R_3$, м | $r_3$, м | $i_{z2}$, м | $i_{z3}$, м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **8** | $2P$ | $3P$ | $3P$ | $P$ | $3Pr$ | 30 | $2r$ | – | $2r$ | $r$ | – | $r\sqrt{3}$ |
| **9** | $3P$ | $P$ | $3P$ | $P$ | $2Pr$ | 30 | $2r$ | $r$ | $2r$ | – | $r\sqrt{2}$ | – |
| **10** | $P$ | $P$ | $3P$ | $P$ | $2Pr$ | 60 | $3r$ | – | $3r$ | $r$ | – | $r\sqrt{3}$ |
| **11** | $P$ | $P$ | $3P$ | $2P$ | $3Pr$ | 30 | $3r$ | $2r$ | $2r$ | $r$ | $r\sqrt{2}$ | $r\sqrt{2}$ |
| **12** | $2P$ | $P$ | $2P$ | $4P$ | $Pr$ | 60 | $3r$ | $r$ | $3r$ | – | $r\sqrt{3}$ | – |
| **13** | $3P$ | $P$ | $3P$ | $3P$ | $2Pr$ | 30 | $3r$ | $2r$ | $2r$ | $r$ | $2r$ | $r\sqrt{2}$ |
| **14** | $2P$ | $P$ | $3P$ | $2P$ | $4Pr$ | 60 | $2r$ | – | $3r$ | $2r$ | – | $2r$ |
| **15** | $P$ | $2P$ | $4P$ | $P$ | $4Pr$ | 45 | $3r$ | $2r$ | $2r$ | – | $r\sqrt{3}$ | – |
| **16** | $P$ | $3P$ | $4P$ | $2P$ | $3Pr$ | 30 | $2r$ | – | $2r$ | $r$ | – | $r\sqrt{2}$ |
| **17** | $P$ | $P$ | $3P$ | $2P$ | $6Pr$ | 60 | $3r$ | $r$ | $3r$ | - | $r\sqrt{3}$ | |
| **18** | $2P$ | $2P$ | $3P$ | $P$ | $3Pr$ | 60 | $2r$ | – | $3r$ | $r$ | – | $r\sqrt{2}$ |
| **19** | $2P$ | $P$ | $2P$ | $3P$ | $4Pr$ | 30 | $3r$ | $r$ | $3r$ | – | $2r$ | – |
| **20** | $P$ | $P$ | $3P$ | $P$ | $2Pr$ | 45 | $2r$ | – | $2r$ | $r$ | – | $r\sqrt{3}$ |
| **21** | $2P$ | $P$ | $4P$ | $2P$ | $4Pr$ | 60 | $2r$ | $r$ | $3r$ | $r$ | $r\sqrt{2}$ | $2r$ |
| **22** | $P$ | $P$ | $2P$ | $5P$ | $2Pr$ | 45 | $3r$ | $2r$ | $2r$ | – | $2r$ | – |
| **23** | $2P$ | $2P$ | $3P$ | $3P$ | $2Pr$ | 60 | $3r$ | $r$ | $2r$ | $r$ | $2r$ | $r\sqrt{2}$ |
| **24** | $4P$ | $P$ | $3P$ | $P$ | $3Pr$ | 30 | $2r$ | – | $3r$ | $r$ | – | $r\sqrt{3}$ |
| **25** | $P$ | $3P$ | $2P$ | $P$ | $2Pr$ | 60 | $3r$ | $r$ | $r$ | – | $r\sqrt{3}$ | – |
| **26** | $P$ | $3P$ | $4P$ | $3P$ | $3Pr$ | 45 | $2r$ | – | $3r$ | $2r$ | – | $r\sqrt{3}$ |
| **27** | $P$ | $P$ | $4P$ | $2P$ | $4Pr$ | 30 | $2r$ | $r$ | $2r$ | - | $r\sqrt{3}$ | |
| **28** | $2P$ | $3P$ | $3P$ | $P$ | $6Pr$ | 30 | $2r$ | – | $3r$ | $2r$ | – | $r\sqrt{2}$ |
| **29** | $2P$ | $P$ | $2P$ | $2P$ | $2Pr$ | 45 | $2r$ | $r$ | $r$ | – | $2r$ | – |
| **30** | $P$ | $P$ | $4P$ | $P$ | $4Pr$ | 60 | $3r$ | – | $3r$ | $2r$ | – | $2r$ |

## Пример выполнения задания Д4. Динамический расчёт механической системы

Механизм (рис. 5.3) состоит из груза 1, однородного диска – катка 2 и неоднородного диска – блока 3, соединённых друг с другом нерастяжимыми нитями. Система движется в вертикальной плоскости из состояния покоя.

Движение происходит под действием сил тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$, равных по модулю: $P_1 = 2P$, $P_2 = 2P$, $P_3 = 3P$, силы $\vec{F}$, приложенной в центре масс катка 2, равной по величине: $F = 3P$, и пары сил с моментом $M = Pr$, приложенных

к блоку 3. Механизм является неизменяемой механической системой. Радиус катка 2 $R_2 = 2r$. Качение катка по наклонной плоскости происходит без проскальзывания. Радиусы ступенчатого блока 3: $R_3 = 3r$, $r_3 = r$. Радиус инерции блока 3 $i_3 = r\sqrt{3}$.

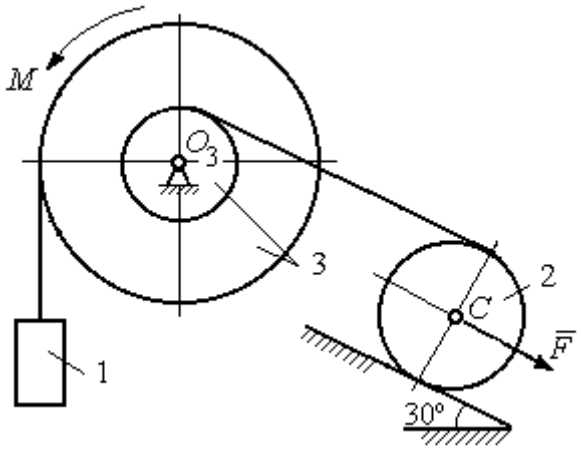


Рис. 5.3. Схема механической системы

Применяя метод динамического расчета механической системы найти ускорение груза 1 и динамические реакции, действующие на ось вращающегося блока 3.

*Решение*

Освобождаем систему от связей. На рис. 5.4 изображены внешние силы, действующие на каждое тело, после освобождения его от связей.

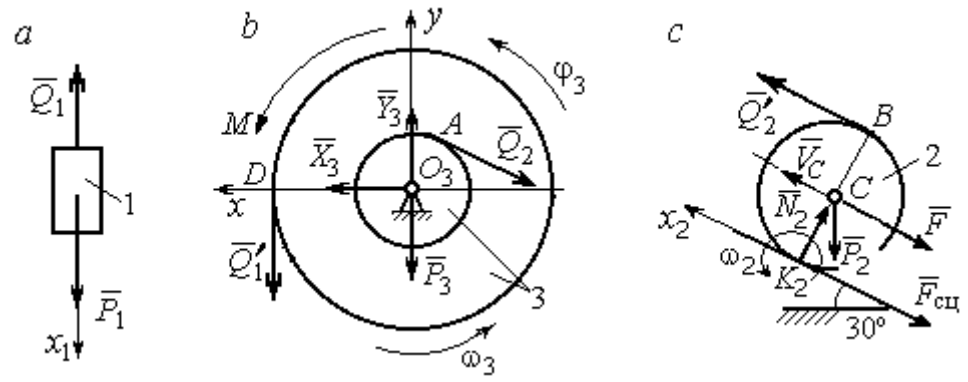


Рис. 5.4. Расчетные схемы для описания движения тел, входящих в систему:
*a* – поступательное движение груза 1; *b* – вращательное движение блока 3;
*c* – плоское движение катка 2

Груз 1 совершает поступательное движение. К нему приложены сила тяжести $\vec{P}_1$ и реакция нити $\vec{Q}_1$ (рис. 5.4, *a*). Предположим, груз 1 движется вниз, и направим ось $x_1$ в сторону движения груза.

Уравнение движения груза в проекции на ось $x_1$ в соответствии с теоремой о движении центра масс механической системы имеет вид:

$$m_1 a_1 = \sum F_{kx} = P_1 - Q_1 = 2P - Q_1,$$

где $m_1$, $a_1$ – соответственно, масса груза 1 и его ускорение, $m_1 = \frac{P_1}{g} = \frac{2P}{g}$.

Блок 3 вращается вокруг неподвижной оси *z*, проходящей через его центр масс $O_3$, перпендикулярно плоскости диска. Направление вращения блока, соответствующее выбранному движению вниз груза 1, показано на рис. 5.4, *b* дуговой стрелкой $\omega_3$.

На блок действуют сила тяжести $\vec{P}_3$, силы реакции подшипника $\vec{X}_3$, $\vec{Y}_3$, момент *M* и реакции нитей $\vec{Q}_1'$ и $\vec{Q}_2$ (см. рис. 5.4, *b*). При составлении уравнения вращательного движения блока 3 моменты сил считаем положительными, если они поворачивают блок в сторону его вращения.

Уравнение вращения блока 3 имеет вид:

$$J_{zO_3}\varepsilon_3 = \sum M_{zO_3}(F_k) = Q_1'R_3 + M - Q_2r_3 = Q_1 3r + Pr - Q_2r,$$

где $J_{zO_3}$ – момент инерции блока 3 относительно оси *z*; $\varepsilon_3$ – угловое ускорение диска 3, $J_{zO_3} = m_3 i_3^2 = \frac{P_3}{g}(r\sqrt{3})^2 = \frac{9Pr^2}{g}$.

Каток 2 совершает плоскопараллельное движение. К нему приложены сила тяжести $\vec{P}_2$, сила $\vec{F}$, реакция нити $\vec{Q}_2'$ и реакция наклонной плоскости, состоящая из нормальной реакции опоры $\vec{N}_2$ и силы сцепления катка с поверхностью $\vec{F}_{\text{сц}}$. Согласно принципу равенства действия и противодействия, модули сил $\vec{Q}_2$ и $\vec{Q}_2'$ равны. На рис. 5.4, *c* показаны направления действия сил, приложенных к диску 2. В соответствии с направлением движения груза 1, центр масс катка 2 движется вверх параллельно наклонной плоскости. Направление движения центра масс катка 2 показано направлением оси $x_2$. Направление вращения катка 2 показано дуговой стрелкой угловой скорости $\omega_2$ (см. рис 5.4, *c*).

Плоскопараллельное движение катка 2 описывается уравнением движения его центра масс и уравнением вращения вокруг оси, проходящей через центр масс, перпендикулярно плоскости диска. Составляя уравнение движения, получим:

$$m_2 a_C = Q_2' - F - F_{\text{сц}} - P_2\cos 60^\circ = Q_2 - 3P - F_{\text{сц}} - P,$$

$$J_C\varepsilon_2 = Q_2'R_2 + F_{\text{сц}}R_2 = Q_2 2r + F_{\text{сц}}2r,$$

где $m_2$ – масса катка 2, $m_2 = \frac{P_2}{g} = \frac{2P}{g}$; $a_C$, $\varepsilon_2$ – ускорение центра масс и угловое ускорение катка 2; $J_C$ – момент инерции однородного катка 2 относительно оси, проходящей через центр масс, перпендикулярно плоскости диска, $J_C = \frac{m_2 R_2^2}{2} = \frac{PR_2^2}{g} = \frac{4Pr^2}{g}$. В уравнении вращательного движения диска момент силы считается положительным, если создаваемый им поворот направлен в сторону вращения диска,

К системе четырех уравнений, описывающих движения тел в системе, необходимо добавить уравнения связей. Если предположить, что скорость центра масс катка 2 равна $V_C$, то угловая скорость катка определится по формуле: $\omega_2 = \frac{V_C}{CK_2} = \frac{V_C}{R_2}$, где $CK_2$ – расстояние от центра масс катка 2 до его мгновенного центра скоростей (см. рис. 5.4, *c*). Продифференцировав по времени последнее равенство, получим уравнение связи между ускорением центра масс катка 2 и его угловым ускорением: $\varepsilon_2 = \dot{\omega}_2 = \frac{\dot{V}_C}{R_2} = \frac{a_C}{R_2} = \frac{a_C}{2r}$.

Скорость точки $B$ катка 2 (см. рис. 5.4, *c*) $V_B = \omega_2 \cdot BK_2 = \frac{V_C}{R_2} 2R_2 = 2V_C$. Точка $B$ катка 2 и точка $A$ блока 3 соединены нитью (см. рис. 5.3), поэтому их скорости равны. Приравняв скорости точек $A$ и $B$, получим равенство: $2V_C = V_B = V_A = \omega_3 r_3 = \omega_3 r$, откуда $\omega_3 = \frac{2V_C}{r}$. После дифференцирования последнего выражения найдём соотношение между ускорениями: $\varepsilon_3 = \frac{2a_C}{r}$.

Скорость груза 1 связана со скоростью центра масс диска 2 следующим образом: $V_1 = V_D = \omega_3 R_3 = \frac{2V_C}{r} 3r = 6V_C$. Тогда $a_1 = 6a_C$.

В результате получены четыре уравнения, описывающие движение тел в системе:

$$\frac{2P}{g}a_1 = 2P - Q_1, \quad \frac{9Pr^2}{g}\varepsilon_3 = Q_1 3r + Pr - Q_2 r;$$

$$\frac{2P}{g}a_C = Q_2 - 3P - F_{\text{сц}} - P, \quad \frac{4Pr^2}{g}\varepsilon_2 = Q_2 2r + F_{\text{сц}} 2r$$

и три уравнения связей: $\varepsilon_2 = \frac{a_C}{2r}$, $\varepsilon_3 = \frac{2a_C}{r}$, $a_1 = 6a_C$.

После подстановки уравнений связи в уравнения движения тел получим систему четырёх уравнений с четырьмя неизвестными:

$$\frac{12P}{g}a_C = 2P - Q_1, \quad \frac{18P}{g}a_C = 3Q_1 + P - Q_2,$$

$$\frac{2P}{g}a_C = Q_2 - 4P - F_{\text{сц}}, \quad \frac{P}{g}a_C = Q_2 + F_{\text{сц}},$$

которая может быть решена любым известным из курса математики способом.

Например, исключив из первых двух уравнений величину $Q_1$, а из третьего и четвёртого уравнений – величину $F_{\text{сц}}$, получим систему двух уравнений с двумя неизвестными:

$$\frac{54P}{g}a_C = 7P - Q_2, \; \frac{3P}{g}a_C = 2Q_2 - 4P,$$

откуда $a_C = \frac{10}{111}g$, $Q_2 = \frac{79}{37}P$. Величину натяжения нити $Q_1$ находим из первого уравнения исходной системы: $Q_1 = \frac{34}{37}P$.

Для вычисления динамической реакции $R_3$ оси блока 3 заметим, что центр масс блока 3 неподвижен и его ускорение равно нулю, $\vec{a}_{O_3} = 0$. Тогда уравнения движения центра масс блока 3 в проекциях на оси *x*, *y* имеют вид :

$$m_3 a_{O_3 x} = X_3 - Q_2 \cos 30^\circ = 0, \; m_3 a_{O_3 y} = Y_3 - Q_1 - P_3 - Q_2 \cos 60^\circ = 0,$$

где $X_3$, $Y_3$, – проекции реакции $R_3$ оси вращающегося блока 3 на оси *x*, *y* (см. рис. 5.4, *b*). Отсюда, с учетом значений $Q_1 = 0{,}919P$ и $Q_2 = 2{,}135P$, проекции динамической реакции оси блока 3: $X_3 = Q_2 \cos 30^\circ = 1{,}85P$, $Y_3 = Q_1 + P_3 + Q_2 \cos 60^\circ =$

4,98$P$. Полная величина динамической реакции оси блока 3: $R_3 = \sqrt{X_3^2 + Y_3^2}$ = 5,31$P$.

### 5.3. Теорема об изменении кинетической энергии системы

**Кинетическая энергия тела при поступательном движении:** $T = \frac{1}{2} m V_C^2$, где $m$ – масса тела; $V_C$ – скорость центра масс тела. **Кинетическая энергия тела при вращательном движении** вокруг неподвижной оси $z$: $T = \frac{1}{2} J_z \omega^2$, где $J_z$ – момент инерции тела относительно оси $z$; $\omega$ – угловая скорость тела. Для дисков с равномерно распределённой массой момент инерции относительно оси $z$, проходящей через центр масс: $J_z = \frac{1}{2} m R^2$, где $R$ – радиус диска. Для тел с неравномерно распределённой массой $J_z = m i_z^2$, где $i_z$ – радиус инерции. **Кинетическая энергия тела при плоскопараллельном движении:** $T = \frac{1}{2} m V_C^2 + \frac{1}{2} J_{zC} \omega^2$, где $m$ – масса тела; $V_C$, $\omega$ – скорость центра масс и угловая скорость тела; $J_{zC}$ – момент инерции тела относительно оси $z$, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения.

**Работа постоянной по модулю и направлению силы** $\vec{F}$ на конечном прямолинейном перемещении $S$ точки приложения силы: $A(F) = FS\cos\alpha$, где $\alpha$ – угол между вектором силы и перемещением. Если угол $\alpha$ острый, работа положительна. Если тупой – отрицательна. При $\alpha$ = 90° сила перпендикулярна перемещению точки и работа силы равна нулю.

**Работа пары сил с постоянным моментом** $M$ при повороте тела на конечный угол $\varphi$: $A = \pm M\varphi$, где $\varphi$ – угол поворота тела. Работа считается положительной, если пара сил стремится повернуть тело в направлении его вращения, и отрицательной – в противном случае.

**Мощностью силы** $\vec{F}$ называют величину $N(F)$, равную скалярному произведению силы на скорость точки её приложения: $N(F) = \vec{F} \cdot \vec{V} = = F \cdot V\cos\alpha$, где $V$ – скорость точки приложения силы; $\alpha$ – угол между вектором силы и вектором скорости точки приложения силы.

При плоском движении тела мощность силы выражается суммой скалярных произведений векторов: $N = \vec{F} \cdot \vec{V}_O + \vec{M}_O(\vec{F}) \cdot \vec{\omega} = F \cdot V_O\cos\alpha \pm Fh_O\omega$, где $\vec{V}_O$ – вектор скорости точки, выбранной полюсом; $\vec{\omega}$ – вектор угловой скорости тела; $\vec{M}_O$ – вектор момента силы $\vec{F}$ относительно полюса; $h_O$ – плечо силы $\vec{F}$ относительно полюса $O$.

**Теорема об изменении кинетической энергии системы в дифференциальной форме.** Производная по времени от кинетической энергии системы равна сумме мощностей внешних и внутренних сил $\frac{dT}{dt} = \sum N(\vec{F}_k^e) + \sum N(\vec{F}_k^i)$, где $T$ – кинетическая энергия системы; $\sum N(\vec{F}_k^e)$, $\sum N(\vec{F}_k^i)$ – сумма мощностей, соответственно, внешних и внутренних сил.

**Теорема об изменении кинетической энергии системы на конечном перемещении**. Изменение кинетической энергии системы на её конечном перемещении равно сумме работ внешних и внутренних сил, действующих на систему $T - T_0 = \sum A(\vec{F}_k^e) + \sum A(\vec{F}_k^i)$, где $T$, $T_0$ – кинетическая энергия системы, соответственно, в текущем и начальном состояниях; $\sum A(\vec{F}_k^e)$, $\sum A(\vec{F}_k^i)$ – сумма работ внешних и внутренних сил при перемещении системы из начального состояния в текущее.

Механические системы, состоящие из абсолютно твердых тел, соединенных гибкими нерастяжимыми нитями, называются **неизменяемыми**. В неизменяемых системах сумма работ внутренних сил и, следовательно, сумма мощностей этих сил равны нулю. Поэтому для таких систем в теореме об изменении кинетической энергии достаточно учитывать только внешние силы.

## 5.4. Задание Д5. Исследование движения механической системы с применением теоремы об изменении кинетической энергии

Неизменяемая механическая система состоит из ступенчатого и однородного дисков, соединённых нерастяжимой нитью или невесомым стержнем. Нити и стержни, соединяющие диски, параллельны плоскостям качения дисков. Качение дисков без скольжения. Скольжение между невесомым стержнем и дисками отсутствует.

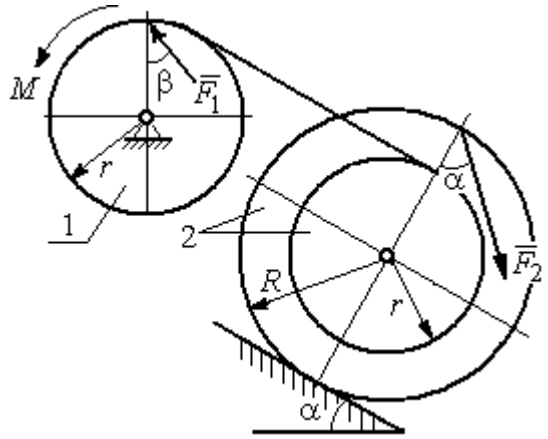
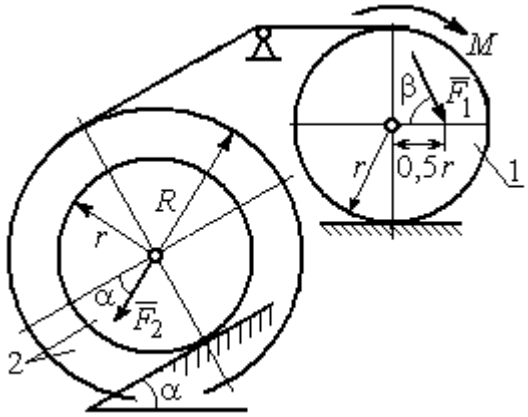
Вес дисков $P_1$ и $P_2$. Система движется в вертикальной плоскости под действием сил тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, сил $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ и пары сил с моментом $M$. Направления действия сил $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ и наклон плоскости (если он есть) определяются углами $\alpha$ или $\beta$, показанными на схемах механизмов.

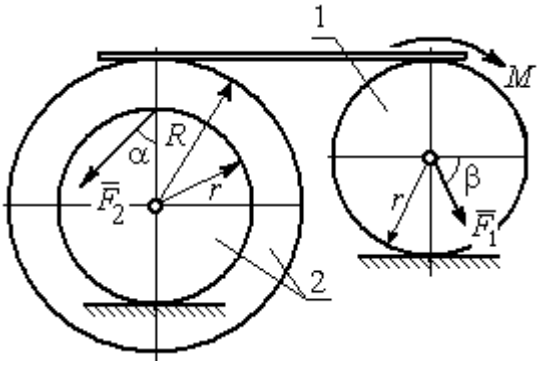
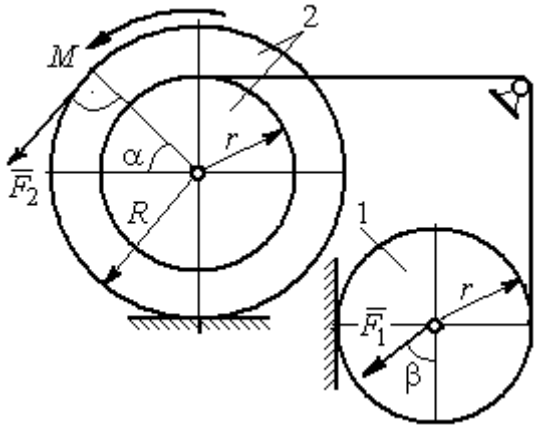
Радиус однородного диска $r$. Радиусы ступеней ступенчатого диска $R$ и $r$. Радиус инерции ступенчатого диска относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения, равен $i_z$.

1. Найти ускорение центра масс диска 2.

2. Найти реакцию опоры диска 2 на плоскость (её нормальную составляющую и силу сцепления диска с плоскостью).

Варианты задания приведены на рис. 5.5, 5.6, исходные данные представлены в табл. 5.2.

| Варианты № 1, 11, 21 | Варианты № 2, 12, 22 |
|---|---|
|  |  |

| Варианты № 3, 13, 23 | Варианты № 4, 14, 24 |
|---|---|
|  |  |

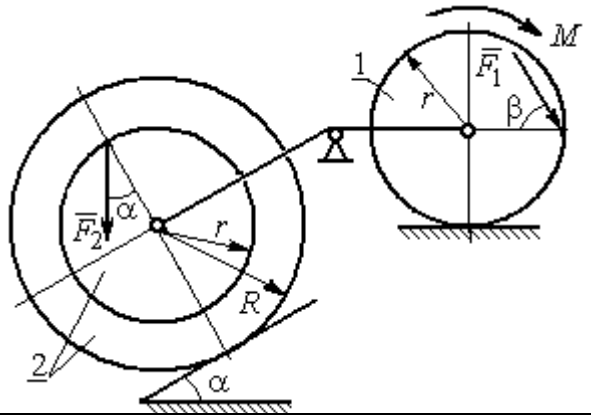
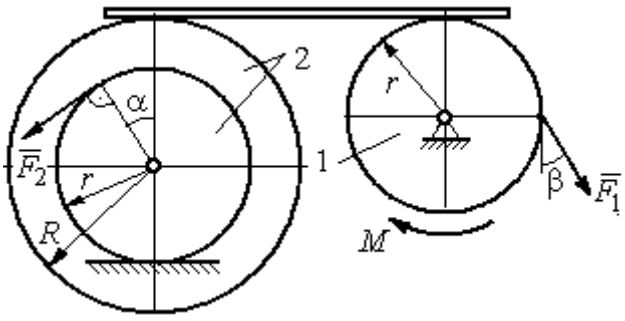
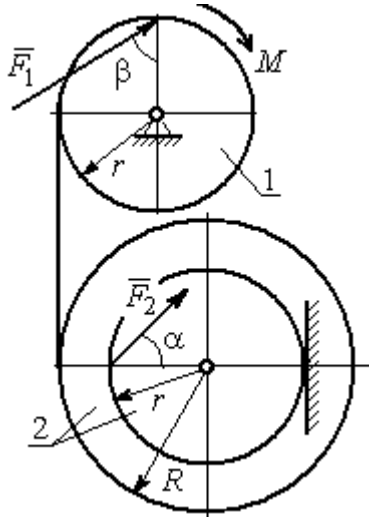
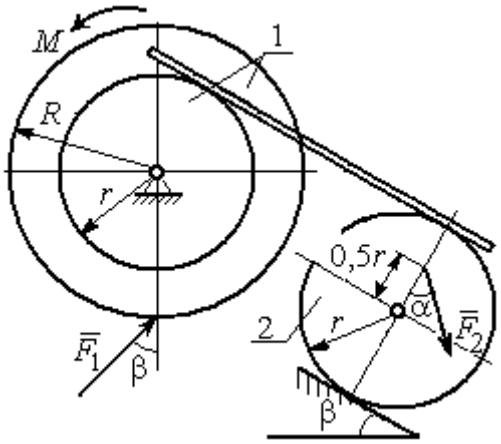
| Вариант № 5, 15, 25 | Варианты № 6, 16, 26 |
|---|---|
|  |  |

Рис. 5.5. Задание Д5. Исследование движения механической системы с применением теоремы об изменении кинетической энергии. Варианты задания 1 – 6, 11 – 16, 21 – 26

*Окончание вариантов задания Д5*

| **Варианты № 7, 17, 27** | **Варианты № 8, 18, 28** |
|---|---|
|  |  |

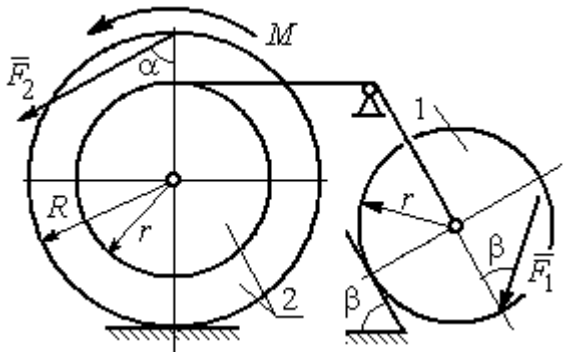
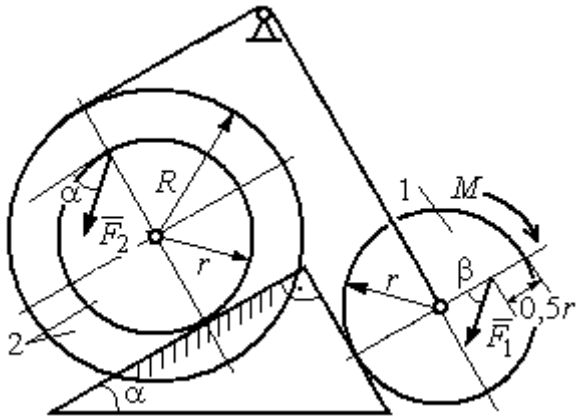
| **Варианты № 9, 19, 29** | **Варианты 10, 20, 30** |
|---|---|
|  |  |

Рис. 5.6. Задание Д5. Исследование движения механической системы с применением теоремы об изменении кинетической энергии. Варианты задания 7 – 10, 17 – 20, 27 – 30

Таблица 5.2

**Исходные данные задания Д5. Исследование движения механической системы с применением теоремы об изменении кинетической энергии**

| Номер варианта задания | $P_1$, Н | $P_2$, Н | $F_1$, Н | $F_2$, Н | $M$, Н·м | $\alpha$, град | $\beta$, град | $R$, м | $r$, м | $i_z$, м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 10 | 20 | 15 | 20 | 25 | 30 | 60 | 0,4 | 0,3 | 0,3 |
| **2** | 20 | 30 | 10 | 20 | 20 | 60 | 30 | 0,6 | 0,3 | 0,4 |
| **3** | 10 | 15 | 12 | 20 | 25 | 60 | 60 | 1,2 | 0,6 | 0,8 |
| **4** | 12 | 25 | 20 | 25 | 35 | 30 | 30 | 1,5 | 0,5 | 1,2 |

*Окончание табл. 5.2*

| Номер варианта задания | $P_1$, Н | $P_2$, Н | $F_1$, Н | $F_2$, Н | $M$, Н·м | $\alpha$, град | $\beta$, град | $R$, м | $r$, м | $i_z$, м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **5** | 15 | 20 | 10 | 20 | 30 | 60 | 30 | 0,8 | 0,4 | 0,7 |
| **6** | 18 | 20 | 18 | 22 | 22 | 45 | 60 | 1,2 | 0,4 | 0,9 |
| **7** | 15 | 25 | 10 | 8 | 20 | 45 | 45 | 0,9 | 0,6 | 0,7 |
| **8** | 25 | 22 | 10 | 12 | 30 | 45 | 60 | 1,0 | 0,8 | 0,9 |
| **9** | 12 | 25 | 18 | 10 | 32 | 30 | 30 | 0,8 | 0,6 | 0,7 |
| **10** | 10 | 15 | 8 | 10 | 28 | 60 | 30 | 1,4 | 0,7 | 1,2 |
| **11** | 15 | 22 | 20 | 25 | 30 | 60 | 45 | 0,6 | 0,4 | 0,5 |
| **12** | 20 | 25 | 15 | 40 | 30 | 30 | 60 | 0,8 | 0,4 | 0,6 |
| **13** | 10 | 20 | 10 | 25 | 30 | 45 | 30 | 1,0 | 0,5 | 0,9 |
| **14** | 12 | 15 | 18 | 15 | 25 | 30 | 30 | 0,9 | 0,3 | 0,8 |
| **15** | 20 | 25 | 20 | 20 | 30 | 45 | 60 | 1,0 | 0,5 | 0,8 |
| **16** | 10 | 15 | 10 | 15 | 16 | 60 | 45 | 1,2 | 0,4 | 1,1 |
| **17** | 18 | 25 | 12 | 10 | 30 | 30 | 30 | 1,5 | 0,9 | 1,3 |
| **18** | 25 | 20 | 10 | 15 | 20 | 60 | 60 | 0,8 | 0,5 | 0,7 |
| **19** | 12 | 25 | 10 | 10 | 32 | 60 | 60 | 1,2 | 0,9 | 1,1 |
| **20** | 15 | 20 | 8 | 20 | 25 | 30 | 45 | 0,8 | 0,4 | 0,7 |
| **21** | 10 | 25 | 25 | 15 | 30 | 45 | 30 | 0,7 | 0,5 | 0,6 |
| **22** | 18 | 20 | 20 | 20 | 35 | 60 | 45 | 1,4 | 0,7 | 0,9 |
| **23** | 10 | 15 | 10 | 30 | 30 | 30 | 30 | 1,4 | 0,7 | 0,8 |
| **24** | 10 | 15 | 12 | 20 | 20 | 30 | 30 | 1,2 | 0,4 | 0,8 |
| **25** | 12 | 18 | 20 | 18 | 30 | 60 | 30 | 1,2 | 0,6 | 1,1 |
| **26** | 10 | 12 | 12 | 15 | 15 | 30 | 30 | 0,9 | 0,3 | 0,8 |
| **27** | 15 | 22 | 10 | 12 | 20 | 45 | 60 | 0,8 | 0,6 | 0,7 |
| **28** | 22 | 20 | 8 | 16 | 8 | 30 | 45 | 0,6 | 0,2 | 0,4 |
| **29** | 18 | 25 | 10 | 8 | 32 | 60 | 60 | 1,2 | 0,8 | 1,1 |
| **30** | 20 | 25 | 8 | 20 | 28 | 30 | 30 | 0,8 | 0,4 | 0,6 |

## Пример выполнения задания Д5. Исследование движения механической системы с применением теоремы об изменении кинетической энергии

Механическая система состоит из ступенчатого и однородного дисков, соединённых невесомым стержнем (рис. 5.7). Система движется в вертикальной плоскости под действием сил тяжести, сил $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ и пары сил с моментом $M$. Направления действия сил $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ определяются углами $\alpha$ и $\beta$.

Диск 1 вращается вокруг неподвижной оси $O_1$. Диск 2 катится прямолинейно по горизонтальной поверхности. Качение диска 2 без проскальзывания. Невесомый стержень, соединяющий диски, расположен горизонтально. Скольжение между стержнем и дисками отсутствует.

Определить ускорение центра масс диска 2, угловое ускорение дисков, усилие в стержне, динамическую реакцию шарнира $O_1$, реакцию опоры диска 2 (её нормальную составляющую и силу сцепления диска с поверхностью качения), если модули сил тяжести $P_1$ = 40 Н, $P_2$ = 60 Н, модули сил $F_1$ = 80 Н, $F_2$ = 30 Н, величина момента $M$ = 35 Н·м, углы наклона сил $\alpha$ = 30°, $\beta$ = 45°, радиусы дисков $R$ = 0,8 м, $r$ = 0,6 м, радиус инерции диска 2 $i_z$ = 0,4 м.

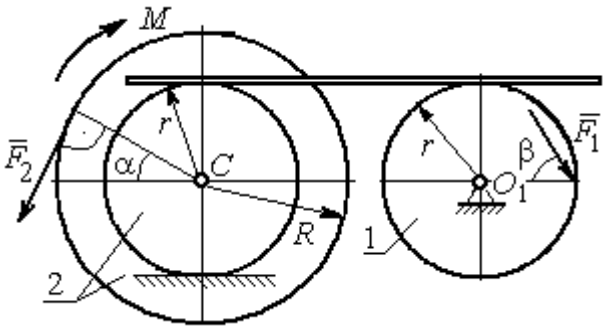


Рис. 5.7. Схема движения механической системы

*Решение*

Предположим, что во время движения системы диск 1 вращается по ходу часовой стрелки. Угловые скорости $\omega_1$ и $\omega_2$ дисков 1 и 2 и скорость центра масс диска 2 показаны на рис. 5.8.

На диск 1 действуют силы: $\vec{F}_1$, сила тяжести $\vec{P}_1$ и реакция шарнира $O_1$, разложенная на составляющие $\vec{X}_1$, $\vec{Y}_1$. На диск 2: сила $\vec{F}_2$, сила тяжести $\vec{P}_2$, пара сил с моментом $M$, нормальная реакция опоры $\vec{N}$ и сила сцепления диска 2 с поверхностью $\vec{F}_{\text{сц}}$. Направления действия сил показаны на рис. 5.8.

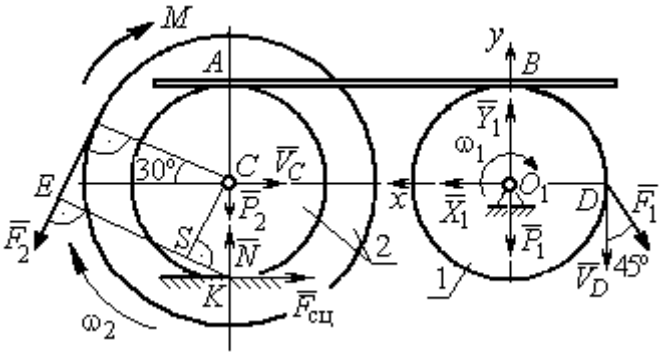


Рис. 5.8. Расчетная схема для исследования движения системы

Для решения задачи воспользуемся теоремой об изменении кинетической энергии системы в дифференциальной форме. По условию задачи рассматриваемая система неизменяемая и, следовательно, сумма мощностей внутренних сил равна нулю. В этом случае теорема об изменении кинетической энергии системы принимает вид $\frac{dT}{dt} = \sum N(\vec{F}_k^e)$, где $T$ – энергия системы в текущем положении; $\sum N(\vec{F}_k^e)$ – суммарная мощность внешних сил.

Найдём кинетическую энергию системы и выразим её через скорость центра масс диска 2.

Кинетическая энергия вращательного движения диска 1: $T_1 = \frac{1}{2} J_{zO_1} \omega_1^2$, где $\omega_1$ – угловая скорость диска 1; $J_{zO_1}$ – осевой момент инерции диска 1, $J_{zO_1} = \frac{m_1 r^2}{2}$. Диск 2 движется плоскопараллельно. Его кинетическая энергия определяется по формуле: $T_2 = \frac{1}{2} m_2 V_C^2 + \frac{1}{2} J_{zC} \omega_2^2$, где $V_C$, $\omega_2$ – скорость центра масс и угловая скорость диска 2; $J_{zC}$ – момент инерции ступенчатого диска 2 относительно оси *z*, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости диска, $J_{zC} = m_2 i_z^2$.

У диска 2 мгновенный центр скоростей находится в точке касания его с неподвижной поверхностью (точка *K* на рис. 5.8). Тогда скорость точки *C* определяется по формуле $V_C = \omega_2 \cdot CK = \omega_2 r$, откуда $\omega_2 = \frac{V_C}{r}$. Скорость точки *A* $V_A = \omega_2 \cdot AK = \omega_2 2r$, или $V_A = 2V_C$.

Так как нет проскальзывания между стержнем и дисками, скорость точки $A$ на диске 2 равна скорости точки *B* на диске 1, причём $V_B = \omega_1 r$. Приравнивая скорости $V_B = V_A$, найдем $\omega_1 = \frac{2V_C}{r}$.

С учетом найденных зависимостей кинетические энергии дисков 1 и 2 и суммарная энергия системы имеют вид

$$T_1 = \frac{1}{2} J_{zO_1} \omega_1^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_1 r^2}{2g} \left( \frac{2V_C}{r} \right)^2 = \frac{P_1}{g} V_C^2;$$

$$T_2 = \frac{1}{2} m_2 V_C^2 + \frac{1}{2} J_{zC} \omega_2^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_2}{g} V_C^2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{P_2}{g} i_z^2 \left( \frac{V_C}{r} \right)^2;$$

$$T = T_1 + T_2 = \frac{P_1}{g} V_C^2 + \frac{1}{2} \frac{P_2}{g} \left( 1 + \frac{i_z^2}{r^2} \right) V_C^2.$$

Производная по времени от кинетической энергии системы

$$\frac{dT}{dt} = 2V_C \frac{dV_C}{dt}\left[\frac{P_1}{g} + \frac{P_2}{2g}\left(1 + \frac{i_z^2}{r^2}\right)\right].$$

Найдем сумму мощностей внешних сил. Отметим, что мощности силы тяжести $\vec{P}_1$ и сил реакции $\vec{X}_1$, $\vec{Y}_1$ подшипника $O_1$ равны нулю, так как нет перемещения точек приложения этих сил. Мощности сил $\vec{N}$ и $\vec{F}_{\text{сц}}$ – нормальной реакции опоры диска 2 и силы сцепления диска с плоскостью также равны нулю, так как точкой приложения этих сил является мгновенный центр скоростей диска 2, скорость которого равна нулю. Мощность силы $\vec{P}_2$ равна нулю, так как угол между вектором силы и скоростью точки приложения силы – точки $C$ – равен 90° (см. рис. 5.8). Для определения мощности силы $\vec{F}_2$, приложенной к диску 2, воспользуемся формулой расчета мощности силы при плоскопараллельном движении тела. Выберем в качестве полюса точку $K$ – мгновенный центр скоростей диска 2, скорость которого $V_K = 0$ (см. рис. 5.8). В этом случае мощность силы $\vec{F}_2$ равна: $N(\vec{F}_2) = \vec{M}_K \cdot \vec{\omega}_2 = -F_2 h_K \omega_2$, где $\vec{M}_K = M_K(\vec{F}_2)$ – вектор момента силы $\vec{F}_2$ относительно центра $K$; $\vec{\omega}_2$, $\omega_2$ – вектор и модуль угловой скорости диска 2; $h_K$ – плечо силы $\vec{F}_2$ относительно центра $K$. Мощность силы $\vec{F}_2$ отрицательная, так как направление момента силы $\vec{F}_2$ относительно точки $K$ противоположно направлению угловой скорости диска 2.

В результате, мощность силы $\vec{F}_2$:

$$N(\vec{F}_2) = -F_2 h_K \omega_2 = -F_2(R + r\cos 60^\circ)\omega_2 = -F_2 V_C\left(\frac{1}{2} + \frac{R}{r}\right).$$

Здесь $h_K = EK = ES + SK = R + r\cos 60^\circ$ (см. рис. 5.8).

Заметим, что для вычисления мощности силы $F_2$ можно использовать в качестве полюса центр масс диска – точку $C$. Имеем:

$$N(\vec{F}_2) = \vec{F}_2 \cdot \vec{V}_C + \vec{M}_C(F_2) \cdot \vec{\omega}_2 = F_2 V_C \cos 120^\circ - F_2 R\omega_2 = -F_2 V_C\left(\frac{1}{2} + \frac{R}{r}\right).$$

Момент $M$ направлен в сторону вращения диска 2. Его мощность положительная: $N(M) = M\omega_2 = M\dfrac{V_C}{r}$. Мощность силы $\vec{F}_1$, приложенной в точке $D$, $N(\vec{F}_1) = F_1 V_D \cos 45^\circ = F_1 V_C \sqrt{2}$. Здесь учтено очевидное равенство $V_D = V_A = 2V_C$ (см. рис. 5.8).

Суммарная мощность внешних сил:

$$\sum N(F^e) = -F_2 V_C\left(\frac{1}{2} + \frac{R}{r}\right) + M\frac{V_C}{r} + F_1 V_C\sqrt{2}.$$

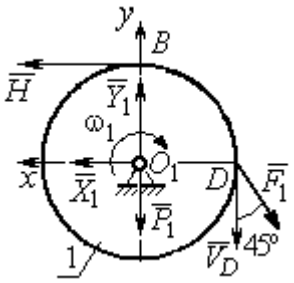



Рис. 5.9. Силы, действующие на диск 1 во время движения

В результате теорема об изменении кинетической энергии системы приводится к виду

$$2V_C\frac{dV_C}{dt}\left[\frac{P_1}{g} + \frac{P_2}{2g}\left(1 + \frac{i_z^2}{r^2}\right)\right] = -F_2 V_C\left(\frac{1}{2} + \frac{R}{r}\right) + M\frac{V_C}{r} + F_1 V_C\sqrt{2},$$

откуда ускорение центра масс диска 2:

$$a_C = \frac{dV_C}{dt} = \frac{\left[-F_2\left(\frac{1}{2} + \frac{R}{r}\right) + \frac{M}{r} + F_1\sqrt{2}\right]g}{\left[2P_1 + P_2\left(1 + \frac{i_z^2}{r^2}\right)\right]}.$$

Подставляя исходные данные задачи, получим: $a_C = 6{,}85$ м/с$^2$.

Для определения углового ускорения диска 2 продифференцируем по времени равенство $\omega_2 = \dfrac{V_C}{CK} = \dfrac{V_C}{r}$. Дифференцирование здесь допустимо, так как во время движения диска 2 расстояние от точки $C$ до мгновенного центра скоростей диска 2 – точки $K$ – не меняется.

Найдем $\varepsilon_2 = \dot{\omega}_2 = \dfrac{\dot{V}_C}{r} = \dfrac{a_C}{r} = 11{,}42$ рад/с$^2$. Угловое ускорение диска 1 находится путём дифференцирования равенства $\omega_1 = 2\omega_2$. Имеем: $\varepsilon_1 = 2\varepsilon_2 = 22{,}84$ рад/с$^2$.

Для того чтобы определить реакцию стержня, освобождаемся от стержня, заменяем его реакцией $\vec{H}$ и составляем уравнения движения дисков 1 и 2.

Силы, действующие на диск 1 во время движения, показаны на рис. 5.9. Уравнение вращательного движения диска 1 в алгебраической форме: $J_{zO_1}\varepsilon_1 = \sum M_z(\vec{F}_k^e)$, где $\varepsilon_1$ – угловое ускорение диска; $J_{zO_1}$ – момент инерции диска 1 относительно оси *z*, проходящей через точку $O_1$ перпендикулярно плоскости диска, $J_{zO_1} = \dfrac{m_1 r^2}{2}$; $\sum M_{zO_1}(\vec{F}_k^e)$ – сумма моментов внешних сил относительно оси *z*.

Считая моменты сил положительными, если они создают поворот диска в сторону его вращения, составим сумму моментов внешних сил относительно оси *z*: $\sum M_{zO_1}(\vec{F}_k^e) = F_1 r\cos 45^\circ - Hr$. В результате уравнение вращательного движения диска 1 принимает вид: $\dfrac{P_1 r^2}{2g}\varepsilon_1 = F_1 r\cos 45^\circ - Hr$.

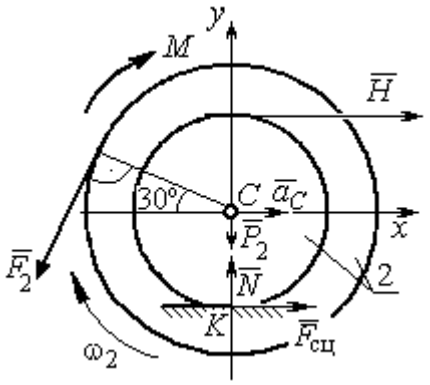


Рис. 5.10. Силы, действующие на диск 2 во время движения

Подставляя в уравнение исходные данные задачи с учетом найденного значения углового ускорения диска 1 $\varepsilon_1$ = 22,84 рад/с$^2$, найдем реакцию стержня *H* = 28,63 Н.

Для определения динамической реакции шарнира $O_1$ диска 1 применим теорему о движении центра масс. Выберем оси координат $O_1x$ и $O_1y$, как показано на рис. 5.9, и составим уравнение движения центра масс диска 1 в проекциях на оси координат с учётом того, что сам центр масс неподвижен и его ускорение равно нулю.

Получим систему:

$$H + X_1 - F_1\sin 45^\circ = 0,\quad Y_1 - P_1 - F_1\cos 45^\circ = 0.$$

Отсюда, с учётом найденной величины усилия в стержне *H* = 28,63 Н, находим составляющие динамической реакции шарнира: $X_1$ = 27,94 Н, $Y_1$ = 96,57 Н. Полная реакция шарнира $R_{O_1} = \sqrt{X_1^2 + Y_1^2}$ =100,53 Н.

Для определения величины силы сцепления диска 2 с поверхностью качения

и нормальной составляющей реакции опоры диска используем теорему о движении центра масс. Силы, приложенные к диску 2, и выбранная система координат *xCy* показаны на рис. 5.10. Уравнения движения центра масс диска 2 в проекциях на оси $x, y$ имеют вид:

$$m_2 a_C = H + F_{\text{сц}} - F_2 \cos 60^\circ;$$

$$0 = -F_2 \cos 30^\circ - P_2 + N.$$

С учетом найденных значений реакции стержня $H = 28{,}63$ Н и ускорения центра масс диска 2 $a_C = 6{,}85$ м/с$^2$, находим силу сцепления и нормальную реакцию опоры: $F_{\text{сц}} = 28{,}27$ Н, $N = 85{,}98$ Н.

Полная реакция опоры $R_K = \sqrt{N^2 + F_{\text{сц}}^2} = 90{,}51$ Н.

# АНАЛИТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

## 6.1. Принципы механики. Общее уравнение динамики

**Силой инерции** материальной точки называют векторную величину, модуль которой равен произведению массы точки на модуль её ускорения, направленную противоположно этому ускорению $\vec{R}^{и} = -m\vec{a}$, где $m$ – масса точки; $\vec{a}$ – вектор ускорения точки.

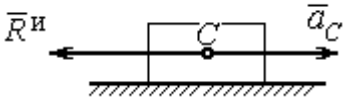


Рис. 6.1. Главный вектор сил инерции при поступательном движении твердого тела

При поступательном движении тела с ускорением центра масс $\vec{a}_C$ система сил инерции, приложенных к каждой точке тела, приводится к главному вектору сил инерции $\vec{R}^{и}$, равному по величине $R^{и} = ma_C$, приложенному в центре масс тела и направленному в сторону, противоположную ускорению $\vec{a}_C$ (рис. 6.1).

При вращении тела вокруг неподвижной оси $z$, проходящей через центр масс, главный вектор сил инерции, приведённый к центру масс тела, обращается в нуль (так как ускорение центра масс равно нулю). Таким образом, система сил инерции приводится к паре сил с моментом $\vec{M}^{и}$, равным главному моменту сил инерции относительно оси вращения. Величина главного момента сил инерции $M^{и} = J_z\varepsilon$, где $J_z$ – момент инерции тела относительно оси $z$; $\varepsilon$ – угловое ускорение тела. Направлен главный момент сил инерции в сторону, противоположную угловому ускорению (рис. 6.2).

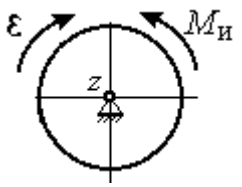


Рис. 6.2. Главный момент сил инерции при вращении тела вокруг оси, проходящей через центр масс

При плоскопараллельном движении тела с ускорением центра масс $\vec{a}_C$ и угловым ускорением $\varepsilon$ система сил инерции, приложенных к каждой точке тела, приводится к силе $\vec{R}^{и}$, равной главному вектору сил инерции, и паре сил с моментом $\vec{M}^{и}$, равным главному моменту сил инерции относительно оси, проходящей через центр масс тела перпендикулярно плоскости движения (рис. 6.3). Главный

вектор сил инерции равен по модулю произведению массы тела на ускорение его центра масс: $R^{и} = ma_c$, приложен в центре масс тела и направлен в сторону, противоположную ускорению $\vec{a}_c$ центра масс. Главный момент сил инерции равен по величине произведению момента инерции тела относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения, на угловое ускорение тела: $M^{и} = J_c\varepsilon$, где $J_c$ – момент инерции тела. Направлен главный момент сил инерции в сторону, противоположную угловому ускорению (см. рис. 6.3).

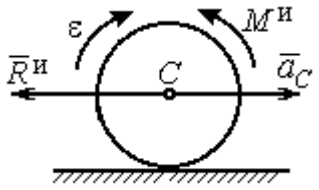


Рис. 6.3. Главный вектор и главный момент сил инерции при плоскопараллельном движении твердого тела

**Принцип Даламбера для системы**. Если в любой момент времени к каждой из точек системы кроме действующих на нее внешних и внутренних сил присоединить соответствующие силы инерции, то полученная система сил будет уравновешенной. Принцип Даламбера даёт возможность составлять уравнения движения механической системы в виде уравнений равновесия:

$$\sum \vec{F}_k^e + \vec{R}^{и} = 0, \ \sum \vec{M}_O(\vec{F}_k^e) + \vec{M}_O^{и} = 0,$$

где $\vec{F}_k^e$ – внешние силы, приложенные к системе; $\vec{R}^{и}$ – главный вектор сил инерции; $\vec{M}_O(\vec{F}_k^e)$ – момент внешних сил, приложенных к системе, относительно произвольного центра $O$; $\vec{M}_O^{и}$ – главный момент сил инерции относительно центра $O$.

Силы, действующие на систему, можно подразделить на активные и реакции связей. **Идеальными связями** в механической системе называют такие связи, для которых сумма элементарных работ их реакций на любом возможном перемещении равна нулю.

**Принцип возможных перемещений.** Для равновесия механической системы с идеальными связями необходимо и достаточно, чтобы сумма элементарных работ всех активных сил, приложенных к точкам системы, была равна нулю на любом возможном перемещении системы: $\sum \delta A(\vec{F}_k^{акт}) = 0$, где $\delta A(\vec{F}_k^{акт})$ – элементарная работа активных сил на возможном перемещении.

Совместное применение принципа Даламбера и принципа возможных перемещений приводит к формулировке общего уравнения динамики.

**Общее уравнение динамики.** При движении механической системы с идеальными связями в каждый момент времени сумма элементарных работ всех приложенных активных сил и сил инерции на любом возможном перемещении равна нулю: $\sum \delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) + \sum \delta A(\vec{R}_k^{\text{и}}) = 0$, где $\delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}})$, $\delta A(\vec{R}_k^{\text{и}})$ – элементарные работы активных сил и сил инерции, приложенных к системе, на её возможном перемещении.

При вычислении элементарных работ активных сил и сил инерции используют обычные формулы для вычисления работы сил на элементарном перемещении точек их приложения. При этом переменные силы на элементарном перемещении точек их приложения считаются постоянными.

## 6.2. Задание Д6. Исследование механической системы с применением общего уравнения динамики

Механическая система с идеальными связями включает груз и два диска – однородного радиусом $R$ или $r$ и ступенчатого. Ступенчатый диск состоит из двух одноосных цилиндров радиусом $R$ и $r$. Радиусы дисков указаны на схеме. Тела соединены нерастяжимыми нитями или невесомыми стержнями. Система движется в вертикальной плоскости из состояния покоя под действием сил тяжести, постоянной силы $\vec{F}$, а также пары сил с переменным моментом $M$. Направление действия силы $\vec{F}$ и наклон плоскости движущихся тел определяются углами $\alpha$ и $\beta$. Радиус инерции ступенчатого диска относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения, равен $i_z$.

Качение дисков без проскальзывания. Скольжение между невесомым стержнем и дисками отсутствует. Движение грузов по плоскости без трения. Нити и стержни, соединяющие груз и диски, параллельны соответствующим плоскостям, по которым двигаются тела.

Найти уравнение движения центра масс диска 3. Определить реакцию шарнира диска 2 в момент времени $t = 1$ с.

Варианты задания приведены на рис. 6.4, 6.5. Исходные данные выбираются из табл. 6.1.

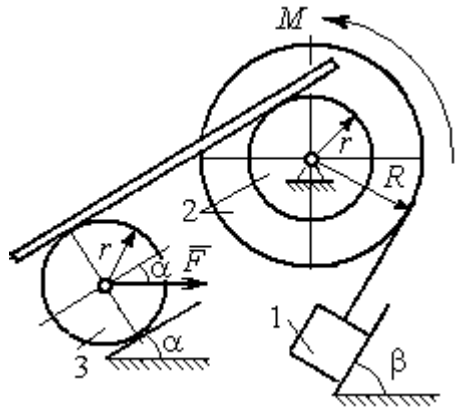
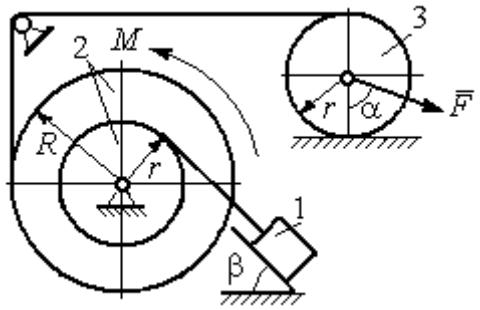
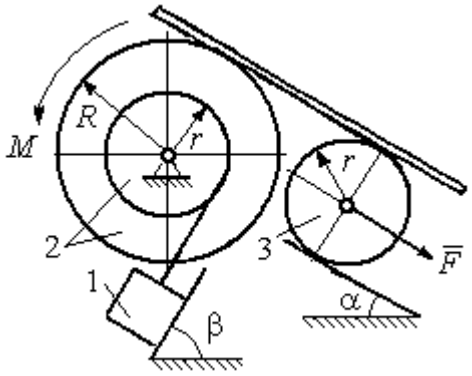
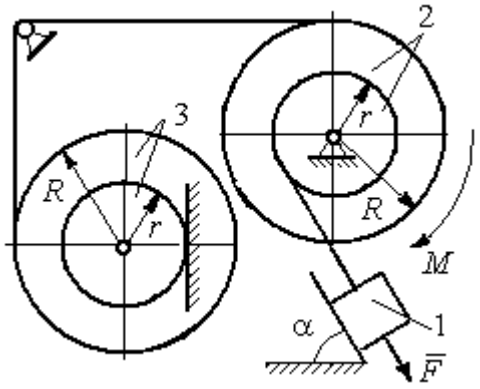
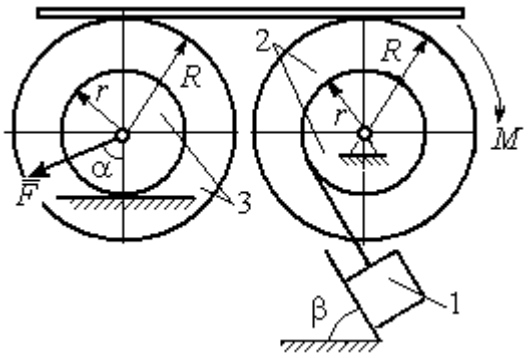
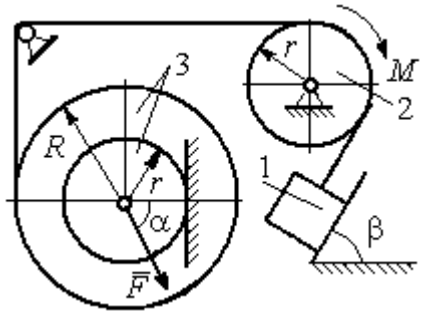
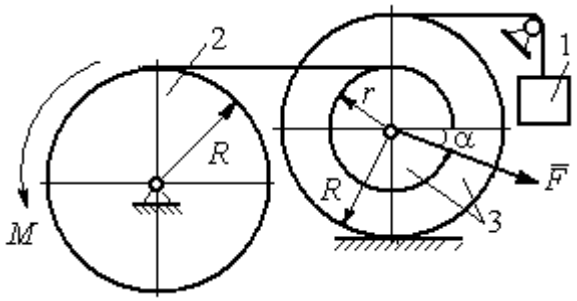
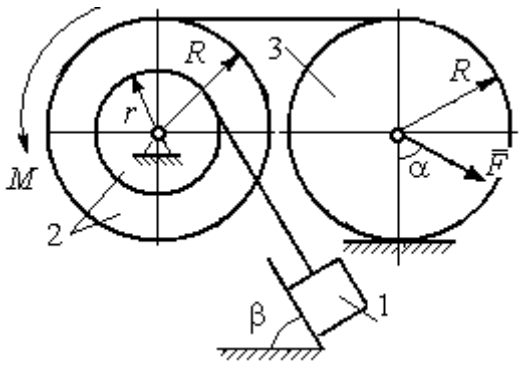
| **Варианты № 1, 11, 21** | **Варианты № 2, 12, 22** |
|---|---|
|  |  |
| **Варианты 3, 13, 23** | **Варианты № 4, 14, 24** |
|  |  |

Рис. 6.4. Задание Д6. Исследование движения механической системы с применением общего уравнения динамики.
Номера вариантов задания 1 – 4, 11 – 14, 21 – 24

| **Варианты № 5, 15, 25** | **Варианты № 6, 16, 26** |
|---|---|
|  |  |

| **Варианты № 7, 17, 27** | **Варианты № 8, 18, 28** |
|---|---|
|  |  |

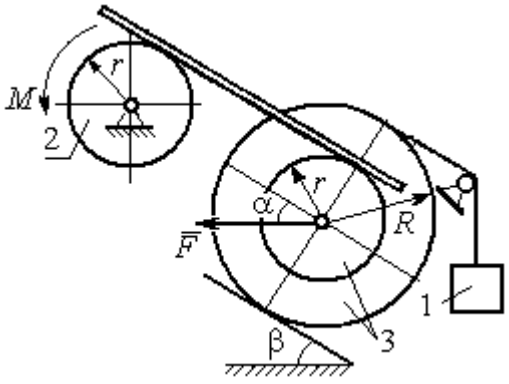
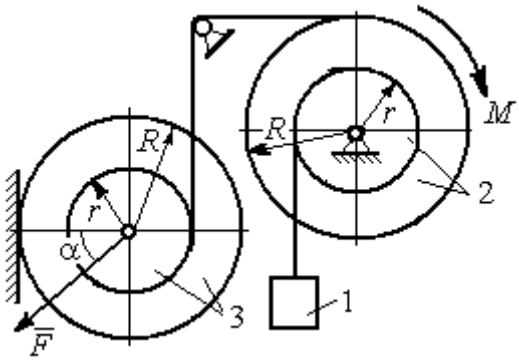
| **Варианты № 9, 19, 29** | **Варианты № 10, 20, 30** |
|---|---|
|  |  |

Рис. 6.5. Задание Д6. Исследование движения механической системы с применением общего уравнения динамики. Номера вариантов задания 5 – 10, 15 – 20, 25 – 30

Таблица 6.1

**Исходные данные задания Д6. Исследование движения механической системы с применением общего уравнения динамики**

| Номер варианта задания | $P_1$, Н | $P_2$, Н | $P_3$, Н | $F$, Н | $M$, Н·м | $\alpha$, град | $\beta$, град | $R$, м | $r$, м | $i_z$, м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 10 | 20 | 8 | 20 | $3(2+t^2)$ | 30 | 60 | 0,6 | 0,3 | 0,4 |
| **2** | 10 | 22 | 15 | 15 | $4(t+3)$ | 30 | 30 | 0,8 | 0,4 | 0,6 |
| **3** | 5 | 18 | 10 | 6 | $8(t^2+1)$ | 90 | 30 | 0,4 | 0,3 | 0,3 |
| **4** | 5 | 22 | 10 | 5 | $14(t^2+t+1)$ | 30 | – | 0,6 | 0,5 | 0,6 |
| **5** | 5 | 20 | 16 | 9 | $3(t^2+4)$ | 45 | 60 | 0,6 | 0,3 | 0,5 |
| **6** | 10 | 16 | 14 | 15 | $4(5+t)$ | 60 | 30 | 1,0 | 0,6 | 0,8 |
| **7** | 6 | 20 | 20 | 8 | $9(3t^2+2)$ | 45 | – | 0,8 | 0,6 | 0,8 |
| **8** | 16 | 25 | 15 | 12 | $5(t^2+4)$ | 30 | 60 | 1,2 | 0,6 | 0,8 |
| **9** | 5 | 20 | 12 | 8 | $4(3+5t)$ | 60 | 30 | 0,6 | 0,4 | 0,5 |
| **10** | 6 | 25 | 8 | 10 | $5(3t+6)$ | 30 | – | 1,0 | 0,8 | 0,9 |
| **11** | 4 | 22 | 8 | 15 | $2+ t^2$ | 45 | 45 | 0,8 | 0,4 | 0,6 |
| **12** | 15 | 18 | 15 | 10 | $5(t+3)$ | 30 | 60 | 1,0 | 0,5 | 0,7 |
| **13** | 6 | 20 | 10 | 4 | $5(t^2+2)$ | 30 | 60 | 0,6 | 0,5 | 0,4 |
| **14** | 10 | 25 | 15 | 8 | $16(t+2)$ | 60 | – | 0,8 | 0,6 | 0,7 |
| **15** | 8 | 18 | 20 | 10 | $6(t+2)$ | 30 | 90 | 1,2 | 0,6 | 1,0 |
| **16** | 8 | 18 | 12 | 12 | $5(3+t^2)$ | 90 | 60 | 0,8 | 0,6 | 0,7 |
| **17** | 5 | 20 | 10 | 10 | $2t^2+20$ | 60 | – | 0,9 | 0,6 | 0,8 |
| **18** | 20 | 15 | 20 | 15 | $3(t+4)$ | 60 | 30 | 0,8 | 0,4 | 0,7 |
| **19** | 8 | 20 | 12 | 10 | $4(3+t)$ | 45 | 45 | 1,2 | 0,4 | 0,8 |
| **20** | 12 | 20 | 10 | 6 | $6(3t+4)$ | 45 | – | 1,0 | 0,6 | 0,9 |
| **21** | 15 | 25 | 12 | 12 | $6+t^2$ | 60 | 60 | 0,6 | 0,3 | 0,5 |
| **22** | 20 | 22 | 18 | 15 | $2(2t+9)$ | 45 | 45 | 0,8 | 0,4 | 0,6 |
| **23** | 8 | 24 | 12 | 8 | $7(3t^2+2)$ | 30 | 45 | 0,8 | 0,5 | 0,6 |
| **24** | 12 | 20 | 18 | 10 | $6(t+4)$ | 90 | – | 0,5 | 0,3 | 0,4 |
| **25** | 5 | 20 | 12 | 12 | $9(2+t^2)$ | 60 | 30 | 1,4 | 0,7 | 1,2 |
| **26** | 10 | 12 | 10 | 8 | $6(2+t)$ | 30 | 45 | 1,2 | 0,8 | 0,9 |
| **27** | 6 | 18 | 16 | 14 | $8(2t^2+3)$ | 30 | – | 0,8 | 0,2 | 0,6 |
| **28** | 10 | 20 | 20 | 20 | $3(t^2+3)$ | 45 | 30 | 0,6 | 0,3 | 0,5 |
| **29** | 10 | 18 | 8 | 12 | $5(4+t+ t^2)$ | 30 | 60 | 1,2 | 0,8 | 0,9 |
| **30** | 8 | 18 | 10 | 15 | $8(t^2+5)$ | 60 | – | 1,0 | 0,8 | 0,9 |

## Пример выполнения задания Д6. Исследование движения механической системы с применением общего уравнения динамики

Механическая система состоит из груза 1, движущегося поступательно, ступенчатого диска 2 (каток), катящегося по неподвижной поверхности цилиндрической ступенькой, и однородного диска 3 (блок), вращающегося вокруг неподвиж-

ной оси, проходящей через центр масс блока (рис. 6.6). Качение катка 2 без проскальзывания, скольжение груза 1 – без трения. Движение системы происходит под действием сил тяжести, силы $\vec{F}$, приложенной к грузу 1 и пары сил с моментом *M*, приложенной к диску 3.

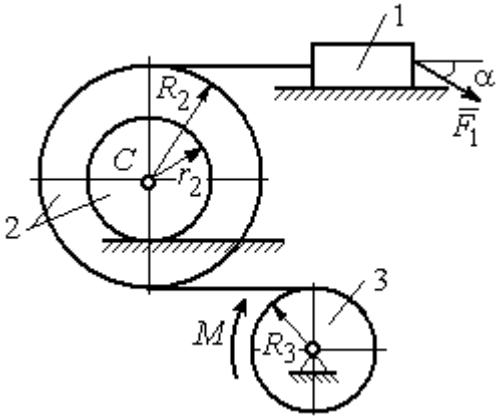


Рис. 6.6. Схема движения механической системы

Найти уравнение движения центра масс катка 2 если движение системы началось из состояния покоя. Определить реакцию шарнира диска 3 в момент $t$ = 1 с, если: $P_1$ = 10 Н; $P_2$ = 20 Н; $P_3$ = 15 Н; $F = 5(t+1)$ Н; $M = 6(1+2t)$ Н·м; $R_2$ = 0,8 м; $r_2$ = 0,2 м; $R_3$ = 0,4 м; $i_{2C}$ = 0,6 м.

*Решение*

В рассматриваемой механической системе активными силами являются силы тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$, сила $\vec{F}$ и пара сил с моментом *M* (рис. 6.7). Связи идеальные, так как скольжение груза 1 происходит по гладкой поверхности без трения, качение диска 2 без проскальзывания, а ось вращения блока 3 неподвижна.

Предположим, направление движения в системе задаёт пара сил с моментом *M*, приложенная к блоку 3. Обозначим $\omega_3$, $\varepsilon_3$ – угловая скорость и угловое ускорение блока 3, $V_C$, $a_C$ – скорость и ускорение центра масс катка 2, $V_1$, $a_1$ – скорость и ускорение груза 1. Направления векторов скоростей и ускорений точек и угловых скоростей и ускорений тел в соответствии с выбранным направлением движения системы показаны на рис. 6.7.

Общее уравнение динамики имеет вид:

$$\sum \delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) + \sum \delta A(\vec{R}_k^{\text{и}}) = 0.$$

Присоединим к телам системы силы инерции. Груз 1 движется поступательно. Главный вектор сил инерции груза 1 $\vec{R}_1^{\text{и}}$ приложен в центре масс груза и направлен в сторону, противоположную ускорению $\vec{a}_1$ груза 1. Модуль главного вектора сил инерции груза 1 $R_1^{\text{и}} = m_1 a_1$, где $m_1$ – масса груза 1; $a_1$ – величина ускорения груза 1.

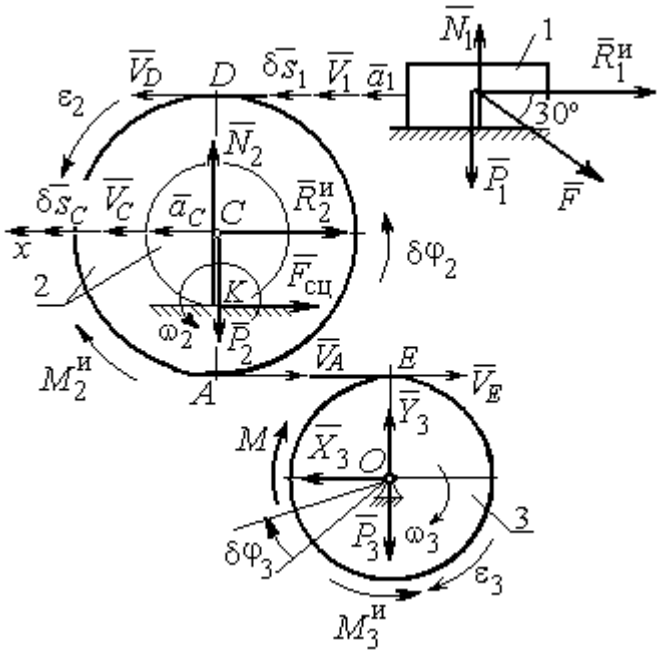



Рис. 6.7. Расчётная схема исследования движения механической системы

Система сил инерции катка 2, приводятся к силе, равной главному вектору сил инерции $\vec{R}_2^{\text{и}}$, приложенному в центре масс катка 2, и паре сил с моментом, равным главному моменту сил инерции $\vec{M}_2^{\text{и}}$ относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения. Главный вектор сил инерции направлен в сторону, противоположную ускорению $\vec{a}_C$, и составляет $R_2^{\text{и}} = m_2 a_C$, где $m_2$ – масса катка 2; $a_C$ – величина ускорения центра масс. Главный момент сил инерции: $M_2^{\text{и}} = J_{2C}\varepsilon_2$, где $J_{2C}$ – момент инерции катка 2 относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения; $\varepsilon_2$ – угловое ускорение катка 2. Направлен главный момент сил инерции $M_2^{\text{и}}$ в сторону, противоположную угловому ускорению $\varepsilon_2$.

Главный вектор сил инерции, приложенных к блоку 3 и приведённых к центру масс блока, равен нулю, так как блок вращается вокруг неподвижной оси, проходящей через центр масс, и ускорение центра масс блока равно нулю. В результате силы инерции блока 3 приводятся к паре сил, момент которой равен главному

моменту сил инерции $\vec{M}_3^{\text{и}}$ относительно оси вращения. Главный момент сил инерции блока 3 равен по величине $M_3^{\text{и}} = J_{3O}\varepsilon_3$, где $J_{3O}$ – момент инерции блока 3 относительно оси вращения; $\varepsilon_3$ – угловое ускорение блока 3, и направлен в сторону, противоположную угловому ускорению $\varepsilon_3$. Главные векторы и главные моменты сил инерции показаны на рис. 6.8.

Определим кинематические соотношения между скоростями точек системы и выразим их через скорость $V_C$ центра масс катка 2. Каток 2 катится по неподвижной поверхности без скольжения. Мгновенный центр скоростей катка находится в точке *K* касания катка с поверхностью (см. рис. 6.7). Угловая скорость катка 2 $\omega_2 = \dfrac{V_C}{CK} = \dfrac{V_C}{r_2}$. Скорость точки *A* катка 2: $V_A = \omega_2 \cdot AK = \omega_2(R_2 - r_2) =$ $V_C \dfrac{R_2 - r_2}{r_2}$. Скорость точки *E* блока 3 равна скорости точки *A* катка 2, $V_E = V_A$. Тогда угловая скорость блока 3:

$$\omega_3 = \frac{V_E}{R_3} = \frac{V_A}{R_3} = V_C \frac{(R_2 - r_2)}{R_3 r_2}.$$

Скорость груза 1 равна скорости точки *D* катка 2:

$$V_1 = V_D = \omega_2 \cdot DK = \omega_2(R_2 + r_2) = V_C \frac{(R_2 + r_2)}{r_2}.$$

Соотношения между ускорениями определяются путем дифференцирования установленных кинематических равенств:

$$a_1 = a_C \frac{(R_2 + r_2)}{r_2}, \quad \varepsilon_2 = \frac{a_C}{r_2}, \quad \varepsilon_3 = a_C \frac{(R_2 - r_2)}{R_3 r_2}.$$

Для того чтобы найти соотношения между перемещениями, выразим кинематические равенства между скоростями в дифференциальном виде и, полагая, что действительное перемещение является возможным, т. е. $ds = \delta s$, $d\varphi = \delta\varphi$, получим соотношения между возможными перемещениями:

$$\delta s_1 = \delta s_C \frac{(R_2 + r_2)}{r_2}, \quad \delta\varphi_2 = \frac{\delta s_C}{r_2}, \quad \delta\varphi_3 = \delta s_C \frac{(R_2 - r_2)}{R_3 r_2}.$$

Сообщим системе возможное перемещение, совпадающее с действительным. Элементарная работа реакций связи на любом возможном перемещении системы равна нулю, так как связи в системе идеальные.

Найдем элементарные работы активных сил и выразим их через перемещение центра масс катка 2. Прежде заметим, что элементарные работы сил тяжести груза 1 и катка 2 равны нулю, так как направления перемещений точек приложения этих сил перпендикулярны векторам сил:

$$\delta A(\vec{P}_1) = P_1 \delta s_1 \cos 90^\circ = 0,\ \delta A(\vec{P}_2) = P_2 \delta s_C \cos 90^\circ = 0.$$

Элементарная работа силы тяжести блока 3 равна нулю, так как точка приложения силы тяжести блока 3 не перемещается: $\delta A(\vec{P}_3) = 0$.

Элементарная работа пары сил с моментом $M$, приложенных к блоку 3:

$$\delta A(\vec{M}) = M\delta\varphi_3 = M\delta s_C \frac{(R_2 - r_2)}{R_3 r_2}.$$

Элементарная работа силы $\vec{F}$:

$$\delta A(\vec{F}) = F\delta s_1 \cos 150^\circ = -F\delta s_C \frac{(R_2 + r_2)}{r_2}\cos 30^\circ.$$

Сумма элементарных работ всех активных сил:

$$\sum \delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) = \delta A(\vec{M}) + \delta A(\vec{F}) = M\delta s_C \frac{(R_2 - r_2)}{R_3 r_2} - F\delta s_C \frac{(R_2 + r_2)}{r_2}\cos 30^\circ =$$

$$= \left[6(1+2t)\left(\frac{0{,}8 - 0{,}2}{0{,}4 \cdot 0{,}2}\right) - 5(t+1)\left(\frac{0{,}8 + 0{,}2}{0{,}2}\right)0{,}866\right]\delta s_C = (23{,}35 + 68{,}35t)\delta s_C.$$

Определим модули главных векторов и главных моментов сил инерции в зависимости от ускорения $a_C$ центра масс катка 2:

$$R_1^{\text{и}} = m_1 a_1 = \frac{P_1}{g} a_1 = \frac{P_1(R_2 + r_2)}{g r_2} a_C, \quad R_2^{\text{и}} = m_2 a_C = \frac{P_2 a_C}{g},$$

$$M_2^{\text{и}} = J_{2C}\varepsilon_2 = m_2 i_{2C}^2 \varepsilon_2 = \frac{P_2}{g} i_{2C}^2 \frac{a_C}{r_2},$$

$$M_3^{\text{и}} = J_{3O}\varepsilon_3 = \frac{m_3 R_3^2}{2}\varepsilon_3 = \frac{P_3 R_3^2}{2g}\frac{(R_2 - r_2)}{R_3 r_2} a_C = \frac{P_3 R_3 (R_2 - r_2)}{2 g r_2} a_C,$$

где $J_{2C}$ – момент инерции катка 2 относительно оси, проходящей через его центр масс перпендикулярно плоскости движения, $J_{2C} = m_2 i_{2C}^2$; $i_{2C}$ – радиус инерции катка 2; $J_{3O}$ – момент инерции блока 3 относительно оси вращения, проходящей через его центр масс, $J_{3O} = \dfrac{m_3 R_3^2}{2}$.

Найдем элементарные работы сил инерции на возможном перемещении системы и выразим их в зависимости от перемещения $\delta s_C$ центра масс катка 2:

$$\delta A(\vec{R}_1^{\text{и}}) = R_1^{\text{и}} \delta s_1 \cos 180^\circ = -\frac{P_1 (R_2 + r_2)^2 a_C}{g r_2^2} \delta s_C;$$

$$\delta A(\vec{R}_2^{\text{и}}) = R_2^{\text{и}} \delta s_C \cos 180^\circ = -\frac{P_2 a_C}{g} \delta s_C,\ \delta A(\vec{M}_2^{\text{и}}) = -M_2^{\text{и}} \delta \varphi_2 = -\frac{P_2 i_2^2 a_C}{g r_2^2} \delta s_C;$$

$$\delta A(\vec{M}_3^{\text{и}}) = -M_3^{\text{и}} \delta \varphi_3 = -\frac{P_3 (R_2 - r_2)^2 a_C}{2 g r_2^2} \delta s_C.$$

Сумма элементарных работ сил инерции:

$$\sum \delta A(\vec{R}_k^{\text{и}}) = -\frac{P_1 (R_2 + r_2)^2 a_C}{g r_2^2} \delta s_C - \frac{P_2 a_C}{g} \delta s_C - \frac{P_2 i_2^2 a_C}{g r_2^2} \delta s_C - \frac{P_3 (R_2 - r_2)^2 a_C}{2 g r_2^2} \delta s_C =$$

$$= -\frac{a_C \delta s_C}{g} \left[ \frac{10(0{,}8 + 0{,}2)^2}{0{,}2^2} + 20 + \frac{20 \cdot 0{,}6^2}{0{,}2^2} + \frac{15(0{,}8 - 0{,}2)^2}{2 \cdot 0{,}2^2} \right] = -52{,}75\, a_C \delta s_C,$$

где $g = 9{,}81$ м/с$^2$.

С учетом проделанных вычислений общее уравнение динамики принимает вид:

$$\sum \delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) + \sum \delta A(\vec{R}_k^{\text{и}}) = (23{,}35 + 68{,}35t)\delta s_C - 52{,}75\, a_C \delta s_C = 0,$$

откуда ускорение центра масс катка 2:

$$a_C = 0{,}44 + 1{,}29t.$$

Выберем ось *x* по направлению движения центра масс катка 2 (см. рис. 6.7). Проектируя вектор $\vec{a}_C$ ускорения точки $C$ на ось *x*, получим дифференциальное уравнение $a_C = \ddot{x}_C = 0{,}44 + 1{,}29t$. Интегрируя дважды это уравнение, найдём закон движения: $x_C = 0{,}44\frac{t^2}{2} + 1{,}29\frac{t^3}{6} + C_1 t + C_2$. Подставляя сюда начальные условия: $t = 0$, $V_C = 0$, $x_C = 0$, найдём константы интегрирования: $C_1 = C_2 = 0$. Окончательно уравнение движения центра масс диска 2 представим в виде:

$$x_C = 0{,}22t^2 + 0{,}21t^3.$$

Рассмотрим вращательное движение блока 3, освободив его от связей. На блок действуют сила тяжести $\vec{P}_3$, реакция подшипника, разложенная на составляющие $\vec{X}_3$, $\vec{Y}_3$, пара сил с моментом *M* и реакция нити $\vec{H}_3$ (см. рис. 6.8). Реакция нити, равная силе натяжения нити, приложена к блоку 3, направлена вдоль нити, связывающей каток 2 и блок 3. Присоединим к блоку 3 силы инерции. Направления сил, моментов пар сил и главного момента сил инерции, действующих на блок 3, показаны на рис. 6.8.

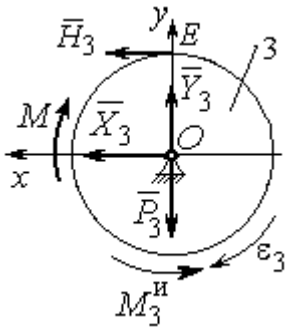


Рис. 6.8. Расчётная схема определения натяжения нити и реакции шарнира блока 3

По принципу Даламбера система сил, приложенных к блоку 3, включая силы инерции, находится в равновесии. Составим уравнение равновесия в виде равенства нулю суммарного момента всех сил (включая силы инерции) относительно оси вращения. Получим $M - H_3R_3 - M_3^{и} = 0$, где $M_3^{и} = J_{3O}\varepsilon_3 = = \frac{P_3R_3(R_2 - r_2)a_C}{2gr_2}$.

Из уравнения находим величину натяжения нити:

$$H_3 = \frac{M}{R_3} - \frac{P_3(R_2 - r_2)a_C}{2gr_2} = \frac{6(1+2t)}{R_3} - \frac{P_3(R_2 - r_2)}{2gr_2}(0{,}44 + 1{,}29t) = 13{,}99 + 27{,}04t.$$

В момент времени $t = 1$ с натяжение нити: $H_3 = 41{,}04$ Н.

Так как главный вектор сил инерции блока 3 равен нулю, то составленные по принципу Даламбера уравнения равновесия блока 3 в виде проекций сил на

вертикальную и горизонтальную оси содержат только внешние силы. Имеем: $X_3 + H_3 = 0$, $Y_3 - P_3 = 0$ (см. рис. 6.8). Отсюда находим составляющие реакции шарнира блока 3 в момент времени $t = 1$ с: $X_3 = -H_3 = -41{,}04$ Н, $Y_3 = P_3 = 15$ Н. Отрицательное значение горизонтальной составляющей реакции шарнира $X_3$ означает её противоположное направление.

Полная реакция шарнира $R_3 = \sqrt{X_3^2 + Y_3^2} = 43{,}69$ Н.

## 6.3. Уравнения Лагранжа II рода

**Обобщенными координатами** механической системы называется совокупность любых $s$ независимых параметров $q_1, q_2, \ldots, q_s$, однозначно определяющих положение системы в любой момент времени.

Если системе сообщить возможное перемещение, при котором все обобщенные координаты изменяются на элементарные (бесконечно малые) величины $\delta q_1, \delta q_2, \ldots, \delta q_s$, называемые вариациями обобщенных координат, то все действующие активные силы совершат элементарную работу, которая может быть представлена в виде $\delta A = Q_1 \cdot \delta q_1 + Q_2 \cdot \delta q_2 + \ldots + Q_s \cdot \delta q_s$. Величина $Q_k$, равная коэффициенту при вариации $\delta q_k$ обобщенной координаты, называется **обобщенной силой**, соответствующей данной обобщенной координате. Расчет обобщенных сил осуществляется путем последовательного придания системе возможных перемещений, при которых варьируется только одна из обобщенных координат, а вариации остальных координат равны нулю.

Для материальной системы с идеальными связями дифференциальные уравнения движения в обобщенных координатах – **уравнения Лагранжа II рода** – имеют вид:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} = Q_k, \quad k = 1, 2, \ldots, s,$$

где $T$ – кинетическая энергия системы; $q_1, q_2, \ldots, q_S$ – обобщенные координаты; $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \ldots, \dot{q}_S$ – обобщенные скорости; $s$ – число степеней свободы системы.

## 6.4. Задание Д7. Исследование механической системы с одной степенью свободы с применением уравнений Лагранжа

Механическая система состоит из трёх тел – бруса 1, блока 2, катка 3 и невесомой пружины жесткостью $c$. Брус 1, соединяющий каток 3 с блоком 2, расположен параллельно линии качения катка 3. Радиусы ступеней ступенчатого диска и радиус однородного диска указаны на схеме.

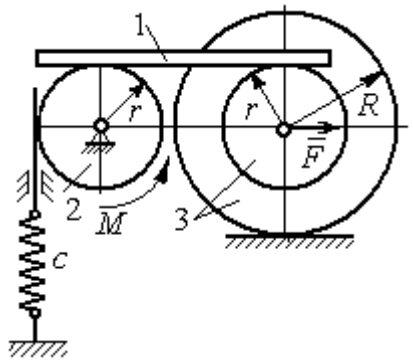
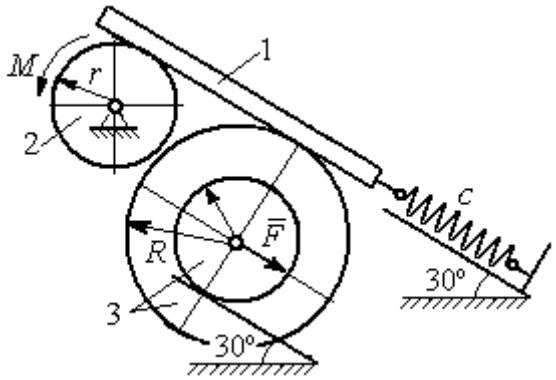
Качение катка 3 происходит без проскальзывания. Скольжение между брусом и дисками отсутствует. В задачах, где пружина соединяется с блоком 2, передача движения блоку 2 производится посредством невесомого стержня без скольжения.

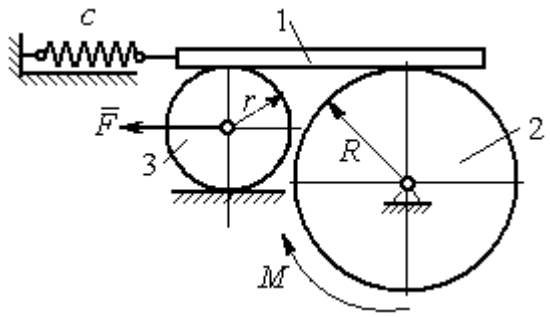
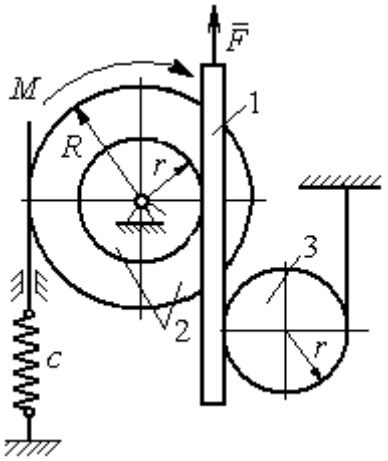
Радиус инерции ступенчатого диска относительно оси, проходящей через его центр масс перпендикулярно плоскости движения, равен $i_z$.

Система движется в вертикальной плоскости под действием сил тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$, силы $\vec{F}$ и пары сил с моментом $M$.

Определить закон движения бруса 1 и закон угловых колебаний блока 2, если в начальный момент пружина находилась в нерастянутом состоянии, а блоку 2 придали угловую скорость $\omega_{20}$, направленную в сторону заданного момента пары сил.

Варианты заданий даны на рис. 6.9, 6.10. Варианты исходных данных в табл. 6.2. Отрицательные значения величин $F$ или $M$ в табл. 6.2 означают, что при заданных модулях силы или момента направление вектора силы $\vec{F}$ или момента $M$ на схеме следует изменить на противоположные.

| Варианты № 1, 11, 21 | Варианты № 2, 12, 22 |
|---|---|
|  |  |

| Варианты № 3, 13, 23 | Варианты № 4, 14, 24 |
|---|---|
|  |  |

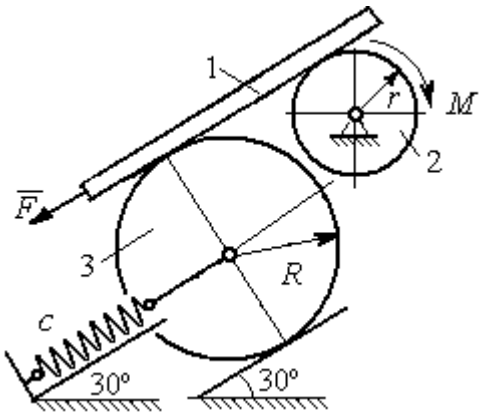
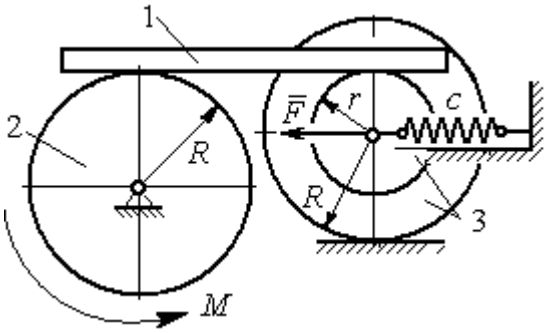
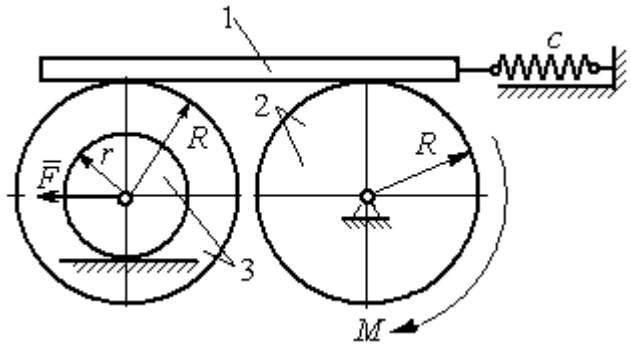
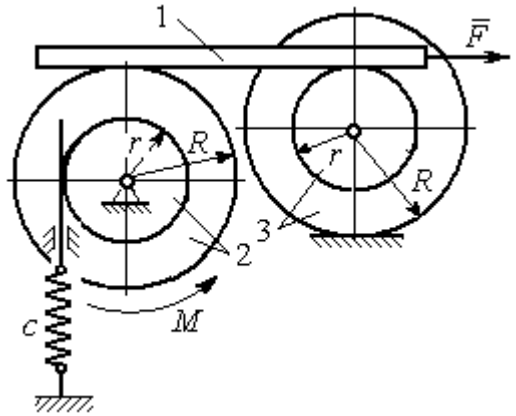
| Варианты № 5, 15, 25 | Варианты № 6, 16, 26 |
|---|---|
|  |  |

Рис. 6.9. Задание Д7. Исследование движения механической системы с одной степенью свободы. Номера вариантов задания 1 – 6, 11 – 16, 21 – 26

| **Варианты № 7, 17, 27** | **Варианты № 8, 18, 28** |
|---|---|
|  |  |

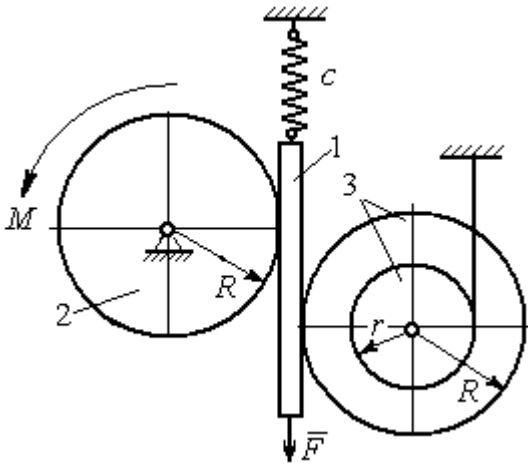
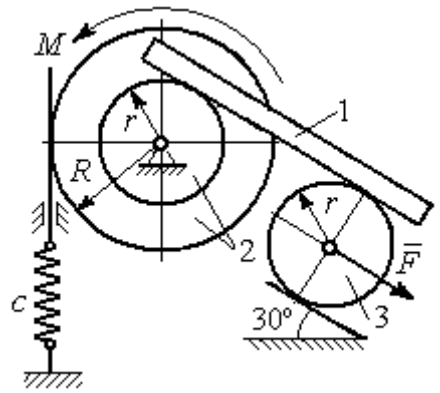
| **Варианты № 9, 19, 29** | **Варианты № 10, 20, 30** |
|---|---|
|  |  |

Рис. 6.10. Задание Д7. Исследование движения механической системы с одной степенью свободы. Номера вариантов задания 7 – 10, 17 – 20, 27 – 30

Таблица 6.2

**Исходные данные задания Д7. Исследование движения механической системы с одной степенью свободы с применением уравнений Лагранжа**

| Номер вари-анта задания | $P_1$, Н | $P_2$, Н | $P_3$, Н | $F$, Н | $M$, Н·м | $c$, Н/м | $\omega_{20}$, рад/с | $R$, м | $r$, м | $i_z$, м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 8 | 12 | 18 | 15 | 3 | 50 | 0,3 | 0,6 | 0,3 | 0,4 |
| **2** | 10 | 8 | 15 | 12 | 5 | 55 | 0,4 | 0,8 | 0,5 | 0,6 |
| **3** | 5 | 18 | 10 | 8 | 4 | 60 | 0,2 | 0,5 | 0,3 | – |
| **4** | 5 | 20 | 12 | 10 | 6 | 70 | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 0,6 |
| **5** | 5 | 8 | 16 | 8 | 8 | 65 | 0,2 | 0,6 | 0,3 | – |

*Окончание табл. 6.2*

| Номер варианта задания | $P_1$, Н | $P_2$, Н | $P_3$, Н | $F$, Н | $M$, Н·м | $c$, Н/м | $\omega_{20}$, рад/с | $R$, м | $r$, м | $i_z$, м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **6** | 8 | 10 | 14 | 6 | 2 | 50 | 0,1 | 1,0 | 0,6 | 0,8 |
| **7** | 10 | 12 | 15 | 12 | 3 | 65 | 0,2 | 0,8 | 0,6 | 0,7 |
| **8** | 12 | 15 | 15 | 6 | 2 | 50 | 0,3 | 1,2 | 0,6 | 0,8 |
| **9** | 5 | 20 | 12 | 8 | 4 | 75 | 0,1 | 0,6 | 0,4 | 0,5 |
| **10** | 6 | 25 | 8 | 5 | 12 | 60 | 0,4 | 1,0 | 0,8 | 0,9 |
| **11** | 4 | 10 | 12 | –10 | –2 | 60 | 0,2 | 0,8 | 0,4 | 0,6 |
| **12** | 5 | 8 | 15 | –8 | 3 | 50 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 0,7 |
| **13** | 6 | 15 | 8 | –12 | –4 | 65 | 0,4 | 0,6 | 0,5 | – |
| **14** | 10 | 25 | 10 | 6 | 10 | 55 | 0,1 | 0,8 | 0,6 | 0,7 |
| **15** | 8 | 6 | 20 | –10 | 2 | 70 | 0,2 | 1,2 | 0,6 | – |
| **16** | 10 | 12 | 12 | –5 | 6 | 60 | 0,3 | 0,8 | 0,6 | 0,7 |
| **17** | 12 | 16 | 12 | –6 | –2 | 55 | 0,4 | 0,9 | 0,6 | 0,8 |
| **18** | 10 | 20 | 20 | 10 | 4 | 60 | 0,1 | 0,8 | 0,4 | 0,7 |
| **19** | 8 | 20 | 12 | –10 | 6 | 65 | 0,2 | 1,2 | 0,4 | 0,8 |
| **20** | 12 | 20 | 10 | –3 | 6 | 50 | 0,24 | 1,0 | 0,6 | 0,9 |
| **21** | 5 | 12 | 15 | 12 | –3 | 55 | 0,3 | 0,6 | 0,5 | 0,55 |
| **22** | 10 | 15 | 18 | 6 | –2 | 65 | 0,1 | 0,8 | 0,4 | 0,6 |
| **23** | 8 | 20 | 12 | –8 | 2 | 45 | 0,2 | 0,8 | 0,6 | – |
| **24** | 12 | 20 | 18 | –4 | –8 | 70 | 0,4 | 0,5 | 0,3 | 0,4 |
| **25** | 6 | 10 | 15 | –6 | –2 | 60 | 0,1 | 1,4 | 0,7 | – |
| **26** | 8 | 12 | 10 | 10 | –3 | 65 | 0,2 | 1,2 | 0,8 | 0,9 |
| **27** | 6 | 18 | 16 | 5 | –3 | 70 | 0,2 | 0,8 | 0,2 | 0,6 |
| **28** | 8 | 12 | 12 | –6 | 2 | 65 | 0,3 | 0,6 | 0,3 | 0,5 |
| **29** | 10 | 18 | 20 | –10 | 4 | 60 | 0,2 | 1,2 | 0,8 | 0,9 |
| **30** | 8 | 18 | 10 | 8 | 6 | 75 | 0,1 | 1,0 | 0,8 | 0,9 |

## Пример выполнения задания Д7. Исследование движения механической системы с одной степенью свободы с применением уравнений Лагранжа

Механическая система состоит из трёх тел – бруса 1, блока 2, катка 3 и невесомой пружины жесткостью $c$. Брус, соединяющий каток 3 с блоком 2, расположен параллельно линии качения катка 3 (рис. 6.11). Радиусы ступеней ступенчатого диска $R$ и $r$, радиус однородного диска $r$. Система движется в вертикальной плоскости под действием сил тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$, силы $\vec{F}$ и пары сил с моментом $M$. Движение катка 3 по неподвижной поверхности происходит без проскальзывания. Скольжение между брусом и дисками отсутствует. Передача движения от пружины блоку 2 производится посредством невесомого вертикального стержня

без скольжения. Радиус инерции блока 2 относительно оси, проходящей через его центр масс перпендикулярно плоскости движения, $i_z$.

Исходные данные задачи: $P_1 = P$ Н, $P_2 = 2P$ Н, $P_3 = P$ Н, $F = 2P$ Н, $M = Pr$ Н·м, $R = 1{,}5r$ м, $i_z = r\sqrt{2}$ м, $c = P/r$ Н/м.

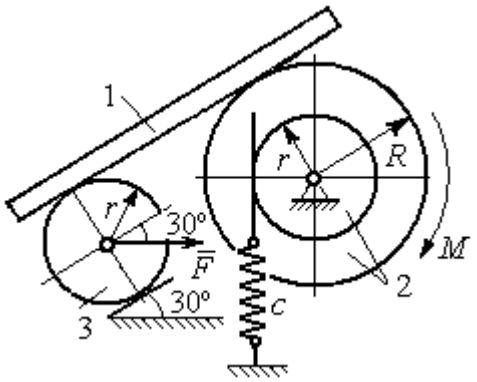


Рис. 6.11. Механическая система с одной степенью свободы

Определить законы движения блока 2 и бруса 1 при $P = 10$ Н, $r = 0{,}2$ м, если в начальный момент пружина находилась в нерастянутом состоянии, а блоку 2 придали угловую скорость $\omega_0 = 0{,}5$ рад/с, направленную в сторону заданного момента пары сил.

*Решение*

Рассматриваемая механическая система (рис. 6.11) имеет одну степень свободы, так как в системе не допускается независимое друг от друга движение тел. В качестве обобщённой координаты $q$ выберем перемещение $x$ верхнего края пружины, отсчитываемого от уровня, при котором пружина длиной $l_0$ находилась в нерастянутом состоянии (рис. 6.12). Обобщённая скорость $\dot{q} = \dot{x}$.

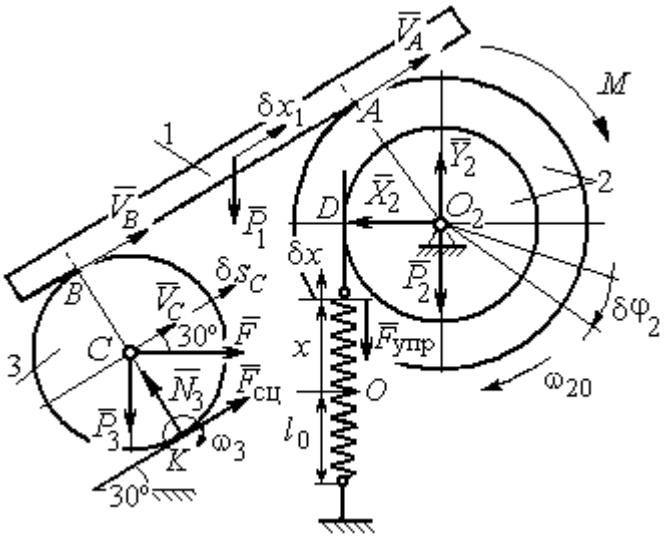


Рис. 6.12. Расчётная схема колебаний механической системы с одной степенью свободы

Уравнение Лагранжа II рода, описывающее движение системы с одной степенью свободы, имеет вид $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}}\right) - \frac{\partial T}{\partial x} = Q_x$, где $T$ – кинетическая энергия системы, $Q_x$ – обобщенная сила, соответствующая обобщенной координате $x$.

Вычислим кинетическую энергию системы как сумму кинетических энергий бруса, блока и катка: $T = T_1 + T_2 + T_3$. Кинетическая энергия поступательного движения бруса 1: $T_1 = \frac{1}{2} m_1 V_1^2$, где $m_1$, $V_1$ – масса и скорость бруса. Энергия вращательного движения блока 2: $T_2 = \frac{1}{2} J_{2z} \omega_2^2$, где $\omega_2$ – угловая скорость блока, $J_{2z}$ – момент инерции блока 2 относительно оси z, $J_{2z} = m_2 i_z^2$.

Каток 3 совершает плоскопараллельное движение. Его кинетическая энергия $T_3 = \frac{1}{2} m_3 V_C^2 + \frac{1}{2} J_{zC} \omega_3^2$, где $V_C$ – скорость центра масс катка 3; $J_{zC}$ – момент инерции катка относительно оси, проходящей через его центр масс перпендикулярно плоскости движения, $J_{zC} = \frac{1}{2} m_3 r^2$; $r$ – радиус катка; $\omega_3$ – угловая скорость катка.

Выразим скорость $V_1$ бруса 1, угловые скорости $\omega_2$, $\omega_3$ блока 2 и катка 3, а также скорость $V_C$ центра масс катка 3 через обобщённую скорость $\dot{x}$.

Заметим, что скорость точки *D* блока 2 равна скорости верхнего края пружины $V_D = \dot{x}$. Угловая скорость блока 2 $\omega_2 = \frac{V_D}{r} = \frac{\dot{x}}{r}$. Скорость бруса 1 равна скорости точки *A* блока 2 и вычисляется по формуле $V_1 = V_A = \omega_2 R = \frac{\dot{x} R}{r}$. Так как брус совершает поступательное движение, то $V_B = V_1$. Угловая скорость катка 3 $\omega_3 = \frac{V_B}{2r} = \frac{V_1}{2r} = \frac{\dot{x} R}{2r^2}$. Здесь при определении угловой скорости катка 3 учтено, что точка *K* касания катка 3 с неподвижной поверхностью является мгновенным центром скоростей катка. Скорость центра катка 3 $V_C = \frac{V_B}{2} = \frac{\dot{x} R}{2r}$.

Подставляя исходные данные задачи с учётом найденных кинематических соотношений, получим кинетическую энергию тел системы

$$T_1 = \frac{1}{2} m_1 V_1^2 = \frac{P}{2g} \left( \frac{\dot{x} R}{r} \right)^2 = 1{,}125 \frac{P}{g} \dot{x}^2, \quad T_2 = \frac{1}{2} J_{2z} \omega_2^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{2P}{g} \left( r\sqrt{2} \right)^2 \left( \frac{\dot{x}}{r} \right)^2 = 2 \frac{P}{g} \dot{x}^2,$$

$$T_3 = \frac{1}{2} m_3 V_C^2 + \frac{1}{2} J_{zC} \omega_3^2 = \frac{1}{2} \frac{P}{g} \left( \frac{\dot{x} R}{2r} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{P r^2}{2g} \left( \frac{\dot{x} R}{2r^2} \right)^2 = 0{,}422 \frac{P}{g} \dot{x}^2 .$$

Тогда полная кинетическая энергия системы:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 = 3{,}547 \frac{P}{g} \dot{x}^2 .$$

Произвольное положение системы определяется обобщённой координатой *x*, показывающей растяжение пружины. Дадим пружине, находящейся в произвольном положении, возможное (бесконечно малое) перемещение $\delta x$ в положительном направлении оси *x* (см. рис. 6.12). При этом блок 2 повернётся на угол $\delta\varphi_2$: $\delta\varphi_2 = \frac{\delta x}{r}$, брус 1 переместится на расстояние $\delta x_1$: $\delta x_1 = \frac{\delta x R}{r}$, центр масс катка 3 сдвинется на расстояние $\delta S_C$: $\delta S_C = \frac{\delta x R}{2r}$. Все перемещения получены из установленных ранее кинематических соотношений и показаны на рис. 6.12.

При заданном возможном перемещении системы работу совершают силы тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_3$ бруса 1 и катка 3, пара сил с моментом *M*, сила $\vec{F}$ и сила упругости пружины (см. рис. 6.12). Элементарная работа вращающего момента *M*, приложенного к блоку 2, будет $\delta A(M) = M\delta\varphi_2 = M \frac{\delta x}{r}$. Работа силы тяжести бруса 1 определяется равенством $\delta A(P_1) = P_1 \delta x_1 \cos 120^\circ = -P_1 \delta x_1 \cos 60^\circ = -\frac{P_1 \delta x R}{2r}$. Работы силы тяжести катка 3 и силы *F*: $\delta A(P_3) = P_3 \delta s_C \cos 120^\circ = -P_3 \frac{\delta x R}{4r}$, $\delta A(F) = F \frac{\delta x R}{2r} \cos 30^\circ$. Модуль силы упругости пружины, растянутой из недеформированного положения на расстояние *x*: $F_{\text{упр}} = cx$. Сила $\vec{F}_{\text{упр}}$ упругости направлена в сторону, противоположную растяжению (см. рис. 6.12). Работа силы упругости при перемещении вдоль линии действия на расстояние $\delta x$ вычисляется по формуле $\delta A(\vec{F}_{\text{упр}}) = F_{\text{упр}} \delta x \cos 180^\circ = -cx\delta x$.

Сумма работ сил на рассматриваемом возможном перемещении системы с учётом данных задачи составляет

$$\delta A = \delta A(M) + \delta A(P_1) + \delta A(P_3) + \delta A(F) + \delta A(F_{\text{упр}}) =$$

$$= M\frac{\delta x}{r} - \frac{P_1 \delta x R}{2r} - P_3\frac{\delta x R}{4r} + F\frac{\delta x R}{2r}\cos 30^\circ - cx\delta x = P(1{,}174 - 5x)\delta x,$$

откуда обобщённая сила $Q_x = P(1{,}174 - 5x)$.

Составим уравнения Лагранжа. Вычислим частные производные от кинетической энергии по обобщенной скорости $\dot{x}$ и координате $x$: $\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} = 7{,}094\frac{P}{g}\dot{x}$, $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$. Определим полную производную по времени: $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}}\right) = 7{,}094\frac{P}{g}\ddot{x}$. Результаты расчетов подставим в уравнения Лагранжа II рода и получим дифференциальное уравнение колебаний верхнего края пружины:

$$7{,}094\frac{P}{g}\ddot{x} = P(1{,}174 - 5x), \text{ или при } g = 9{,}81 \text{ м/с}^2,\ \ddot{x} + 6{,}91x = 1{,}62.$$

Решение дифференциального уравнения представляется в виде суммы общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного: $x = x_{\text{одн}} + x_{\text{частн}}$. Общее решение однородного уравнения имеет вид $x_{\text{одн}} = C_1 \sin kt + C_2 \cos kt$, где $C_1$, $C_2$ – произвольные постоянные; $k$ – круговая частота собственных колебаний пружины, $k = \sqrt{6{,}91} = 2{,}63$ рад/с. Частное решение неоднородного уравнения ищется в виде константы $x_{\text{частн}} = b$. Подставив его в уравнение колебаний, получим $b = 0{,}23$. Таким образом, общее решение неоднородного уравнения имеет вид $x(t) = C_1 \sin 2{,}63t + C_2 \cos 2{,}63t + 0{,}23$.

Произвольные постоянные $C_1$, $C_2$ находятся из начальных условий. По условию задачи в начальный момент пружина была в нерастянутом состоянии. Тогда начальная координата пружины (её верхнего края) $x(0) = 0$. Скорость верхнего края пружины в начальный момент времени $\dot{x}(0)$ равна начальной скорости $V_D(0)$ точки $D$ блока 2. Поскольку в начальный момент времени блоку 2 сообщили угловую скорость $\omega_{20}$, то $\dot{x}(0) = V_D(0) = \omega_{20} r = 0{,}1$ м/с.

Подставляя значение начальной координаты в общее решение неоднородного уравнения при $t = 0$, получим $C_2 = -0{,}23$.

Вычисляем скорость движения пружины, взяв производную: $\dot{x}(t) = 2{,}63C_1\cos 2{,}63t - 2{,}63C_2\sin 2{,}63t$. Подставляя начальное значение скорости, получим $C_1$ = 0,038. Окончательно уравнение движения верхнего края пружин: $x(t) = 0{,}038\sin 2{,}63t - 0{,}23\cos 2{,}63t + 0{,}23$ м.

Уравнения колебательных движений бруса 1 и блока 2 найдём из ранее полученных кинематических соотношений:

$$x_1 = \frac{xR}{r} = 1{,}5\,x(t) = 0{,}057\sin 2{,}63t - 0{,}34\cos 2{,}63t + 0{,}34 \text{ м};$$

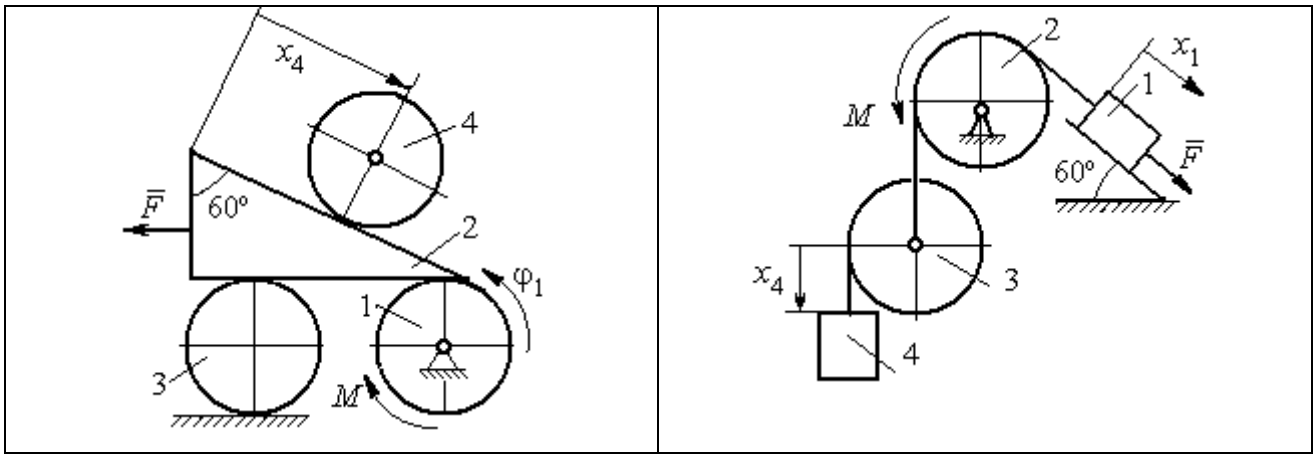
$$\varphi_2 = \frac{x}{r} = 5\,x(t) = 0{,}19\sin 2{,}63t - 1{,}15\cos 2{,}63t + 1{,}15 \text{ рад}.$$

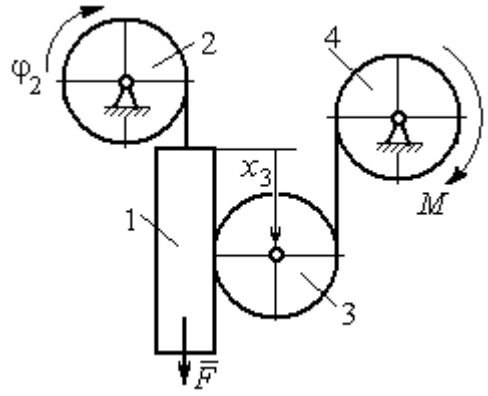
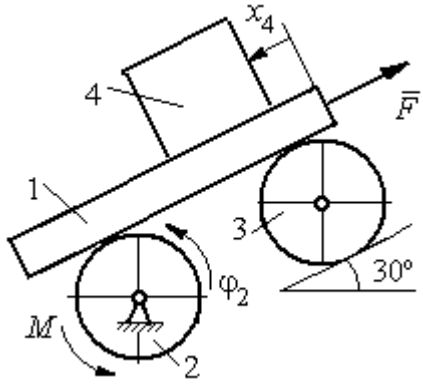
Амплитуда колебаний бруса $A = \sqrt{0{,}057^2 + 0{,}34^2} = 0{,}35$ м.

## 6.5. Задание Д8. Исследование механической системы с двумя степенями свободы

Механическая система, состоящая из четырёх тел, из состояния покоя движется в вертикальной плоскости под действием сил тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$, $\vec{P}_4$, силы $\vec{F}$ и пары сил с моментом $M$. Качение тел во всех случаях происходит без проскальзывания, скольжение грузов по поверхностям – без трения. Радиусы дисков одинаковы и равны $R$. Найти уравнения движения системы в обобщённых координатах. Варианты заданий и рекомендуемые обобщённые координаты даны на рис. 6.13, 6.14, варианты исходных данных – в табл. 6.3.

| **Варианты № 1, 11, 21** | **Варианты № 2, 12, 22** |
|---|---|
| | |




| Варианты № 3, 13, 23 | Варианты № 4, 14, 24 |
|---|---|
|  |  |





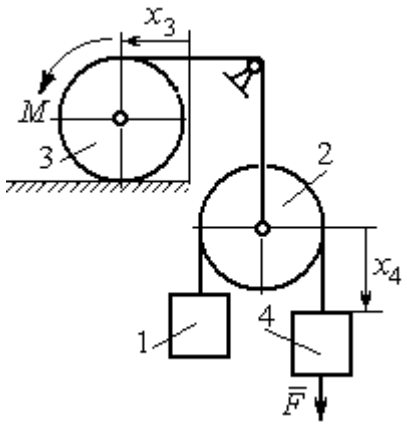
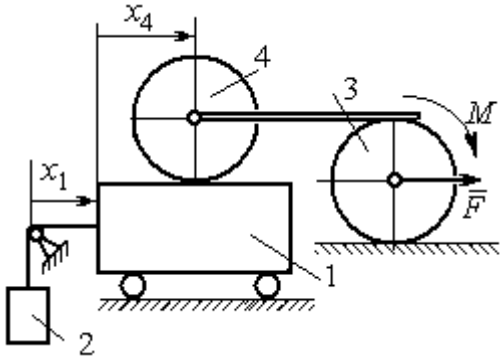
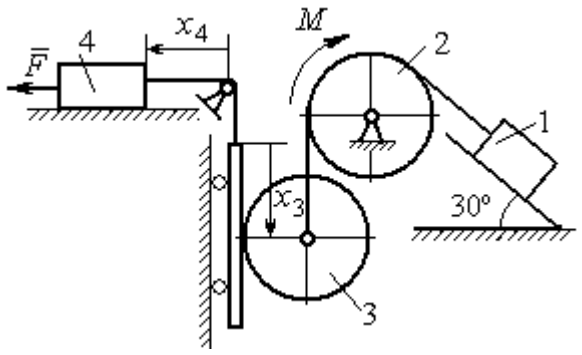
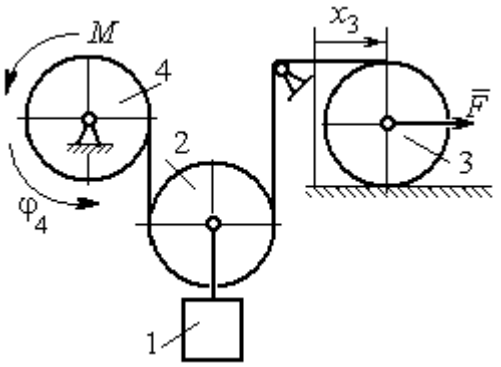
| Варианты № 5, 15, 25 | Варианты № 6, 16, 26 |
|---|---|
|  |  |





Рис. 6.13. Задание Д8. Исследование движения механической системы с двумя степенями свободы. Номера вариантов задания 1 – 6, 11 – 16, 21 – 26

*Окончание вариантов задания Д8*

| **Варианты № 7, 17, 27** | **Варианты № 8, 18, 28** |
|---|---|
|  |  |

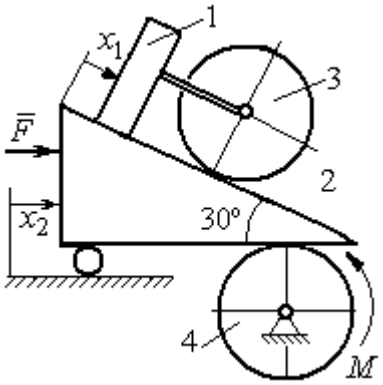
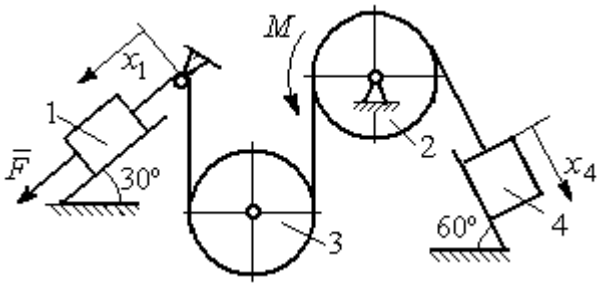
| **Варианты № 9, 19, 29** | **Варианты № 10, 20, 30** |
|---|---|
|  |  |

Рис. 6.14. Задание Д8. Исследование движения механической системы с двумя степенями свободы. Номера вариантов задания 7 – 10, 17 – 20, 27 – 30

Таблица 6.3

**Исходные данные задания Д8. Исследование движения механической системы с двумя степенями свободы**

| Номер варианта задания | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** | **11** | **12** | **13** | **14** | **15** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $P_1$, Н | $P$ | $2P$ | $P$ | $1{,}5P$ | $P$ | $3P$ | $P$ | $1{,}2P$ | $3P$ | $P$ | $2P$ | $P$ | $P$ | $2P$ | $P$ |
| $P_2$, Н | $3P$ | $3P$ | $4P$ | $3P$ | $2P$ | $P$ | $2P$ | $3P$ | $P$ | $2P$ | $3P$ | $2P$ | $3P$ | $4P$ | $3P$ |
| $P_3$, Н | $2P$ | $2P$ | $3P$ | $2P$ | $2P$ | $2P$ | $3P$ | $P$ | $2P$ | $3P$ | $2P$ | $2P$ | $2P$ | $P$ | $2P$ |
| $P_4$, Н | $2P$ | $P$ | $P$ | $2P$ | $3P$ | $3P$ | $P$ | $P$ | $2P$ | $P$ | $P$ | $P$ | $2P$ | $2P$ | $2P$ |
| $R$, м | $2r$ | $1{,}5r$ | $2{,}5r$ | $1{,}2r$ | $2r$ | $r$ | $1{,}5r$ | $r$ | $2r$ | $r$ | $1{,}5r$ | $1{,}2r$ | $2r$ | $2r$ | $2r$ |
| $F$, Н | $P$ | $2P$ | $P$ | $3P$ | $P$ | $P$ | $2P$ | $4P$ | $P$ | $2P$ | $P$ | $2P$ | $1{,}5P$ | $4P$ | $2P$ |
| $M$, Н·м | $2Pr$ | $3Pr$ | $4Pr$ | $3Pr$ | $3Pr$ | $4Pr$ | $2Pr$ | $2Pr$ | $3Pr$ | $2Pr$ | $3Pr$ | $4Pr$ | $3Pr$ | $3Pr$ | $2Pr$ |

*Окончание табл. 6.3*

| Номер варианта задания | **16** | **17** | **18** | **19** | **20** | **21** | **22** | **23** | **24** | **25** | **26** | **27** | **28** | **29** | **30** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $P_1$, Н | $4P$ | $1{,}5P$ | $P$ | $2P$ | $P$ | $P$ | $1{,}5P$ | $1{,}5P$ | $2P$ | $P$ | $P$ | $2P$ | $1{,}2P$ | $3P$ | $1{,}2P$ |
| $P_2$, Н | $2P$ | $2P$ | $2P$ | $4P$ | $3P$ | $4P$ | $3P$ | $4P$ | $3P$ | $2P$ | $2P$ | $1{,}2P$ | $2P$ | $3P$ | $2P$ |
| $P_3$, Н | $2P$ | $2P$ | $3P$ | $2P$ | $2P$ | $3P$ | $2P$ | $2P$ | $P$ | $2P$ | $3P$ | $2P$ | $P$ | $P$ | $3P$ |
| $P_4$, Н | $1{,}5P$ | $2P$ | $3P$ | $P$ | $2P$ | $2P$ | $2P$ | $P$ | $2P$ | $3P$ | $P$ | $P$ | $2P$ | $P$ | $2P$ |
| $R$, м | $1{,}5r$ | $r$ | $1{,}5r$ | $2r$ | $r$ | $1{,}2r$ | $2r$ | $1{,}5r$ | $2r$ | $r$ | $1{,}5r$ | $2r$ | $r$ | $1{,}2r$ | $2r$ |
| $F$, Н | $2P$ | $2P$ | $P$ | $3P$ | $4P$ | $2P$ | $3P$ | $2P$ | $3P$ | $P$ | $3P$ | $1{,}5P$ | $4P$ | $2P$ | $3P$ |
| $M$, Н·м | $3Pr$ | $2Pr$ | $4Pr$ | $Pr$ | $4Pr$ | $4Pr$ | $2Pr$ | $Pr$ | $4Pr$ | $2Pr$ | $4Pr$ | $2Pr$ | $2Pr$ | $3Pr$ | $2Pr$ |

## Пример выполнения задания Д8. Исследование движения механической системы с двумя степенями свободы

Платформа 3 лежит горизонтально на катке 5 и блоке 4 одинакового радиуса $R$ (рис. 6.15). На платформу действует горизонтальная сила $\vec{F}$. К блоку 4, вращающемуся вокруг неподвижной оси, приложена пара сил с моментом $M$. Каток 5 катится по горизонтальной поверхности. К краю платформы одним концом прикреплена горизонтальная нить, а к другому концу, переброшенному через невесомый блок, прикреплён груз 6, движущийся вертикально. На платформе 3 установлен каток 2 радиуса $R$. К центру катка прикреплена нить, расположенная параллельно платформе и натянутая грузом 1, движущимся вертикально (см. рис. 6.15). Движение системы началось из состояния покоя. Качение тел без проскальзывания. Определить уравнения движения системы в обобщённых координатах, если $R = 2r$, веса тел $P_1 = P_6 = P$, $P_3 = 3P$, $P_4 = P_5 = P_2 = 2P$, $F = P$, $M = 3Pr$.

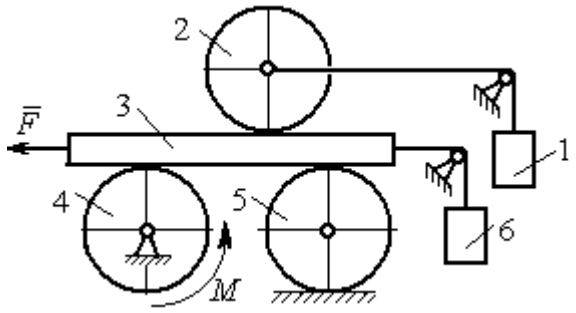


Рис. 6.15. Механическая система с двумя степенями свободы

*Решение*

Рассматриваемая механическая система, включающая катки 2, 5, платформу 3, блок 4 и грузы 1, 6, имеет две степени свободы, так как перемещение катка 2 относительно платформы 3 не зависит от перемещения самой платформы. За обобщенные координаты выберем перемещение $x_2$ центра масс катка 2 относительно

края платформы и перемещение $x_3$ платформы 3 относительно произвольной неподвижной вертикальной плоскости (рис. 6.16). Обобщенные скорости – скорость $\dot{x}_2$ центра масс катка 2 относительно края платформы и скорость платформы $\dot{x}_3$ относительно неподвижной вертикали. Уравнения Лагранжа II рода, описывающие движение системы:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2}\right)-\frac{\partial T}{\partial x_2}=Q_{x_2}, \quad \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_3}\right)-\frac{\partial T}{\partial x_3}=Q_{x_3},$$

где $T$ – кинетическая энергия системы; $Q_{x_2}$, $Q_{x_3}$ – обобщенные силы, соответствующие указанным обобщенным координатам.

Вычислим кинетическую энергию системы как сумму кинетических энергий тел.

Платформа 3 совершает поступательное движение. Кинетическая энергия платформы $T_3=\frac{P_3}{2g}V_3^2$, где $V_3$ – скорость платформы, причём, в соответствии с выбором обобщённых координат и скоростей, $V_3=\dot{x}_3$.

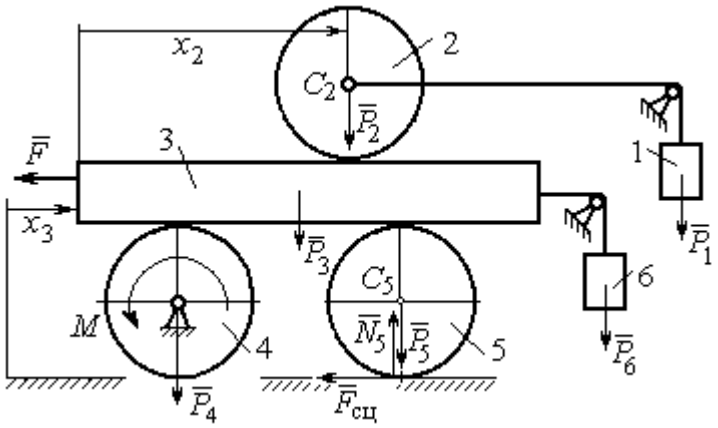


Рис. 6.16. Действующие силы и обобщённые координаты механической системы

Блок 4 вращается вокруг неподвижной оси. Энергия вращательного движения блока $T_4=\frac{1}{2}J_4\omega_4^2$, где $J_4$, $\omega_4$ – осевой момент инерции блока 4 и его угловая скорость. Угловая скорость блока 4 $\omega_4=\frac{V_3}{R_4}=\frac{\dot{x}_3}{2r}$.

Каток 5 совершает плоскопараллельное движение, его кинетическая энергия вычисляется по формуле: $T_5=\frac{1}{2}\frac{P_5}{g}V_{C_5}^2+\frac{1}{2}J_5\omega_5^2$, где $J_5$ – момент инерции катка относительно оси вращения, проходящей через его центр масс; $\omega_5$, $V_{C_5}$ – угловая скорость и скорость центра масс катка 5. Для определения скорости центра масс

катка 5 заметим, что точка касания катка с платформой имеет скорость, равную скорости платформы, а точка *K* касания катка с неподвижной горизонтальной поверхностью является его мгновенным центром скоростей. Следовательно, скорость центра катка равна половине скорости платформы: $V_{C_5} = \frac{1}{2}V_3 = \frac{1}{2}\dot{x}_3$. Угловая скорость катка 5 $\omega_5 = \frac{V_3}{2R_5} = \frac{\dot{x}_3}{4r}$ (рис. 6.17, *a*).

При расчёте кинетической энергии катка 2 необходимо учитывать, что каток совершает сложное движение. Качение катка по поверхности платформы является относительным движением, перемещение его вместе с платформой – переносным. Абсолютная скорость $V_{C_2}$ центра масс катка 2 представляется в виде векторной суммы $\vec{V}_{C_2} = \vec{V}_{C_2r} + \vec{V}_{C_2e}$ (рис. 6.17, *b*), где $\vec{V}_{C_2e}$ – вектор переносной скорости катка, равный по модулю скорости платформы, $V_{C_2e} = V_3 = \dot{x}_3$; $\vec{V}_{C_2r}$ – вектор относительной скорости центра масс катка, равный по величине скорости центра масс катка 2 относительно края платформы, $V_{C_2r} = \dot{x}_2$. Модуль абсолютной скорости центра масс катка 2 равен сумме $V_{C_2} = V_{C_2r} + V_{C_2e} = \dot{x}_2 + \dot{x}_3$ (рис. 6.17, *b*).

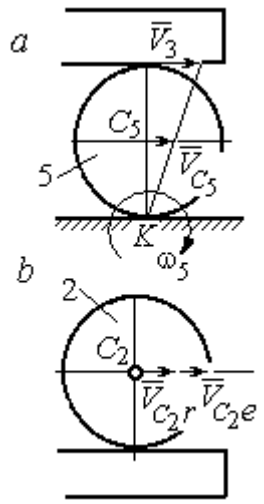


Рис. 6.17. Скорости центров катков 2 и 5

Угловая скорость переносного движения катка 2 равна нулю, поскольку переносное движение катка – это поступательное движение платформы. В результате угловая скорость катка 2 равна его угловой скорости в относительном движении: $\omega_2 = \frac{V_{C_2r}}{R_2} = \frac{\dot{x}_2}{2r}$. Кинетическая энергия катка 2 рассчитывается по формуле: $T_2 = \frac{1}{2}\frac{P_2}{g}V_{C_2}^2 + \frac{1}{2}J_2\omega_2^2$, где $J_2$ – осевой момент инерции катка 2; $\omega_2$ – угловая скорость катка; $V_{C_2}$ – абсолютная скорость центра масс катка 2.

Движение грузов 1 и 6 поступательное, их кинетические энергии вычисляются по формулам: $T_1 = \frac{P_1}{2g} V_1^2$, $T_6 = \frac{P_6}{2g} V_6^2$. При этом скорость груза 1 равна абсолютной скорости центра катка 2: $V_1 = V_{C_2} = \dot{x}_2 + \dot{x}_3$, а скорость груза 6 равна скорости платформы: $V_6 = V_3 = \dot{x}_3$.

Выразим кинетическую энергию системы через обобщённые скорости. Кинетическая энергия:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 =$$

$$= \frac{P_1}{2g} V_1^2 + \frac{1}{2}\frac{P_2}{g} V_{C_2}^2 + \frac{1}{2} J_2 \omega_2^2 +$$

$$\frac{P_3}{2g} V_3^2 + \frac{1}{2} J_4 \omega_4^2 +$$

$$\frac{1}{2}\frac{P_5}{g} V_{C_5}^2 + \frac{1}{2} J_5 \omega_5^2 + \frac{P_6}{2g} V_6^2,$$

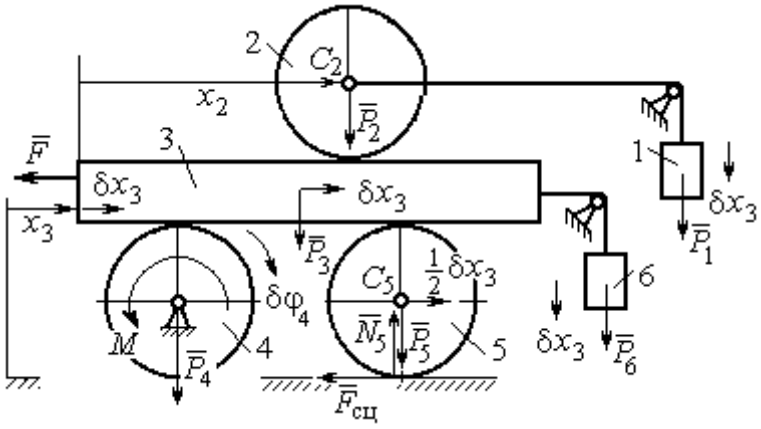



Рис. 6.18. Возможное перемещение системы при вариации обобщённых координат $\delta x_3 > 0$, $\delta x_2 = 0$

где значения скоростей:

$V_1 = \dot{x}_2 + \dot{x}_3$, $V_{C_2} = \dot{x}_2 + \dot{x}_3$, $\omega_2 = \frac{\dot{x}_2}{2r}$, $V_3 = \dot{x}_3$, $\omega_4 = \frac{\dot{x}_3}{2r}$, $V_{C_5} = \frac{1}{2}\dot{x}_3$, $\omega_5 = \frac{\dot{x}_3}{4r}$, $V_6 = \dot{x}_3$

. Значения осевых моментов инерции катков: $J_2 = \frac{P_2 R_2^2}{2g} = \frac{4Pr^2}{g}$, $J_4 = \frac{P_4 R_4^2}{2g} = \frac{4Pr^2}{g}$, $J_5 = \frac{P_5 R_5^2}{2g} = \frac{4Pr^2}{g}$. Подставляя значения скоростей, моментов инерции и данные задачи, получим выражение кинетической энергии системы в виде

$$T = \frac{P}{2g}(\dot{x}_2 + \dot{x}_3)^2 + \frac{1}{2}\cdot\frac{2P}{g}(\dot{x}_2 + \dot{x}_3)^2 + \frac{1}{2}\cdot\frac{4Pr^2}{g}\left(\frac{\dot{x}_2}{2r}\right)^2 + \frac{3P}{2g}\dot{x}_3^2 +$$

$$+\frac{1}{2}\cdot\frac{4Pr^2}{g}\left(\frac{\dot{x}_3}{2r}\right)^2 + \frac{1}{2}\cdot\frac{2P}{g}\left(\frac{\dot{x}_3}{2}\right)^2 + \frac{1}{2}\cdot\frac{4Pr^2}{g}\left(\frac{\dot{x}_3}{4r}\right)^2 + \frac{P}{2g}\dot{x}_3^2 =$$

$$= \frac{1}{2}\frac{P}{g}\dot{x}_2^2 + \frac{3P}{2g}(\dot{x}_2 + \dot{x}_3)^2 + \frac{23P}{8g}\dot{x}_3^2 = \frac{2P}{g}\dot{x}_2^2 + \frac{3P}{g}\dot{x}_2\dot{x}_3 + \frac{35P}{8g}\dot{x}_3^2.$$

Дадим системе возможное перемещение по координате $x_3$, оставляя координату $x_2$ без изменения: $\delta x_3 > 0, \delta x_2 = 0$ (рис. 6.18). При таком перемещении каток 2

стоит на платформе и движется поступательно вместе с ней. В этом случае работа сил тяжести $\vec{P}_2$, $\vec{P}_5$, $\vec{P}_3$ катков 2, 5 и платформы 3 равна нулю, так как перемещения точек приложения этих сил перпендикулярны векторам сил (см. рис. 6.18). Работа силы тяжести $\vec{P}_4$ равна нулю, так как точка приложения силы лежит на неподвижной оси вращения блока 4.

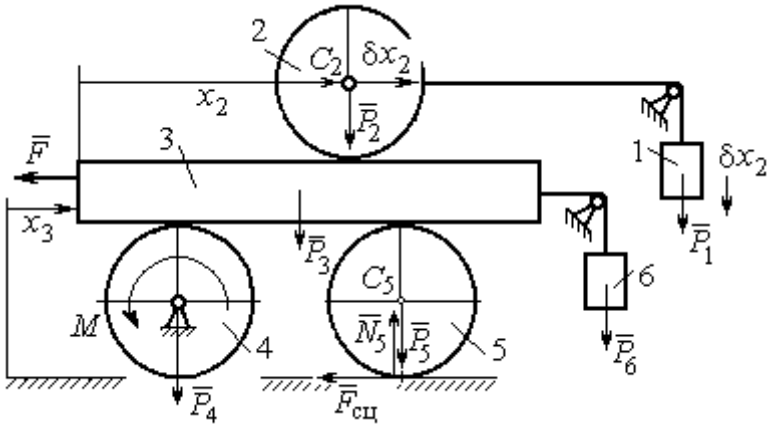



Рис. 6.19. Возможное перемещение системы при вариации обобщённых координат $\delta x_2>0$, $\delta x_3=0$

Работу будут производить сила $\vec{F}$, пара сил с моментом $M$ и силы тяжести грузов $\vec{P}_1$ и $\vec{P}_6$. Суммарная работа сил на перемещении $\delta x_3$: $\delta A = -F\delta x_3 - M\delta\varphi_4 + P_1\delta x_3 + P_6\delta x_3$.

Представим полученное ранее соотношение $\omega_4 = \dfrac{\dot{x}_3}{2r}$ в дифференциальном виде: $d\varphi_4 = \dfrac{dx_3}{2r}$. Поскольку дифференциалы координат также являются возможными перемещениями, получим нужное соотношение $\delta\varphi_4 = \dfrac{\delta x_3}{2r}$. Теперь элементарную работу сил на возможном перемещении $\delta x_3$ с учётом значений сил можно представить в виде:

$$\delta A = -P\delta x_3 - 3Pr\frac{\delta x_3}{2r} + P\delta x_3 + P\delta x_3 = -\frac{1}{2}P\delta x_3,$$

отсюда обобщённая сила, соответствующая координате $x_3$: $Q_{x_3} = -\dfrac{1}{2}P$.

Дадим системе другое независимое перемещение – по координате $x_2$, оставляя координату $x_3$ без изменения: $\delta x_2 > 0$, $\delta x_3 = 0$ (рис. 6.19).

При этом возможном перемещении вся система стоит, кроме катка 2, который катится по поверхности неподвижной платформы, и груза 1, который опускается вертикально вниз. Работу совершает только сила тяжести груза 1. Выражая

работу в виде $\delta A = P_1 \delta x_2 = P\delta x_2$, найдём обобщённую силу, соответствующую координате $x_2$: $Q_{x_2} = P$.

Составим уравнения Лагранжа. С этой целью вычислим частные производные от кинетической энергии по обобщенным скоростям $\dot{x}_3$ и $\dot{x}_2$:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_3} = \frac{3P}{g}\dot{x}_2 + \frac{35P}{4g}\dot{x}_3, \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} = \frac{4P}{g}\dot{x}_2 + \frac{3P}{g}\dot{x}_3$$

и по обобщённым координатам: $\frac{\partial T}{\partial x_3} = 0$, $\frac{\partial T}{\partial x_4} = 0$.

Определим полные производные по времени от частных производных кинетической энергии по скоростям:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_3}\right) = \frac{3P}{g}\ddot{x}_2 + \frac{35P}{4g}\ddot{x}_3, \quad \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2}\right) = \frac{4P}{g}\ddot{x}_2 + \frac{3P}{g}\ddot{x}_3.$$

Подставляя результаты расчётов в уравнения Лагранжа с учётом вычисленных значений обобщённых сил, получим систему дифференциальных уравнений, описывающих движение системы в обобщённых координатах:

$$12\ddot{x}_2 + 35\ddot{x}_3 = -2g, \quad 4\ddot{x}_2 + 3\ddot{x}_3 = g.$$

Алгебраическим решением системы служат значения ускорений:

$$\ddot{x}_3 = -\frac{5}{26}g = -0{,}19g \quad \text{и} \quad \ddot{x}_2 = \frac{41}{104}g = 0{,}39g.$$

Полученные выражения представляют собой дифференциальные уравнения, проинтегрировав которые дважды с нулевыми начальными условиями (движение началось из состояния покоя), найдём уравнения абсолютного движения платформы и относительного движения центра масс катка 2:

$$x_3 = -0{,}095gt^2, \quad x_2 = 0{,}195gt^2.$$

Отрицательное значение координаты $x_3$ означает, что движение платформы происходит в отрицательном направлении оси $x_3$ (см. рис. 6.16).

Абсолютное движение центра катка 2 представляется суммой относительного и переносного движений: $x_{C_2} = x_2 + x_3 = 0{,}1gt^2$.

Уравнение вращательного движения катка 2 находится на основании выражения $\varphi_2 = \frac{1}{R_2} x_2 = \frac{1}{2r} x_2 = 0{,}097 \frac{gt^2}{r}$. Вращение блока 4 описывается уравнением $\varphi_4 = \frac{1}{R_4} x_3 = \frac{1}{2r} x_3 = -0{,}047 \frac{gt^2}{r}$.

Движение катка 5 описывается двумя уравнениями: уравнением движения центра масс катка $x_{C_5} = \frac{1}{2} x_3 = -0{,}047 gt^2$ и уравнением вращательного движения катка $\varphi_5 = \frac{x_3}{2R_5} = -0{,}024 \frac{gt^2}{r}$.

# СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

*Бать М. И.*, *Джанелидзе Г. Ю.*, *Кельзон А. С.* Теоретическая механика в примерах и задачах. Т. 1–2.– СПб.: Лань, 2010.

*Бутенин Н. В.*, *Лунц Я. Л.*, *Меркин Д. Р.* Курс теоретической механики: в 2-х томах.– М.: Наука, 2009.

*Вебер Г. Э.*, *Ляпцев С. А*. Лекции по теоретической механике. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2008.

*Тарг С. М.* Краткий курс теоретической механики: учебн. для втузов. – М.: Высшая школа, 2010.

Учебное издание

Евгений Борисович Волков
Юрий Михайлович Казаков

# ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

*сборник заданий для расчетно-графических работ*

Учебно-методическое пособие
для самостоятельной работы студентов, выполнению практических и контрольных работ

Министерство науки и высшего образования РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

**ОДОБРЕНО**
Методической комиссией
горно-механического факультета

«___» _____ 2018 г.
Председатель комиссии
проф. В. П. Барановский

Брагин В. Г., Волков Е. Б., Казаков Ю. М.

# ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

*Учебное пособие*

Издание УГГУ Екатеринбург,
2018

УДК 531
Б 87

Рецензент: *Н. М. Суслов*, д-р техн. наук, заведующий кафедрой ГМК
Уральского государственного горного университета.

Учебное пособие рассмотрено на заседании кафедры технической механики от «07» июня 2018 г. (протокол № 7) и рекомендовано для издания в УГГУ.

Печатается по решению Учебно-методического совета Уральского государственного горного университета.

**Брагин В. Г., Волков Е. Б., Казаков Ю. М.**

Б 87 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА: Учебное пособие / Ю. М. Казаков, В. Г. Брагин, Е. Б. Волков. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2018. – 250 с.
ISBN 978-5-8019-0460-3

Учебное пособие содержит краткие методические указания, примеры решений задач и упражнения для самостоятельной работы по основным темам курса теоретической механики: статика, кинематика точки и простейшие движения твёрдых тел, сложное движение точки, динамика точки и механической системы. Учебное пособие для студентов всех специальностей очной и заочной форм обучения.

ISBN 978-5-8019-0460-3

©Брагин В. Г., Волков Е. Б.,
Казаков Ю. М., 2018
©Уральский государственный горный университет, 2018

# 1. СТАТИКА

## 1.1. Основные понятия статики

**Статика** представляет раздел теоретической механики, в котором освещаются условия равновесия тел под действием систем сил.

**Материальной точкой** называют простейшую модель материального тела, размерами которого можно пренебречь и которое можно принять за геометрическую точку, имеющую массу, равную массе тела. Совокупность материальных точек называется **системой материальных точек**. Если система материальных точек такова, что движение каждой точки зависит от положения и движения остальных точек системы, то система называется **механической системой материальных точек**. Любое материальное тело представляет собой механическую систему материальных точек. Если точки системы связаны между собой так, что расстояния между любыми двумя точками не изменяются, то система называется **неизменяемой системой**, а тело – **абсолютно твердым телом**.

**Силой** в механике называют меру механического действия одного материального объекта (например, твердого тела) на другой. Единицей измерения силы в системе СИ является ньютон (Н). Совокупность сил, действующих на механическую систему (в частности, на твёрдое тело), называют **системой сил.**

Если система сил, приложенная к твердому телу, оставляет его в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, то такая система сил называется **уравновешенной,** или **системой сил, эквивалентной нулю**.

Если одну систему сил, действующих на твердое тело или материальную точку, можно заменить другой системой, не изменяя при этом состояния покоя или движения, в котором находится тело или материальная точка, то такие две системы сил называются **эквивалентными**. Если система сил эквивалентна одной силе, то эта сила называется **равнодействующей** данной системы сил.

## Основные виды связей и их реакции

Всякое твердое тело, которое может занимать произвольное положение в пространстве, называется свободным. Если на тело наложены внешние связи, стесняющие (ограничивающие) свободу его перемещений, то тело является несвободным. Сила, с которой данная связь действует на тело, препятствуя его перемещениям, называется **реакцией связи**. Всякое несвободное твердое тело можно рассматривать как свободное, если освободить тело от связей и заменить действие связей их реакциями. **Реакция связи направлена в сторону, противоположную тому направлению, вдоль которого связь препятствует перемещению тела.**

**Опора тела на гладкую плоскость (поверхность) без трения.** Реакция $\vec{R}$ абсолютно гладкой поверхности приложена в точке касания и направлена перпендикулярно к общей касательной соприкасающихся поверхностей (рис. 1.1, *a*). Такая реакция называется **нормальной реакцией**.

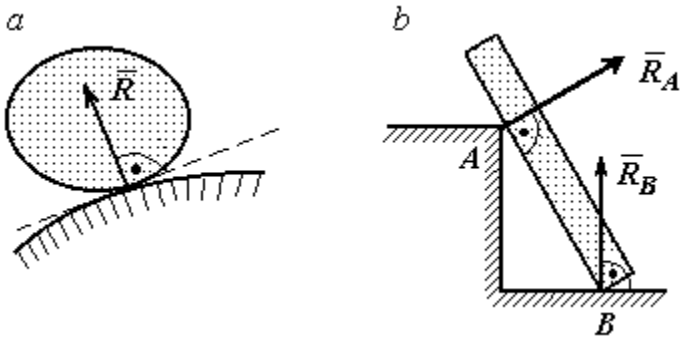



Рис. 1.1. Реакция опоры:

Брус с гладкой поверхностью (рис. 1.1, *b*), опирающийся в точке *B* на гладкий пол и в точке *A* на ребро (точечную опору), имеет реакциями опор $\vec{R}_B$ – реакцию пола и $\vec{R}_A$ – реакцию ребра (точечной опоры). Реакции приложены к брусу и направлены по нормалям к поверхности пола и поверхности бруса.

**Цилиндрический шарнир и подвижная опора (каток).** Цилиндрический шарнир (на рис. 1.2, *a* обозначен буквой *A*) представляет собой устройство, которое допускает поворот тела в плоскости, перпендикулярной оси шарнира (например, цилиндрическая втулка, надетая на неподвижный цилиндр).

Реакция цилиндрического шарнира $\vec{R}_A$ лежит в плоскости, перпендикулярной оси шарнира. При решении задач неизвестную по величине и направлению реакцию цилиндрического шарнира представляют в виде составляющих, $\vec{X}_A$, $\vec{Y}_A$, направленных вдоль координатных осей (см. рис. 1.2, *a*). Величина реакции $\vec{R}_A$ определяется по формуле: $R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2}$, где $\vec{X}_A$, $\vec{Y}_A$ – составляющие реакции.

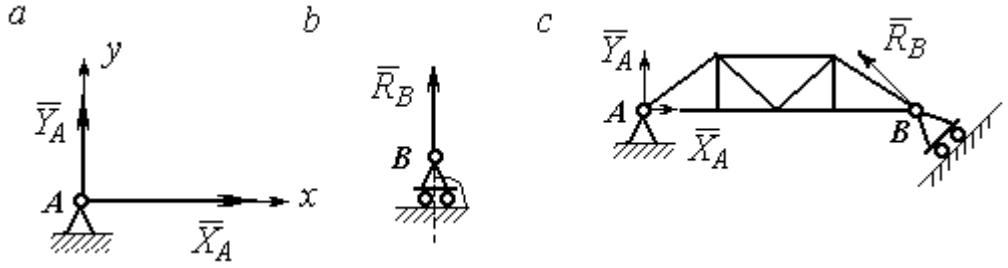



Рис. 1.2. Реакции шарнирных опор:
*a* – цилиндрический шарнир; *b* – каток; *c* – мостовая конструкция с цилиндрической шарнирной опорой и опорой на каток

Реакция $\vec{R}_B$ опоры на каток (подвижной опоры) (рис. 1.2, *b*) перпендикулярна опорной поверхности.

На рис. 1.2, *c* показаны реакции связей мостовой конструкции с цилиндрической шарнирной опорой и подвижной опорой (катком). Реакция цилиндрического шарнира в точке *A* изображена в виде разложения на взаимно перпендикулярные составляющие $\vec{X}_A$, $\vec{Y}_A$, реакция $\vec{R}_B$ катка в точке *B* перпендикулярна наклонной плоскости, на которой стоит каток.

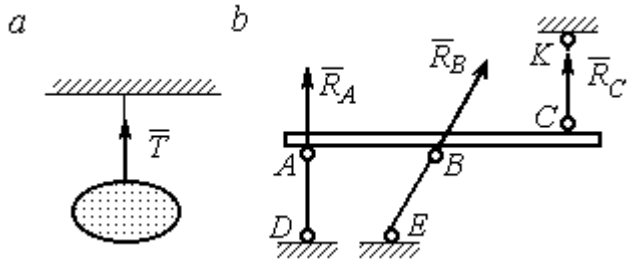



Рис. 1.3. Реакция гибкой нити и невесомого стержня

**Гибкая связь и жесткий невесомый стержень.** Связь в виде гибкой нерастяжимой нити (каната, троса) препятствует удалению тела от точки подвеса. (рис. 1.3, *a*). Реакция связи $\vec{T}$,

равная натяжению нити, приложена к телу и направлена вдоль нити в сторону противоположную направлению, вдоль которого нить препятствует перемещению тела

Если опорой тела служит невесомый стержень с шарнирами на концах, то реакция прямолинейного стержня приложена к телу и направлена вдоль стержня. Направление реакции стержня противоположно направлению, по которому стержень препятствует перемещению тела.

Реакции невесомых стержней, удерживающих балку, изображённую на рис. 1.3, *b*, направлены исходя из предположения, что балка может перемещаться вниз. При этом стержни *AD* и *BE* сжаты, а стержень *CK* растянут.

**Сферический шарнир.** Связь в виде сферического шарнира не позволяет перемещать тело в пространстве, но допускает поворот в пространстве вокруг неподвижной точки. Реакция сферического шарнира может иметь любое направление в пространстве. При решении задач реакцию изображают ее составляющими. На рис. 1.4 реакция $\vec{R}_A$ сферического шарнира *A* разложена на составляющие $\vec{X}_A, \vec{Y}_A, \vec{Z}_A$ по направлениям координатных осей. Величина реакции сферического шарнира определяется по формуле: $R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2 + Z_A^2}$.

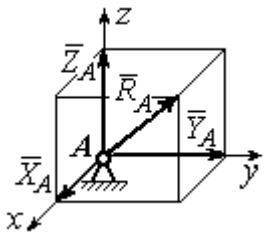


Рис. 1.4. Реакция сферического шарнира

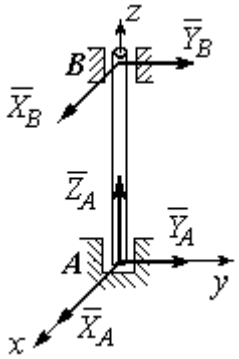


Рис. 1.5. Реакции подшипника и подпятника

**Подшипник и подпятник.** Подшипник представляет собой цилиндрический шарнир (рис. 1.5, подшипник *B*). Его реакция может иметь любое направление в плоскости, перпендикулярной оси шарнира. При решении задач реакция подшипника раскладывается на две составляющие. Например, на рис. 1.5 реакция $\vec{R}_B$ подшипника *B* разложена на составляющие $\vec{X}_B, \vec{Y}_B$, параллельные

координатным осям. Величина реакции подшипника определяется по формуле: $R_B = \sqrt{X_B^2 + Y_B^2}$ .

Подпятник является цилиндрическим шарниром с упором. В задачах реакция подпятника обычно изображается векторами $\vec{X}_A, \vec{Y}_A, \vec{Z}_A$, представляющими разложение силы реакции подпятника по заданным направлениям координатных осей (см. рис. 1.5, подпятник *A*). Величина реакции подпятника определяется по формуле: $R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2 + Z_A^2}$ .

## Проекция силы на ось и на плоскость

**Проекция силы на ось** есть алгебраическая величина, равная произведению модуля силы на косинус угла между силой и положительным направлением оси. Если этот угол острый, проекция положительна, если тупой – отрицательна. Если сила перпендикулярна оси, её проекция на ось равна нулю.

Проекции сил $\vec{F}$ , $\vec{Q}$ , $\vec{P}$, изображённых на рис. 1.6, *a*, на ось *x*: $F_x = F\cos\alpha$ , $Q_x = Q\cos\alpha_1 = -Q\cos\varphi$, $P_x = P\cos 90^\circ = 0$.

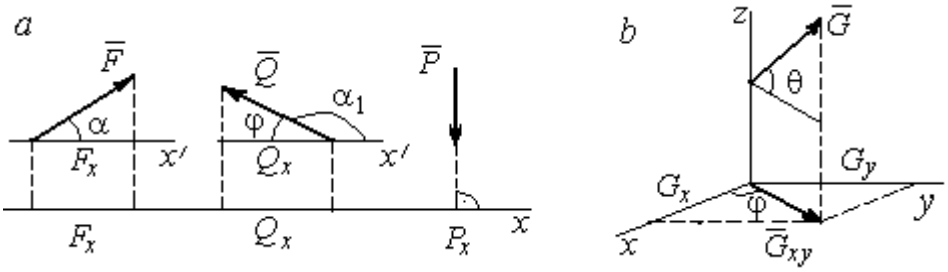



Рис. 1.6. Проекция силы на ось и на плоскость:
*a* – проекция силы на ось; *b* – проекция силы на плоскость

**Проекцией силы на плоскость** называется вектор, заключённый между проекциями начала и конца силы $\vec{G}$ на эту плоскость.

На рис. 1.6, *b* вектор $\vec{G}_{xy}$ является проекцией силы $\vec{G}$ на плоскость *xy*. По величине $G_{xy} = G\cos\theta$, где $\theta$ – угол между направлением силы $\vec{G}$ и её проекции

$\vec{G}_{xy}$. Проекции силы $\vec{G}$ на оси $xyz$: $G_x = G_{xy}\cos\varphi = G\cos\theta\cos\varphi$, $G_y = G_{xy}\sin\varphi = G\cos\theta\sin\varphi$, $G_z = G\sin\theta$.

## 1.2. Система сходящихся сил. Условия равновесия

Для равновесия **пространственной системы сходящихся сил** необходимо и достаточно, чтобы суммы проекций всех сил на каждую из трёх осей прямоугольной системы координат были равны нулю:

$$\sum F_{kx} = 0,\ \sum F_{ky} = 0,\ \sum F_{kz} = 0,$$

где $F_{kx}, F_{ky}, F_{kz}$ – проекции всех сил на координатные оси.

Для равновесия **плоской системы сходящихся сил** необходимо и достаточно, чтобы суммы проекций всех сил на каждую из двух осей прямоугольной системы координат, расположенной в плоскости действия сил, были равны нулю: $\sum F_{kx} = 0,\ \sum F_{ky} = 0$, где $F_{kx}, F_{ky}$ – проекции всех сил на координатные оси.

**Примеры решения задач на равновесие сходящейся системы сил**

**Задача 1.** Каток весом 20 кН удерживается на гладкой наклонной плоскости тросом, который одним концом закреплён на поверхности шара, а другим – на вертикальной стене (рис. 1.7). Угол наклона троса к вертикальной стене $\beta = 120°$. Угол наклона плоскости к горизонту $\alpha = 45°$. Определить силу давления катка на плоскость и натяжение троса.

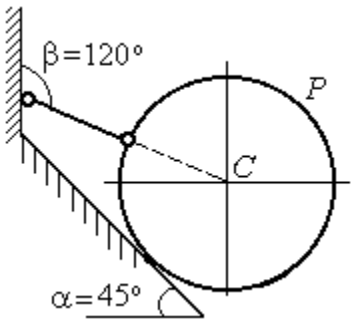



Рис. 1.7. Равновесие шара

*Решение*

При равновесии на каток действуют сила тяжести $\vec{P}$, реакция троса $\vec{N}$ и реакция опоры $\vec{R}$. Линии действия всех сил находятся в одной плоскости и пересекаются в центре шара. Направления реакций показаны на рис. 1.8.

Условия равновесия плоской сходящейся системы сил:

$$\sum F_{kx} = 0,\ \sum F_{ky} = 0.$$

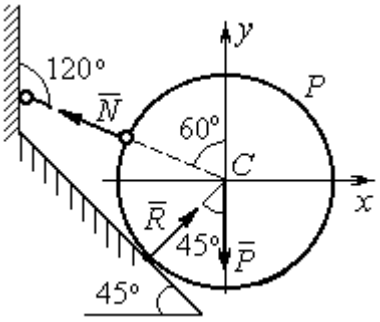


Рис. 1.8. Силы, действующие на каток, при его равновесии

Проведя оси координат, как показано на рис. 1.8, выразим условия равновесия в виде системы уравнений:

$$\sum F_{kx} = -N\cos 30^\circ + R\cos 45^\circ = 0;\ \sum F_{ky} =$$

$$N\cos 60^\circ + R\cos 45^\circ - P = 0.$$

Подставляя в уравнения исходные данные задачи, найдем: $N$ = 14,64 кН, $R$ = 17,93 кН.

Натяжение троса равно модулю его реакции. Сила давления катка на плоскость равна реакции опоры гладкой плоскости, но направлена в противоположную сторону.

**Задача 2.** Кронштейн состоит из невесомых стержней *AC* и *BC*, скрепленных друг с другом и с вертикальной стеной шарнирами, как показано на рис. 1.9. Стержень *BC* горизонтален, стержень *AC* составляет с горизонталью угол β = 60º. К шарниру *C* прикреплены два троса, удерживающие грузы 1 и 2 весом $G_1$ = 10 кН и $G_2$ = 12 кН. Трос, удерживающий груз 1, вертикален, а другой перекинут через блок *D* так, что угол наклона участка троса *CD* к вертикали α = 60º. Определить реакции стержней *BC* и *AC*.

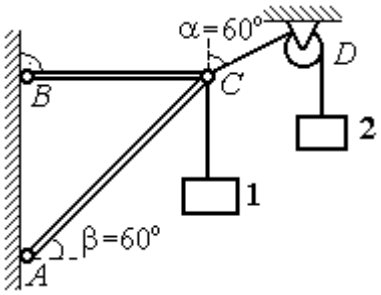


Рис. 1.9. Равновесие кронштейна

*Решение*

Рассмотрим равновесие узла *C*, в котором закреплены стержни и тросы. На узел *C* действуют реакции $\vec{T}_1$ и $\vec{T}_2$ тросов, натянутых грузами 1 и 2, и реакции $\vec{N}_1$ и $\vec{N}_2$ стержней *BC* и *AC* (рис. 1.10). Модули реакций тросов $\vec{T}_1$ и $\vec{T}_2$ равны весу грузов: $T_1 = G_1$, $T_2 = G_2$.

Плоская система сил ($\vec{T}_1$, $\vec{T}_2$, $\vec{N}_1$, $\vec{N}_2$) является сходящейся. Условия равновесия: $\sum F_{kx} = 0$, $\sum F_{ky} = 0$. Проведя оси координат $xCy$, как показано на рис. 1.10, и определяя проекции сил на оси, получим систему уравнений:

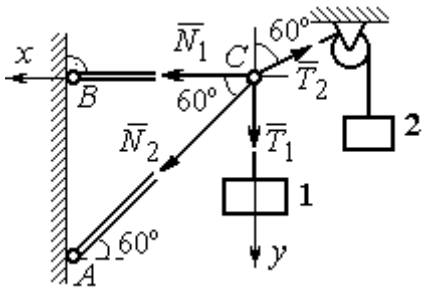



Рис. 1.10. Силы, действующие на узел *C* при его равновесии

$$N_1 + N_2\cos 60^\circ - T_2\cos 30^\circ = 0;$$

$$N_2\cos 30^\circ + T_1 - T_2\cos 60^\circ = 0.$$

Подставим в уравнения исходные данные задачи. С учётом того, что $T_1 = G_1 = 10$ кН, $T_2 = G_2 = 12$ кН, найдём значения реакций: $N_1$ = 12,7 кН, $N_2$ = – 4,62 кН. Отрицательная величина $N_2$ означает, что вектор $\vec{N}_2$ реакции стержня *AC* направлен в противоположную сторону.

**Задача 3.** Груз весом *P* = 20 кН поднимается стержневым краном *ABC* посредством каната, перекинутого через блоки *B* и *D* (рис. 1.11). Блок *B* установлен в месте шарнирного соединения невесомых стержней *AB* и *BC*, блок *D* укреплён так, что участок троса *DB* составляет с вертикалью угол $\beta = 60^\circ$. Стержни *AB* и *BC* соединены со стенками шарнирами. Конец троса, несущий груз *P*, переброшен через блок *E* и на отрезке *BE* составляет с вертикалью угол $\alpha = 30^\circ$. Пренебрегая трением в блоке и размерами блока *B*, определить усилия в стержнях *AB* и *BC* при равновесии груза.

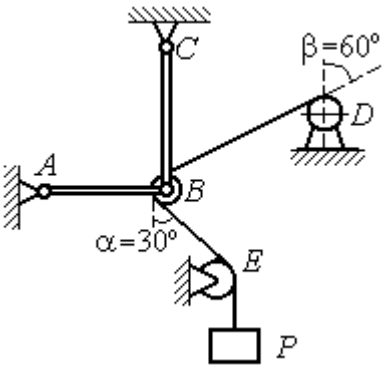



Рис. 1.11. Равновесие стержневой конструкции

*Решение*

Рассмотрим равновесие блока *B* вместе с отрезками нити *BE* и *BD*. Освободим блок *B* от связей и заменим их реакциями.

Рассматривая блок и отрезок нити как одно целое, можно не учитывать силы взаимного давления нити и блока. На блок действует реакция $\vec{T}$ нити *BD*, приложенная в точке *D*, численно равная весу груза *P*, реакция $\vec{T}'$ нити *BE*, приложенная в точке *E* и также численно равная весу груза *P* и реакции стержней $\vec{N}_1$, $\vec{N}_2$ (см. рис. 1.12).

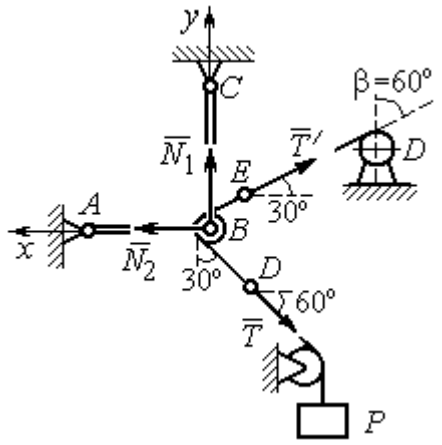



Рис. 1.12. Силы, действующие на блок *B*, при его равновесии

Пренебрегая размерами блока, можно считать систему сил сходящейся. Проведём координатные оси, как показано на рис. 1.12, и выразим условия равновесия плоской сходящейся системы сил в виде системы уравнений:

$$\sum F_{kx} = N_2 - T'\cos 30^\circ - T\cos 60^\circ = 0;\ \sum F_{ky} = N_1 + T'\cos 60^\circ - T\cos 30^\circ = 0.$$

Решая полученную систему уравнений с учётом, что $T' = T = P$ = 20 кН, получим: $N_1$ = 7,32 кН, $N_2$ = 27,32 кН.

**Задача 4.** Шахта ориентируется в вертикальной плоскости с помощью несвободного проволочного отвеса *CBDP*, натянутого грузом весом *P* = 50 Н (рис. 1.13).

Определить натяжения частей отвеса *CB*, *BD*, *DP* и натяжения оттяжек *BA* и *DE*, если угол отклонения оттяжки *BC* от горизонтали $\alpha = 60^\circ$, а отклонение средней части отвеса *BD* от вертикали $\beta = 4^\circ$. Весом проволоки отвеса пренебречь.

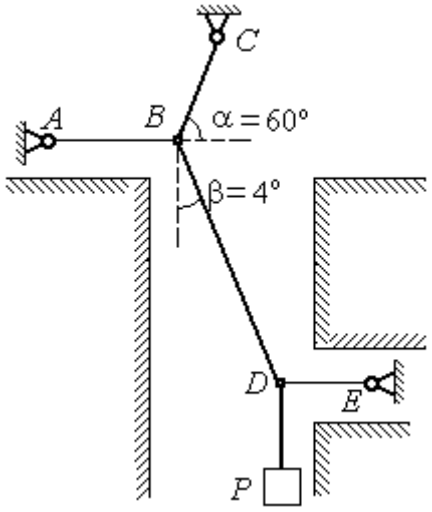



Рис. 1.13. Схема отвеса

*Решение*

Рассмотрим равновесие узла *D*, в котором сходятся три силы – реакция $\vec{S}$ средней части отвеса, реакция $\vec{T}_E$ оттяжки *DE* и реакция $\vec{T}_P$ отвеса на участке

*DP*, равная весу груза $T_P = P$ (рис. 1.14). Выберем оси координат *xDy*, как показано на рис. 1.14, и составим уравнения равновесия узла *D:*

$$\sum F_{kx} = S\cos 86^\circ - T_E = 0; \quad \sum F_{ky} = S\cos 4^\circ - T_P = 0.$$

Из второго уравнения с учётом, что натяжение отвеса на участке *DP* $T_P = P = 50$ Н, находим натяжение $S$ на среднем участке отвеса: $S = \dfrac{T_P}{\cos 4^\circ} = 50{,}12$ Н. Из первого уравнения находим натяжение $T_E = S\cos 86^\circ = 3{,}49$ Н.

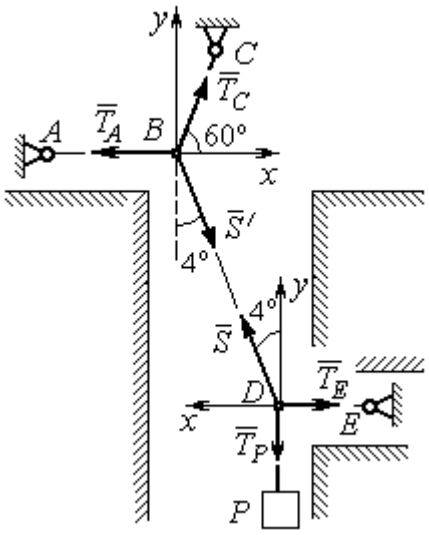


Рис.1.14. Силы, действующие в узлах *B* и *D* при равновесии

Теперь рассмотрим равновесие узла *B*, на который действуют реакция $\vec{T}_A$ оттяжки *BA*, реакция $\vec{T}_C$ верхней части отвеса *BC* и реакция $\vec{S}'$ средней части отвеса. Вектор силы $\vec{S}'$ противоположен направлению вектора $\vec{S}$: $\vec{S}' = -\vec{S}$, а численно (по принципу равенства действия и противодействия) они равны $S' = S$ (см. рис. 1.14). Выберем оси координат *xBy*, как показано на рис. 1.14, и составим уравнения равновесия узла *B:*

$$\sum F_{kx} = T_C\cos 60^\circ + S'\cos 86^\circ - T_A = 0; \quad \sum F_{ky} = T_C\cos 30^\circ - S'\cos 4^\circ = 0.$$

Находим натяжение отвеса на верхнем участке *BC* и натяжение $T_A$ оттяжки *BA*: $T_C = \dfrac{S'\cos 4^\circ}{\cos 30^\circ} = 57{,}73$ Н; $T_A = T_C\cos 60^\circ + S'\cos 86^\circ = 32{,}36$ Н.

**Задача 5.** Груз *P* = 20 кН удерживается двумя стержнями *AC*, *AD* одинаковой длины и цепью *AB*, скреплённых в точке *A*, так, что плоскость треугольника *ADC* горизонтальна (рис. 1.15). Цепь *BA* отклонена от вертикальной стены на угол $\beta = 60^\circ$ и расстояние *CE* = *ED*. Трос закреплён одним концом в точке *A*, а другой его конец, несущий груз, переброшен через блок *K* так, что отрезок троса *AK* находится в плоскости, параллельной плоскости

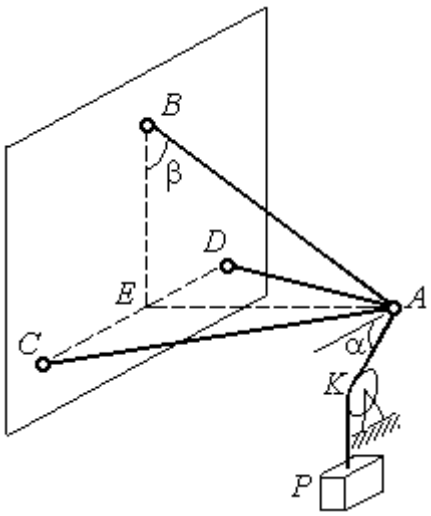


Рис. 1.15. Конструкция пространственного кронштейна

стены, и составляет с горизонтом угол $\alpha = 30^\circ$. Крепления стержней шарнирные. Углы у оснований стержней $\angle DCA = \angle CDA = 60^\circ$. Определить реакции стержней и натяжение цепи. Весами стержней пренебречь.

*Решение*

Рассмотрим равновесие узла *A*. Освобождаем узел от связей, заменяя действие связей реакциями. Реакции стержней $\vec{S}_D$ и $\vec{S}_C$ направлены по стержням, реакция цепи $\vec{S}_B$ направлена вдоль линии натянутой цепи (рис. 1.16).

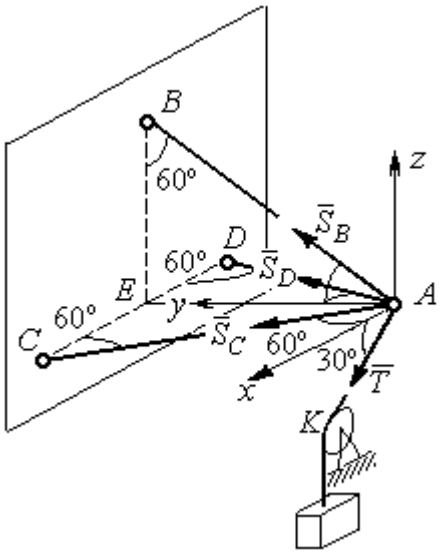


Рис. 1.16. Силы, действующие на узел *A*, при его равновесии

Реакция троса $\vec{T}$ направлена вдоль троса по линии *AK* и численно равна весу груза: $T = P$. Направления реакций выбраны в предположении, что стержни и цепь растянуты.

Выберем систему координат, как показано на рис. 1.16. На узел *A* действует пространственная сходящаяся система сил.

Условия равновесия пространственной сходящейся системы сил $\sum F_{kx} = 0,\ \sum F_{ky} = 0,\ \sum F_{kz} = 0$, где $F_{kx}, F_{ky}, F_{kz}$ – проекции всех сил на координатные оси. Составляем уравнения равновесия:

$$\sum F_{kx} = S_C \cos 60^\circ - S_D \cos 60^\circ + T \cos 30^\circ = 0;$$

$$\sum F_{ky} = S_C \cos 30^\circ + S_D \cos 30^\circ + S_B \cos 30^\circ = 0; \quad \sum F_{kz} = S_B \cos 60^\circ - T \cos 60^\circ = 0.$$

Решая эту систему, находим $S_B = T = P = 20$ кН; $S_C = -27{,}32$ кН; $S_D = 7{,}32$ кН. Знак минус величины $S_C$ показывает, что реакция стержня $AC$ имеет обратное направление. Натяжение цепи равно модулю реакции $\vec{S}_B$.

**Задача 6.** Подъёмное устройство (рис. 1.17) состоит из двух стержневых опор *DB* и *DA* и растяжки *DC*, соединённых в точке *D*. В точке *D* к устройству прикреплена вертикальная нить, удерживающая груз весом *P* = 50 кН.

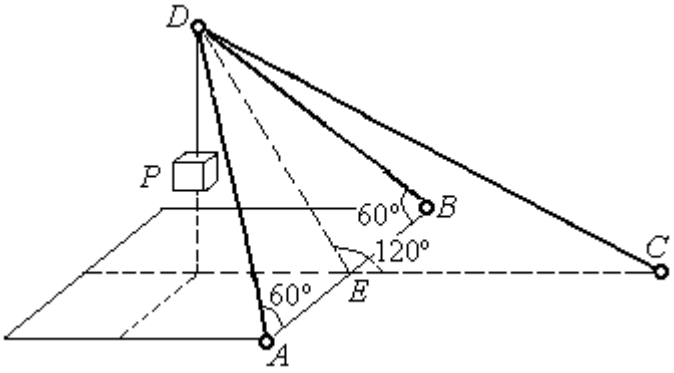


Рис. 1.17. Конструкция подъёмного устройства

Определить реакцию стержневых опор и усилие в растяжке подъёмного устройства, если крепления стержней шарнирные, угол $\angle DEC = 120^\circ$, $AE = EB$, $DE = EC$, а углы в основании опор $\angle DAB = \angle DBA = 60^\circ$.

*Решение*

Рассматриваем равновесие узла *D*. Освобождаем узел от связей, заменяя действие связей реакциями. Реакции стержней $\vec{S}_A$, $\vec{S}_B$, $\vec{S}_C$ направлены по стержням, реакция нити $\vec{T}$, численно равная весу тела, направлена вдоль нити (рис. 1.18). Направление реакций выбрано в предположении, что все стержни растянуты.

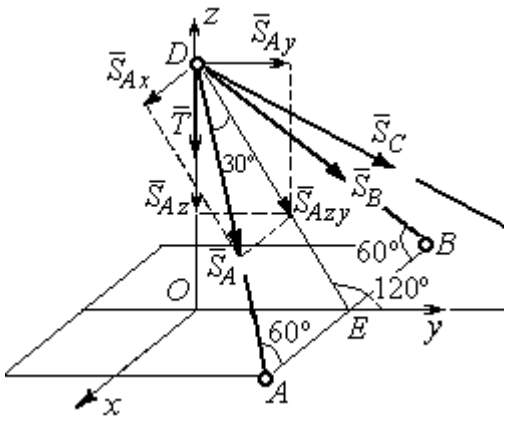


Рис. 1.18. Силы, действующие на узел *D*, при его равновесии

На узел *D* действует пространственная сходящаяся система сил. Выберем систему координат *Oxyz*, как показано на рис. 1.18, и составим уравнения равновесия. Заметим, что при определении проекции силы $\vec{S}_A$ на оси координат следует вначале получить её проекции $\vec{S}_{Ax}$

на ось $Ox$ и $\vec{S}_{Azy}$ – на плоскость $Oyz$, а затем найти проекции силы $\vec{S}_{Azy}$ на оси $Oy$ и $Oz$. На рис. 1.18 показана последовательность вычисления проекций силы $\vec{S}_A$ на оси координат: $S_{Ax} = S_A\cos60^\circ$, $S_{Ay} = S_{Azy}\cos60^\circ = S_A\cos30^\circ\cos60^\circ$, $S_{Az} = -S_{Azy}\cos30^\circ = -S_A\cos^2 30^\circ$. Определение проекций силы $\vec{S}_B$ производится аналогично. Сила $\vec{S}_C$ расположена в плоскости $Oyz$ и имеет своими проекциями $S_{Cy} = S_C\cos30^\circ$, $S_{Cz} = -S_C\cos60^\circ$. В результате уравнения равновесия узла $D$ принимают вид

$$\sum F_{ky} = S_A\cos30^\circ\cos60^\circ + S_B\cos30^\circ\cos60^\circ + S_C\cos30^\circ = 0;$$

$$\sum F_{kx} = S_A\cos60^\circ - S_B\cos60^\circ = 0;$$

$$\sum F_{kz} = -S_A\cos^2 30^\circ - S_B\cos^2 30^\circ - S_C\cos60^\circ - T = 0.$$

Решая систему, получим: $S_A = S_B = -50$ кН, $S_C = 50$ кН.

Отрицательные значения $S_A$ и $S_B$ означают, что реакций стержней $AD$ и $DB$ направлены в противоположную сторону. В результате стержни $AD$ и $DB$ сжаты, а стержень $DC$ растянут.

### 1.3. Произвольная плоская система сил

Система сил, расположенных в одной плоскости, называется **плоской системой сил.**

Алгебраическим моментом $M_O(\vec{F})$ силы $\vec{F}$ относительно центра $O$, или просто **моментом силы** $\vec{F}$ относительно центра, называют взятое с соответствующим знаком произведение модуля силы $\vec{F}$ и кратчайшего расстояния $h$ от центра до линии действия силы (рис. 1.19, *а*): $M_O(\vec{F}) = \pm Fh$. Величину $h$ называют **плечом силы.** Единица измерения момента – Н·м. Момент считается положительным, если сила $\vec{F}$ стремится повернуть тело вокруг центра в направлении против хода часовой стрелки, и отрицательным – в обратном случае.

На рис. 1.19, *b* показаны знаки моментов сил $\vec{F}$ и $\vec{Q}$ относительно центра *O*: $M_O(\vec{F}) = +Fh_2$, $M_O(\vec{Q}) = -Qh_1$. Момент силы $\vec{R}$ относительно центра *O* равен нулю: $M_O(\vec{R}) = 0$, так как плечо силы равно нулю.

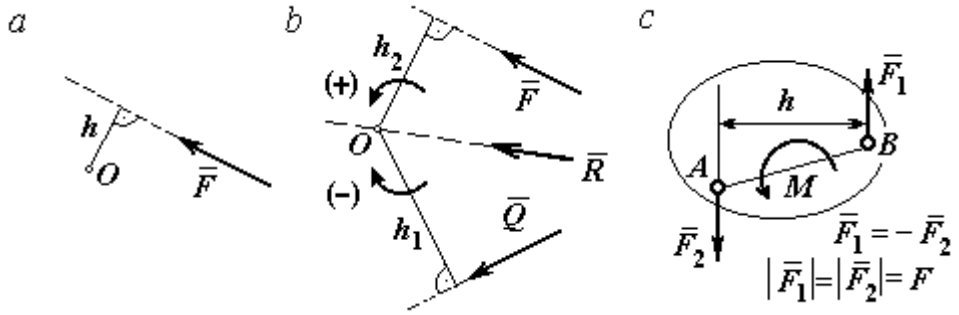



Рис. 1.19. Схемы к вычислению момента силы:
*a, b* – момент силы относительно центра; *c* – момент пары сил

**Парой сил,** или просто парой (рис.1.19, *c*), называют систему двух равных по модулю сил, параллельных, направленных в противоположные стороны и не лежащих на одной прямой. **Плечом пары** называют кратчайшее расстояние между линиями действия ее сил. Алгебраическим моментом пары сил, или **моментом пары,** называют взятое со знаком плюс или минус произведение модуля одной из сил пары и плеча пары. Правило знаков такое же, как и для момента силы. Пара сил, показанная на рис. 1.19, *c*, имеет плечо *h* и момент *M*: $M = F_1 h = F_2 h$. Поскольку пара сил характеризуется только ее моментом, на схемах пару часто изображают дуговой стрелкой, показывающей направление поворота твердого тела под действием пары (см. *M* на рис. 1.19, *c*).

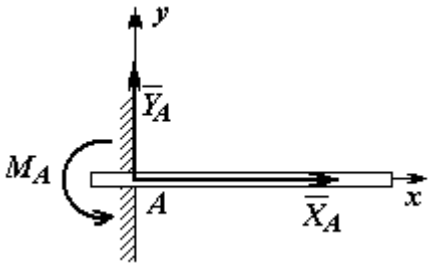



Рис. 1.20. Реакция жесткой заделки

**Жесткая заделка.** Такая связь (рис. 1.20) препятствует не только линейным перемещениям тела, но и повороту. Реакция жесткой заделки состоит из силы реакции $\vec{R}_A$ и пары сил с моментом $M_A$. Силу реакции жесткой заделки $\vec{R}_A$ изображают ее составляющими $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$, направленными вдоль координатных

осей (см. рис. 1.20). Величина силы реакции $\vec{R}_A$ определяется по формуле: $R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2}$.

При вычислении моментов сил часто применяют **теорему Вариньона** о том, что момент равнодействующей системы сил относительно любого центра равен сумме моментов всех сил этой системы относительно того же центра. На рис. 1.21 показана схема применения теоремы Вариньона. Силу $\vec{F}$ раскладываем на составляющие $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, направленные вдоль координатных осей так, что имеет место равенство $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$. Численно составляющие $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ равны проекциям силы $\vec{F}$ на координатные оси: $F_1 = F\cos\alpha$, $F_2 = F\sin\alpha$. Для каждой из составляющих находим плечи $h_1$ и $h_2$ относительно центра *O*. Тогда (с учётом знаков) момент силы $\vec{F}$ относительно центра *O*: $M_O(\vec{F}) = M_O(\vec{F}_1) + M_O(\vec{F}_2) = F_1 h_1 + F_2 h_2$.

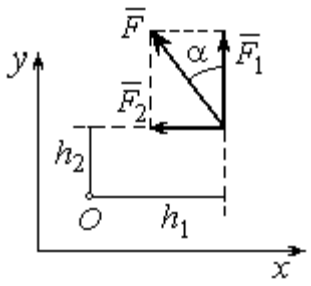


Рис.1.21. Применение теоремы Вариньона

**Распределённая нагрузка.** Силы, приложенные непрерывно вдоль некоторой поверхности, называются **распределенными**. Распределённая нагрузка характеризуется интенсивностью *q*. Интенсивность нагрузки, равномерно распределённой вдоль прямой, измеряется в Н/м. На рис. 1.22 приведена плоская система сил, равномерно распределённых вдоль прямой. Равнодействующая $\vec{Q}$ сил, равномерно распределённых вдоль прямой, приложена в середине отрезка действия распределённой нагрузки и по модулю равна произведению интенсивности нагрузки на длину её действия: $Q = qa$, где $a$ – длина отрезка действия распределённой нагрузки.

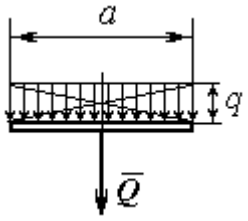


Рис. 1.22. Нагрузка, равномерно распределённая по прямой

**Основная форма условий равновесия плоской системы сил.** Для равновесия плоской системы сил необходимо и достаточно, чтобы суммы

проекций всех сил на каждую из двух осей прямоугольной системы координат, расположенной в плоскости действия сил, были равны нулю и сумма моментов сил относительно любого центра, находящегося в плоскости действия сил, была равна нулю:

$$\sum F_{kx} = 0,\ \sum F_{ky} = 0,\ \sum M_A(\vec{F}_k) = 0,$$

где $F_{kx}, F_{ky}$ – проекции всех сил на координатные оси; $M_A(\vec{F}_k)$ – моменты всех сил относительно произвольно выбранного центра $A$.

## Примеры решения задач на равновесие произвольной плоской системы сил

**Задача 7.** Однородная балка *AB* весом *P* = 100 кН прикреплена к стене шарниром *A* (рис.1.23). Балка удерживается под углом 60° к вертикали при помощи троса, прикреплённого к балке в точке *B*, перекинутого через блок *D* и несущего груз *Q*. Участок троса *DB* образует с вертикалью угол 30°. В точке *C* к балке подвешен груз *G* весом *G* = 200 кН. Определить вес груза *Q*, удерживающий балку в равновесии, и реакцию шарнира *A*, пренебрегая трением в блоке, если расстояние $BC = 0{,}25BA$.

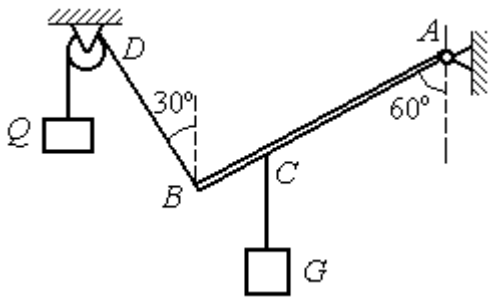


Рис. 1.23. Равновесие балки

*Решение*

Объектом равновесия является балка *AB*. На балку действуют сила тяжести $\vec{P}$, приложенная в середине отрезка *AB*, реакция шарнира *A*, представленная в виде двух составляющих $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$, направленных вдоль координатных осей, реакция $\vec{T}_1$ нити, удерживающей груз *Q*, и реакция $\vec{T}_2$ нити, удерживающей груз *G*. Направления сил и реакций связей показаны на рис. 1.24.

Силы – $\vec{T}_1$, $\vec{T}_2$, $\vec{P}$, $\vec{X}_A$, $\vec{Y}_A$, действующие на балку, составляют произвольную плоскую систему. Условия равновесия произвольной плоской системы сил:

$$\sum F_{kx} = 0;\ \sum F_{ky} = 0;\ \sum M_A(\vec{F}_k) = 0.$$

Выберем систему координат *xAy,* как показано на рис. 1.24.

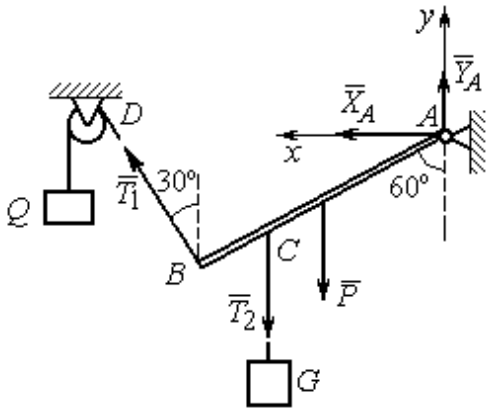



Рис. 1.24. Внешние силы и реакции связей при равновесии балки

Первые два уравнения равновесия имеют вид

$$\sum F_{kx} = X_A + T_1\cos 60^\circ = 0;$$

$$\sum F_{ky} = Y_A + T_1\cos 30^\circ - T_2 - P = 0.$$

Выберем центром точку *A* и будем вычислять моменты сил относительно этого центра. Обозначим (для удобства записи) длину $AB = \ell$. Условие равновесия балки в форме равенства нулю суммы моментов сил относительно центра *A* имеет вид

$$\sum M_A(\vec{F}_k) = -T_1\ell + T_2\frac{3}{4}\ell\cos 30^\circ + P\frac{1}{2}\ell\cos 30^\circ = 0.$$

Подставим данные из условия задачи, с учётом, что реакция нити, удерживающей груз *Q,* по модулю равна весу этого груза: $T_1 = Q$, а реакция нити, удерживающей груз *G*, численно равна весу груза *G*: $T_2 = G$.

Получим систему уравнений:

$$X_A + Q\cdot 0{,}5 = 0,\ Y_A + Q\cdot 0{,}866 - 300 = 0,\ -Q + 173{,}2 = 0.$$

Решая систему, найдём $Q$ = 173,2 кН, $X_A$ = – 86,6 кН, $Y_A$ = 150,01 кН.

**Задача 8.** Рама *ACE* (рис. 1.25, *а*) в точке *A* закреплена на цилиндрической шарнирной опоре, а в точке *B* поддерживается вертикальным невесомым стержнем *BK*. На раму действуют: пара сил с моментом *M* = 8 кН·м, сила $\vec{F}$, равная по модулю *F* = 10 кН, приложенная в точке *D* под углом 60° к раме, и равномерно распределенная на отрезке *AB* нагрузка интенсивностью *q* =2 кН/м.

В точке *E* под прямым углом к отрезку *CE* рамы прикреплен трос, переброшенный через блок и несущий груз $P$ = 20 кН.

Пренебрегая весом балки, определить реакцию шарнира *A* и реакцию стержневой опоры *BK*, если $a$ = 2 м.

*Решение*

Рассмотрим равновесие рамы *ACE*. Выбираем систему координат *xAy*, например, как показано на рис. 1.25, *b*.

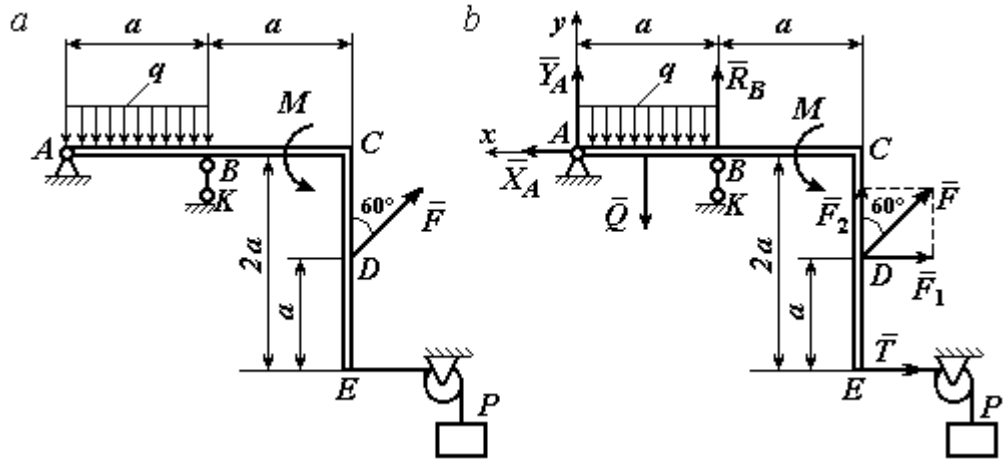



Рис. 1.25. Равновесие рамы:
*a* – конструкция и нагрузка рамы; *b* – внешние силы и реакции связей при равновесии рамы

Заменяем действие связей их реакциями. Изображаем реакцию $\vec{R}_A$ шарнира *A* двумя ее составляющими $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$, направленными, соответственно, вдоль горизонтальной оси *Ax* и вертикальной *Ay*. Реакция $\vec{R}_B$ невесомой стержневой опоры *BK* приложена в точке *B* и направлена вдоль стержня *BK*. Действие груза *P* на раму изображается реакцией троса $\vec{T}$, модуль которой равен весу груза $T = P$. Заменяем распределенную нагрузку её равнодействующей $\vec{Q}$. Сила $\vec{Q}$ приложена в середине отрезка *AB* и численно равна: $Q = qa$ = 2·2 = 4 кН. На рис. 1.25, *b* показано направление внешних сил и реакций при равновесии рамы. Направление реакции стержневой опоры *BK* выбрано в предположении, что стержень сжимается.

При равновесии рамы *ACE* действующие на неё силы составляют уравновешенную произвольную плоскую систему сил ($\vec{Q}, \vec{F}, \vec{X}_A, \vec{Y}_A, \vec{R}_B, \vec{T}, M$) ~ 0. Условия равновесия имеют вид $\sum F_{kx} = 0$; $\sum F_{ky} = 0$; $\sum M_A(\vec{F}_k) = 0$. Вычисляя проекции сил на оси *Ax*, *Ay*, первые два уравнения из условий равновесия получим в виде:

$$\sum F_{kx} = X_A - F\cos 30^\circ - T = 0; \quad \sum F_{ky} = Y_A - Q + R_B + F\cos 60^\circ = 0. \qquad (1.1)$$

При составлении третьего уравнения моменты сил будем вычислять относительно центра *A*. В этом случае линии действия сил $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$, составляющих реакцию шарнира *A*, проходят через центр *A*, плечи сил равны нулю, и, следовательно, моменты этих сил относительно данного центра равны нулю: $M_A(\vec{X}_A) = 0$, $M_A(\vec{Y}_A) = 0$.

При определении момента силы $\vec{F}$ удобнее воспользоваться теоремой Вариньона. С этой целью представим вектор силы $\vec{F}$ как равнодействующую двух сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, параллельных осям *Ax* и *Ay*: $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ (см. рис. 1.25, *b*). Величины сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ определяются как проекции силы *F* на оси координат: $F_1 = F\cos 30^\circ$, $F_2 = F\cos 60^\circ$. По теореме Вариньона момент силы $\vec{F}$ относительно центра *A* равен сумме моментов сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ относительно того же центра *A*: $M_A(\vec{F}) = M_A(\vec{F}_1) + M_A(\vec{F}_2) = F_1 \cdot a + F_2 \cdot 2a$.

В результате уравнение равновесия в форме моментов имеет вид

$$\sum M_A(\vec{F}_k) = -Q \cdot 0{,}5a + R_B a + M + F\cos 60^\circ \cdot 2a + F\cos 30^\circ \cdot a + T2a = 0. \quad (1.2)$$

Подставляя в уравнения равновесия (1.1), (1.2) численные значения из условий задачи, получим систему уравнений относительно неизвестных $X_A, Y_A, R_B$. Решая эту систему, найдем: $X_A$ = 28,66 кН; $Y_A$ = 59,66 кН; $R_B$ = – 60,66 кН.

Отрицательное значение величины $R_B$ означает, что фактическое направление реакции $\vec{R}_B$ стержневой опоры $BK$ противоположно направлению, показанному на рис. 1.25, *b*, т. е. стержень $BK$ растягивается. Реакция шарнирной опоры *A* – сила $\vec{R}_A$ – находится как геометрическая (векторная) сумма сил $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$. Величина реакции $R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2} = \sqrt{28{,}66^2 + 59{,}66^2} = 66{,}18$ кН.

**Задача 9.** Прямоугольная рама *ABCED* (рис. 1.26) в точке *A* закреплена жёсткой заделкой. В точке *E* к раме прикреплена нить, составляющая угол 60º к горизонту. Другой конец нити, переброшенный через невесомый блок, несёт груз весом *P* = 15 кН. На раму действуют: пара сил с моментом *M* = 12 кН·м, сила $\vec{F}$, равная по модулю *F* = 10 кН, приложенная в точке *C* под углом 30° к горизонтальному участку рамы *BE*, и равномерно распределенная на отрезке *BC* нагрузка интенсивностью *q* = 2 кН/м. В точке *D* под углом 60° к горизонту на раму действует сила $\vec{G}$, численно равная 20 кН.

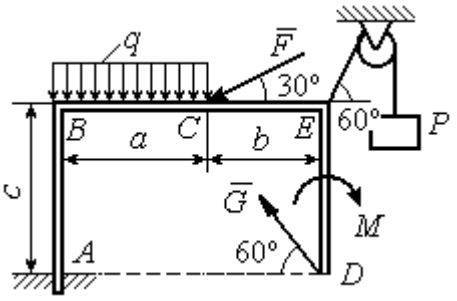


Рис. 1.26. Конструкция рамы

Пренебрегая весом рамы, определить реакцию жесткой заделки в точке *A*, если размеры рамы: *a* = 2 м, *b* = 1 м, *c* = 5 м.

*Решение*

Объектом равновесия является рама *ABCED*. Связями в данной конструкции являются жесткая заделка рамы в точке *A* и нить, натянутая грузом *P*. Заменяем действие связей их реакциями. Изображаем реакцию жесткой заделки в точке *A* в виде силы, которую представим двумя ее составляющими – $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$, и парой сил с моментом $M_A$ (рис. 1.27). Реакция нити $\vec{T}$, приложенная

к раме в точке *E*, направлена вдоль нити и численно равна весу груза $T = P$. Заменяем распределенную нагрузку её равнодействующей $\vec{Q}$. Сила $\vec{Q}$ риложена в середине отрезка *AB* и численно авна: $Q = qa = 4$ кН.

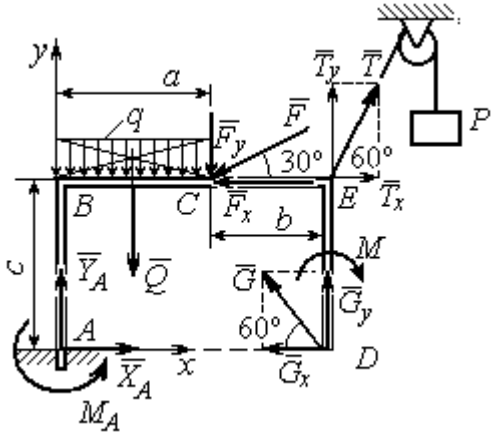



Рис. 1.27. Внешние силы и реакции связей при равновесии рамы

Действующие на раму силы составляют равновешенную произвольную плоскую истему сил: $(\vec{Q}, \vec{F}, \vec{X}_A, \vec{Y}_A, \vec{G}, \vec{T}, M) \sim 0$. Условия равновесия для такой системы сил: $\sum F_{kx} = 0$; $\sum F_{ky} = 0$; $\sum M_A(\vec{F}_k) = 0$.

Выбираем систему координат *xAy*, например, как показано на рис. 1.27, и составляем уравнения равновесия:

$$\sum F_{kx} = X_A - F\cos 30^\circ + T\cos 60^\circ - G\cos 60^\circ = 0; \qquad (3)$$

$$\sum F_{ky} = Y_A - Q - F\cos 60^\circ + T\cos 30^\circ + G\cos 30^\circ = 0. \qquad (4)$$

Моменты сил будем вычислять относительно центра *A*. В этом случае моменты сил $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$ равны нулю: $M_A(\vec{X}_A) = 0$; $M_A(\vec{Y}_A) = 0$.

При определении момента силы $\vec{F}$ удобно воспользоваться теоремой Вариньона. С этой целью представим вектор силы $\vec{F}$ как равнодействующую двух сил $\vec{F}_x$ и $\vec{F}_y$, параллельных осям *Ax* и *Ay*: $\vec{F} = \vec{F}_x + \vec{F}_y$ (см. рис. 1.27). Величины сил $\vec{F}_x$ и $\vec{F}_y$ определяются как проекции силы $\vec{F}$ на оси координат: $F_x = F\cos 30^\circ$, $F_y = F\cos 60^\circ$. Плечо вектора силы $\vec{F}_x$ относительно центра *A* равно *c* (как длина перпендикуляра, проведённого из центра *A* на линию действия силы $\vec{F}_x$), плечом силы $\vec{F}_y$ является расстояние *a*. По теореме Вариньона момент силы $\vec{F}$ относительно центра $A$ равен алгебраической сумме моментов сил $\vec{F}_x$ и $\vec{F}_y$ относительно того же центра:

$$M_A(\vec{F}) = M_A(\vec{F}_x) + M_A(\vec{F}_y) = F_x \cdot c - F_y \cdot a = F\cos 30^\circ \cdot c - F\cos 60^\circ \cdot a.$$

Аналогично вычисляем моменты сил $\vec{G}$ и $\vec{T}$: $M_A(\vec{G}) = G\cos 30^\circ \cdot (a+b)$; $M_A(\vec{T}) = -T\cos 60^\circ \cdot c + T\cos 30^\circ \cdot (a+b)$. В результате уравнение моментов имеет вид:

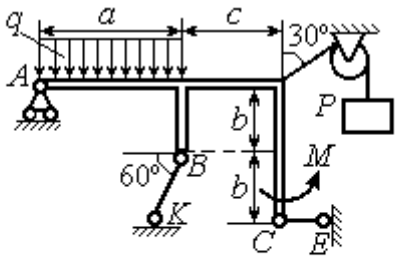
$$\sum M_A(\vec{F}_k) = F\cos 30^\circ \cdot c - F\cos 60^\circ \cdot a - T\cos 60^\circ \cdot c + T\cos 30^\circ \cdot (a+b) +$$

$$+ G\cos 30^\circ \cdot (a+b) - Q\frac{a}{2} - M + M_A = 0. \qquad (1.5)$$

Подставляя в уравнения равновесия (1.3) – (1.5) численные значения из условий задачи, получим систему уравнений относительно неизвестных $X_A, Y_A, M_A$, откуда найдём значения реакций: $X_A = 11{,}16$ кН; $Y_A = -21{,}31$ кН; $M_A = -70{,}73$ Н·м. Знаки показывают, что составляющая $\vec{Y}_A$ силы реакции жёсткой заделки и момент реакции $M_A$ направлены в противоположную сторону. Величина силы реакции жесткой заделки $R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2} = 24{,}05$ кН.

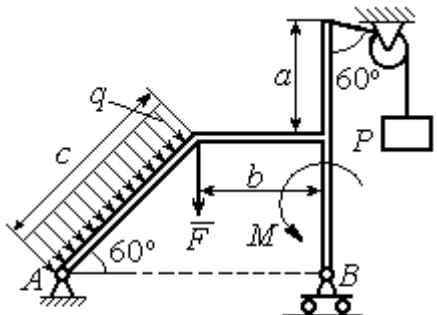
## Упражнения

Упражнение 1.1




$a = 3$ м, $b = 1$ м, $c = 2$ м,
$P = 15$ кН, $M = 3$ кНм, $q = 5$ кН/м.
Найти реакцию стержней $BK$, $CE$
и реакцию шарнира $A$

Упражнение 1.2

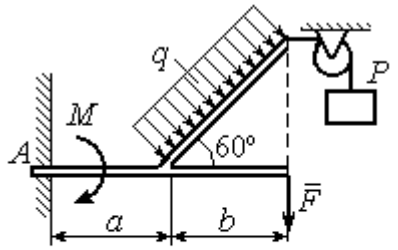



$a = 2$ м, $b = 1$ м, $c = 3$ м,
$M = 3$ кНм, $q = 3$ кН/м,
$P = 2$ кН, $F = 4$ кН.
Найти реакцию шарниров $A$ и $B$

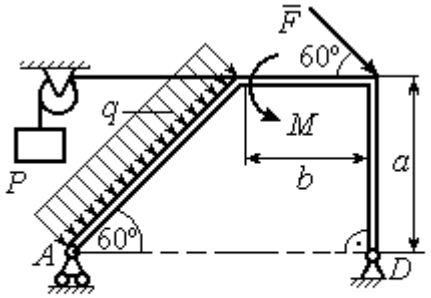
Рис. 1.28. Задания для самостоятельного решения. Упражнения 1.1, 1.2

Упражнение 1.3

Упражнение 1.4




$a = 1$ м, $b = 2$ м, $F = 2$ кН,
$P = 3$кН, $M = 3$ кН·м,
$q = 2$ кН/м
Найти реакцию жесткой заделки




$a = 3$ м, $b = 1$ м, $P = 2$ кН, $F = 3$ кН,
$M = 3$ кН·м, $q = 2$ кН/м.
Найти реакцию шарниров $A$ и $D$

Рис. 1.29. Задания для самостоятельного решения. Упражнения 1.3, 1.4

## 1.4. Равновесие систем тел

Связи, соединяющие части конструкции, называются **внутренними** в отличие от **внешних** связей, скрепляющих конструкцию с внешними телами, не входящими в данную конструкцию.

Одним из способов решения задач на равновесие сил, действующих на сочленённую конструкцию, является **разбиение конструкции на отдельные тела** и составление уравнений равновесия для каждого из тел, входящих в конструкцию. В уравнения равновесия будут входить только силы, непосредственно приложенные к телу, равновесие которого рассматривается. **При этом реакции внутренних связей, приложенные к разным телам, будут попарно равны по модулю и противоположны по направлению.**

### Примеры решения задач на равновесие систем тел

**Задача 10.** Диск весом $Q$ = 100 кН опирается на вертикальную стенку и на наклонную балку $AB$. На диск действует сила $\vec{F}$, равная по величине 50 кН (рис. 1.30). Линия действия силы $\vec{F}$ проходит через центр диска под углом 30º к его вертикальному диаметру.

Однородная балка $AB$ весом $G$ = 80 кН закреплена в точке $A$ шарнирно и удерживается под углом 60º к стене при помощи вертикального троса, один конец которого закреплён на балке в точке $B$, а другой – переброшен через блок и несёт груз весом $P$. Определить давление диска на стенку и на балку, реакцию шарнира $A$ и вес груза $P$, удерживающий конструкцию в равновесии, если длина балки $AB$ $\ell$ = 6 м, радиус диска $r$ = 1 м.

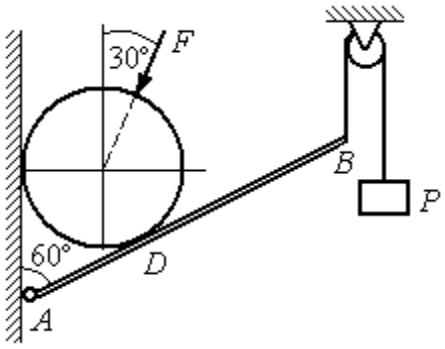



Рис. 1.30. Равновесие составной конструкции

*Решение*

Объект равновесия включает балку и диск и представляет собой составную конструкцию. Опора диска на балку в точке $D$ является внутренней связью конструкции. Рассмотрим равновесие диска и балки отдельно.

Освобождаем диск от связей. На диск действует сила веса $\vec{Q}$, сила $\vec{F}$ и реакции $\vec{N}$ и $\vec{R}$ опор диска на стену в точке $K$ и на балку в точке $D$ (рис. 1.31). Силы, приложенные к диску, составляют плоскую систему сходящихся сил. Выберем систему координат, как показано на рис. 1.31, и составим уравнения равновесия:

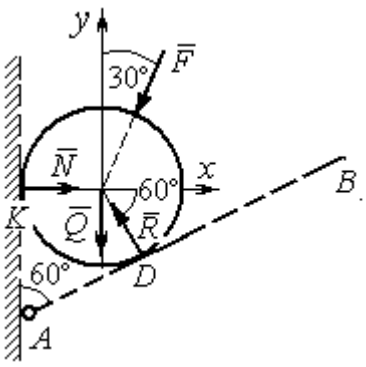



Рис. 1.31. Внешние силы и реакции связей при равновесии диска

$$\sum F_{kx} = -F\cos 60^\circ - R\cos 60^\circ + N = 0; \quad (1.6)$$

$$\sum F_{ky} = -F\cos 30^\circ + R\cos 30^\circ - Q = 0. \quad (1.7)$$

Рассмотрим равновесие балки $AB$ (рис. 1.32).

На балку действуют сила тяжести $\vec{G}$, реакция шарнира $A$, (на рис. 1.32 показано её разложение на составляющие $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$), реакция нити $\vec{T}$, численно равная весу груза $P$, и сила $\vec{R}'$ давления диска на балку. Сила давления $\vec{R}'$ противоположна реакции $\vec{R}$ опоры диска на балку и численно равна ей.

Система сил ( $\vec{X}_A, \vec{Y}_A, \vec{G}, \vec{T}, \vec{R}'$), действующих на балку, является произвольной плоской. Условия равновесия такой системы сил:

$$\sum F_{kx} = 0;\ \sum F_{ky} = 0;\ \sum M_A(\vec{F}_k) = 0.$$

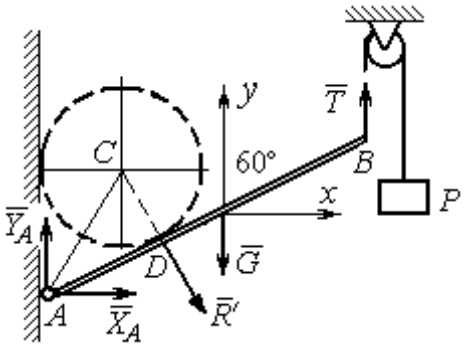



Рис. 1.32. Силы, действующие на балку, при равновесии

Выберем оси, как показано на рис. 1.32, и составим уравнения равновесия, полагая точку *A* центром, относительно которого производятся вычисления моментов сил:

$$\sum F_{kx} = X_A + R'\cos 60^\circ = 0, \tag{1.8}$$

$$\sum F_{ky} = Y_A - R'\cos 30^\circ - G + T = 0, \tag{1.9}$$

$$\sum M_A(\vec{F}_k) = -R' \cdot AD - G \cdot \frac{\ell}{2}\cos 30^\circ + T\ell\cos 30^\circ = 0. \tag{1.10}$$

Добавив к уравнениям (1.8) – (1.10) равновесия балки *AB* уравнения (1.6), (1.7) равновесия диска с учётом, что $R' = R$, получим систему пяти уравнений с пятью неизвестными. Подставляя данные из условия задачи и решая совместную систему, найдём: $R$ = 165,47 кН; $N$ = 107,74 кН; $P$ = 95,26 кН; $X_A$ = – 82,73 кН; $Y_A$ = 128,03 кН.

Сила давления диска на стену равна модулю реакции опоры $\vec{N}$ и направлена в противоположную сторону, сила давления диска на балку равна $\vec{R}'$.

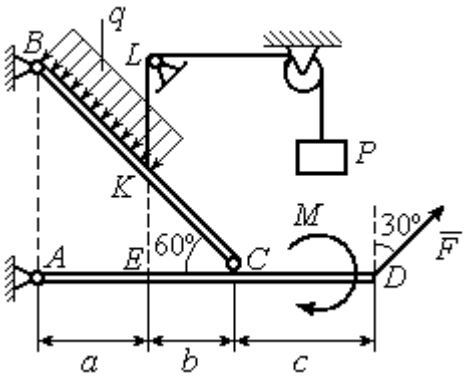



Рис.1.33. Равновесие кронштейна как сочленённой конструкции

**Задача 11.** Кронштейн состоит из горизонтальной балки *AD*, прикрепленной к вертикальной стене в точке *A*, и откоса *BC*, соединённого с балкой *AD* в точке *C* под углом 60º и прикреплённого к вертикальной стене в точке *B* (рис. 1.33). Все соединения шарнирные. На конструкцию действуют сила $\vec{F}$, приложенная в точке *D* под углом 30º к вертикали и равная по модулю $F$ =10 кН, пара сил с моментом $M$ = 8

кН·м и равномерно распределенная на отрезке *BK* нагрузка интенсивностью $q$ = 3 кН/м. В точке *K* к балке *BC* прикреплена нить, другой конец которой, переброшенный через невесомые блоки, несёт груз весом $P$ = 5 кН (см. рис. 1.33).

Определить реакции шарниров *A*, *B* и *C*, если $a$ = 2 м, $b$ = 1 м, $c$ = 3 м, а на отрезке *KL* нить натянута вертикально.

*Решение*

Рассмотрим равновесие каждой из составных частей конструкции – балки *BC* и балки *AD*. Освобождаем балки от связей и заменяем их реакциями (рис. 1.34).

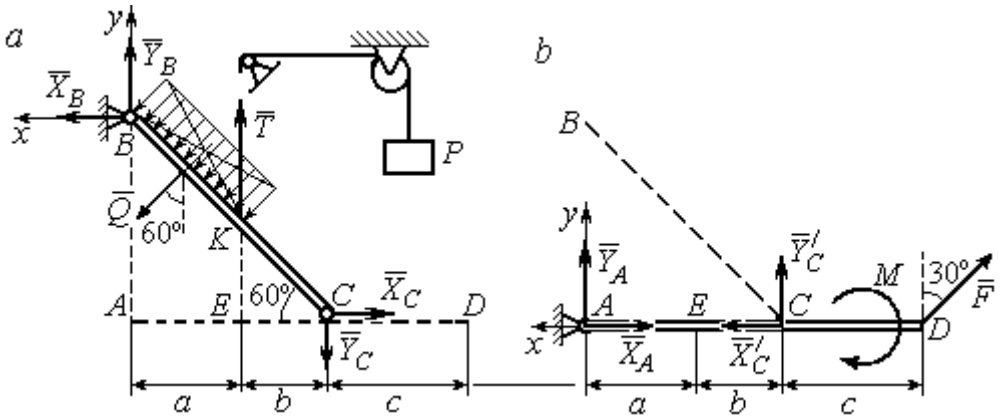



Рис. 1.34. Равновесие элементов конструкции кронштейна:
*a* - силы, действующие на балку *BC*; *b* - силы, действующие на балку *AD*

На рис. 1.34, *a* показаны реакции внешних и внутренних связей балки *BC* : реакция $\vec{R}_B$ шарнира *B*, реакция нити $\vec{T}$, равная по величине весу груза, $T = P$ и реакция $\vec{R}_C$ внутреннего шарнира *C*. Реакции шарниров *B* и *C* представлены в виде разложения на составляющие $\vec{X}_B$, $\vec{Y}_B$ и $\vec{X}_C$, $\vec{Y}_C$. Заменяем равномерную нагрузку равнодействующей силой $\vec{Q}$, приложенной в середине отрезка *BK* (см. рис. 1.34, *a*) и численно равной $Q = q \cdot BK = q \cdot \dfrac{a}{\cos 60^\circ} = q \cdot 2a$.

Система сил ($\vec{Q}$, $\vec{X}_B, \vec{Y}_B, \vec{X}_C, \vec{Y}_C, \vec{T}$), действующая на балку *BC*, является произвольной плоской уравновешенной системой сил. Выберем оси координат

*xBy*, как показано на рис. 1.34, *а*, и составим уравнения равновесия. При этом моменты сил будем вычислять относительно центра *C*:

$$\sum F_{kx} = X_B + Q\cos 30^\circ - X_C = 0; \tag{1.11}$$

$$\sum F_{ky} = Y_B - Q\cos 60^\circ + T - Y_C = 0; \tag{1.12}$$

$$\sum M_C(\vec{F}_k) = X_B \cdot AB - Y_B(a+b) - Tb + Q\left(CK + \frac{1}{2}BK\right) = 0, \tag{1.13}$$

где $AB = (a+b)\mathrm{tg}60^\circ$; $CK = 2b$; $\frac{1}{2}BK = a$.

Рассмотрим равновесие балки *AD* (рис. 1.34, *b*).

На балку действует сила $\vec{F}$, реакция $\vec{R}_A$ шарнира *A* и реакция $\vec{R}'_C$ внутреннего шарнира *C*. Реакция $\vec{R}'_C$ равна по величине и противоположна по направлению реакции $\vec{R}_C$. На рис. 1.34, *b* реакция $\vec{R}_A$ представлена составляющими $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$, реакция $\vec{R}'_C$ – составляющими $\vec{X}'_C$ и $\vec{Y}'_C$. При этом следует отметить: $\vec{X}'_C = -\vec{X}_C$; $\vec{Y}'_C = -\vec{Y}_C$.

Выберем оси координат *xAy* как показано на рис. 1.34, *b*, и составим уравнения равновесия балки *AD*, вычисляя моменты сил относительно центра *C*:

$$\sum F_{kx} = -X_A + X'_C - F\cos 60^\circ = 0; \tag{1.14}$$

$$\sum F_{ky} = Y_A + Y'_C + F\cos 30^\circ = 0; \tag{1.15}$$

$$\sum M_C(\vec{F}_k) = -Y_A(a+b) + F\cos 30^\circ \cdot c - M = 0. \tag{1.16}$$

Решая совместно систему уравнений (1.11) – (1.16) с учётом исходных данных задачи и равенства модулей сил $X_C = X'_C$ и $Y_C = Y'_C$, находим:

$$X_A = 5{,}99 \text{ кН},\ Y_A = 5{,}99 \text{ кН},\ X_C = 10{,}99 \text{ кН},\ Y_C = -14{,}65 \text{ кН};$$

$$X_B = 0{,}6 \text{ кН},\ Y_B = -13{,}65 \text{ кН},$$

$$R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2} = 8{,}47 \text{ кН},\ R_C = \sqrt{X_C^2 + Y_C^2} = 18{,}31 \text{ кН},$$

$$R_B = \sqrt{X_B^2 + Y_B^2} = 13{,}65 \text{ кН}.$$

**Задача 12.** Вертикальная балка *AB* с горизонтальной перекладиной *LC* закреплена в точке *A* с помощью жесткой заделки (рис. 1.35). Наклонная балка *EC* с углом наклона к горизонту 60° точке *C* шарнирно прикреплена к горизонтальной перекладине *LC* балки *AB*, а в точке *E* опирается на каток установленный на горизонтальной поверхности. На конструкцию действуют равномерно распределенная на отрезках *BL* и *DE* нагрузка с одинаковой интенсивностью $q = 2$ кН/м, сила $\vec{F}$, приложенная в точке *D* перпендикулярно балке *EC* и равная по величине $F = 10$ кН, и пара сил с моментом $M = 5$ кН·м. Определить реакцию жесткой заделки *A* и реакции шарниров *C* и *E*, если параметр *a*, определяющий размеры конструкции, равен $a = 2$ м.

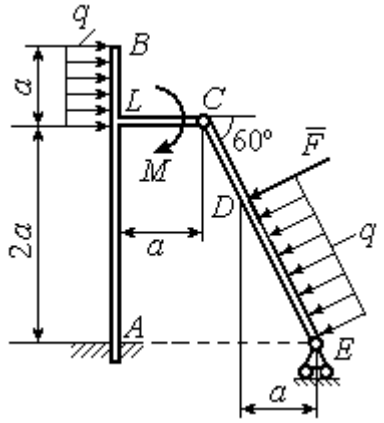



Рис. 1.35. Равновесие сочленённой конструкции

*Решение*

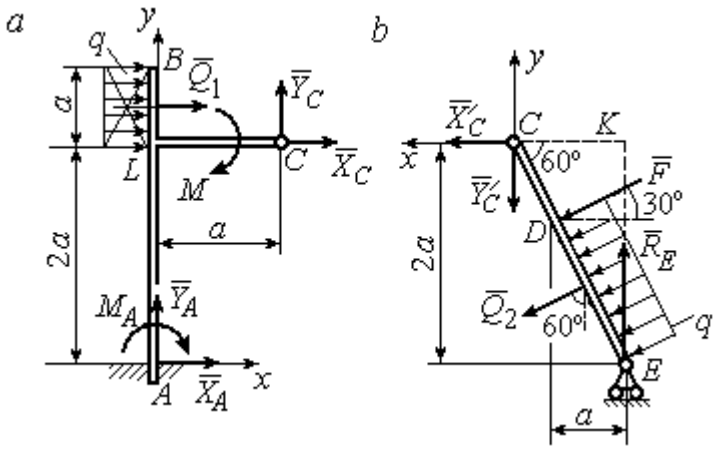



Рис. 1.36. Равновесие элементов конструкции:
*a* - силы и реакции связей, действующие на балку *AB*;
*b* - силы и реакции связей, действующие на балку *CE*

Разделим систему на две части по шарниру *C* и рассмотрим равновесие балок *ABC* и *EC* отдельно.

Рассмотрим балку *ABC* (рис. 1.36, *a*). Заменим распределенную нагрузку эквивалентной силой $\vec{Q}_1$, численно равной $Q_1 = qa = 4$ кН. На балку действует сила $\vec{Q}_1$, пара сил с моментом *M* и реакции связей – жёсткой заделки в точке *A* и шарнира *C*.

На рис. 1.36, *a* изображена реакция жесткой заделки в точке *A* в виде силы, разложенной на составляющие $\vec{X}_A$, $\vec{Y}_A$, и пары с моментом $M_A$. Реакция $\vec{R}_C$ шарнира *C* показана разложением на составляющие $\vec{X}_C, \vec{Y}_C$. Силы образуют произвольную плоскую систему.

Введём систему координат, как показано на рис. 1.36, *a,* и составим уравнения равновесия балки, выбрав центром вычисления моментов сил точку *A*.

Имеем систему

$$\sum F_{kx} = X_A + Q_1 + X_C = 0; \quad \sum F_{ky} = Y_A + Y_C = 0; \tag{1.17}$$

$$\sum M_A(\vec{F}_k) = -M_A - Q_1 \cdot \left(2a + \frac{a}{2}\right) - M + Y_C a - X_C 2a = 0. \tag{1.18}$$

Рассмотрим теперь равновесие балки *EC* (рис. 1.36, *b*). Заменим распределённую нагрузку эквивалентной силой $\vec{Q}_2$, приложенной в середине отрезка *ED* и равной $Q_2 = \dfrac{qa}{\cos 60^\circ} = q \cdot 2a = 8$ кН. На балку действуют силы $\vec{Q}_2$, $\vec{F}$, реакция $\vec{R}_E$ подвижной опоры – катка *E* и реакция $\vec{R}'_C$ шарнира *C*. На рис. 1.36, *b* реакция $\vec{R}'_C$ показана в виде разложения на составляющие $\vec{X}'_C$, $\vec{Y}'_C$. При этом силы $\vec{X}'_C$, $\vec{Y}'_C$ направлены противоположно силам $\vec{X}_C$, $\vec{Y}_C$ и равны им по модулю: $X_C = X'_C$; $Y_C = Y'_C$ (см. рис. 1.36, *a, b*).

Действующие на балку *EC* силы образуют уравновешенную произвольную плоскую систему сил. Выберем систему координат, как показано на рис. 1.36, *b*, и составим уравнения равновесия, вычисляя моменты сил относительно центра *C*. Получим:

$$\sum F_{kx} = Q_2 \sin 60^\circ + F\cos 30^\circ + \vec{X}'_C = 0, \tag{1.19}$$

$$\sum F_{ky} = R_E - Q_2 \cos 60^\circ - F\sin 30^\circ - Y'_C = 0, \tag{1.20}$$

$$\sum M_C(\vec{F}_k) = -F \cdot \left(\frac{2a}{\cos 30^\circ} - 2a\right) - Q_2 \cdot \left(\frac{2a}{\cos 30^\circ} - a\right) + R_E \cdot 2a\,\mathrm{tg}\,30^\circ = 0. \tag{1.21}$$

Подставим в совместную систему (1.17) – (1.21) исходные данные задачи и, воспользовавшись тем, что модули сил $\vec{X}_C$, $\vec{Y}_C$ и $\vec{X}'_C$, $\vec{Y}'_C$ равны, найдём:

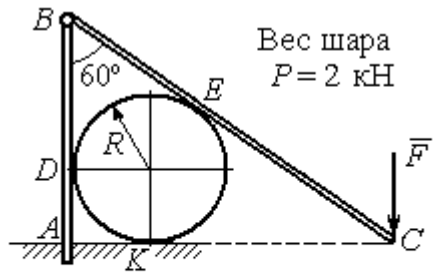
$$X_A = 11{,}59 \text{ кН}; \quad Y_A = -2{,}76 \text{ кН}; \quad M_A = 42{,}87 \text{ кН·м};$$

$$X_C = -15{,}59 \text{ кН}; \quad Y_C = 2{,}76 \text{ кН}; \quad R_E = 11{,}76 \text{ кН}.$$

Полные величины сил реакции жесткой заделки и взаимного давления в шарнире $C$: $R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2} = 11{,}91$ кН; $R_C = \sqrt{X_C^2 + Y_C^2} = 15{,}83$ кН.

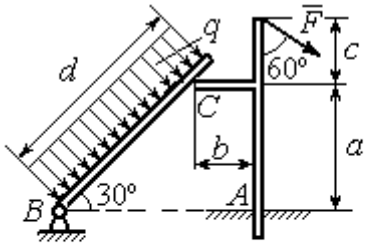
## Упражнения

Упражнение 1.5



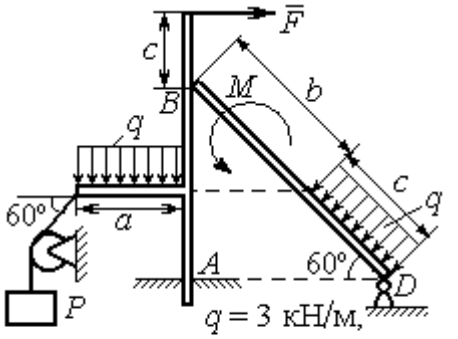

$R = 1$ м, $F = 8$ кН.
Найти реакцию жесткой заделки в точке $A$, реакцию шарнира $B$, реакцию опоры шара в точках $D, K, E$

Упражнение 1.6



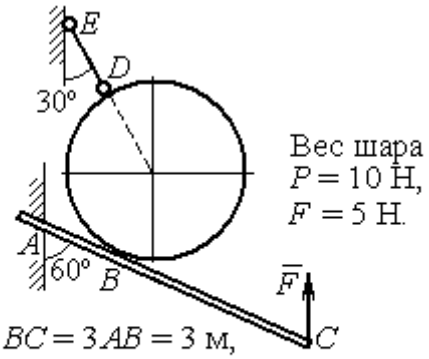

$a = 2$ м, $b = 1$ м, $c = 1$ м, $d = 5$ м,
$q = 3$ кН/м, $F = 4$ кН.
Найти реакцию жесткой заделки в точке $A$, реакцию шарнира $B$ и реакцию опоры в точке $C$

Упражнение 1.7




$F = 4$ кН, $P = 3$ кН, $M = 2$ кН·м,
$a = 2$м, $b = 3$м, $c = 1$м
Найти реакцию заделки $A$, шарнира $D$ и реакцию опоры $B$

Упражнение 1.8




Найти реакцию жесткой заделки $A$, реакцию стержня $DE$ и реакцию опоры в точке $B$

Рис. 1.37. Задания для самостоятельного решения. Упражнения 1.5 – 1.8

## 1.5. Произвольная пространственная система сил

**Моментом силы относительно оси** называют момент вектора проекции этой силы на плоскость, перпендикулярную оси, относительно точки пересечения оси с плоскостью. На рис. 1.38 показано вычисление момента силы $\vec{F}$ относительно оси *z*:

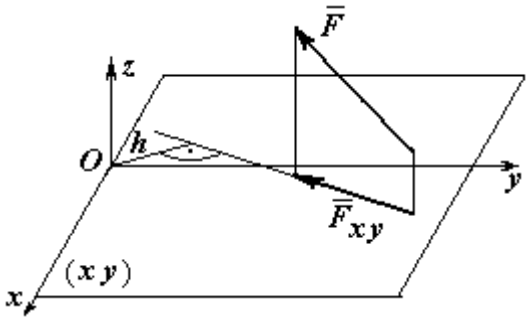


Рис. 1.38. Момент силы относительно оси

$$M_z(\vec{F}) = M_O(\vec{F}_{xy}) = F_{xy}h,$$

где $O$ – точка пересечения оси $z$ с плоскостью $xy$, перпендикулярной оси $z$; $\vec{F}_{xy}$ – вектор проекции силы $\vec{F}$ на плоскость $xy$; $h$ – плечо силы $\vec{F}_{xy}$ относительно центра $O$. Момент силы относительно оси считается положительным, если при взгляде с положительного направления оси он создаёт вращение против хода часовой стрелки.

**Равновесие пространственной системы сил.** Для равновесия пространственной системы сил необходимо и достаточно, чтобы суммы проекций всех сил на оси прямоугольной системы координат $x$, $y$, $z$ были равны нулю и суммы моментов всех сил относительно тех же осей также были равны нулю:

$$\sum F_{kx} = 0;\ \sum F_{ky} = 0;\ \sum F_{kz} = 0;$$

$$\sum M_x(\vec{F}_k) = 0;\quad \sum M_y(\vec{F}_k) = 0;\quad \sum M_z(\vec{F}_k) = 0,$$

где $F_{kx}, F_{ky}, F_{kz}$ – проекции всех сил на координатные оси; $M_x(\vec{F}_k)$, $M_y(\vec{F}_k)$, $M_z(\vec{F}_k)$ – моменты всех сил относительно выбранных осей, $k$ = 1, 2, ...

### Примеры решения задач на равновесие пространственных систем сил

**Задача 13.** Горизонтальный вал (рис. 1.39) закреплен в подпятнике *C* и подшипнике *K*. Вал имеет шкив *B* радиуса *R* и шкив *D* радиуса *r*.

Оба шкива перпендикулярны оси вала. Рукоять *AE* параллельна оси *Cx*.

Нить, удерживающая груз *Q*, сходит со шкива *D* по касательной в точке *L* параллельно плоскости *zCx*, так что радиус шкива *D*, проведённый в точку схода нити, составляет с вертикальным диаметром угол 30º.

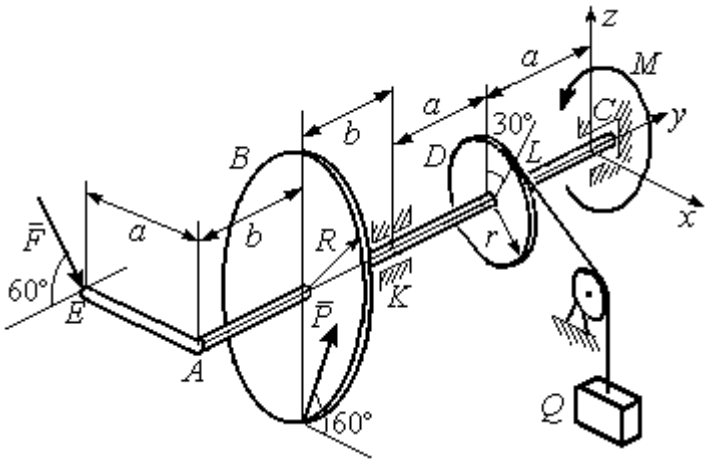


Рис. 1 39. Равновесие вала

На вал действуют силы: $\vec{F}$, $\vec{P}$ и пара сил с моментом *M*. Сила $\vec{F}$ находится в плоскости, параллельной *zCy*, и составляет угол 60° с направлением оси *Cy*. Сила $\vec{P}$ приложена в нижней точке шкива *B*, параллельна плоскости *zCx* и составляет угол 60° с направлением оси *Cx*. Определить вес удерживаемого груза $Q$ и реакции подшипника и подпятника, если $P$ = 4 кН; $F$ = 2 кН; $M$ = 3 кН·м; $R$ = 0,6 м; $r$ = 0,3 м; $a$ = 0,8 м; $b$ = 0,4 м.

*Решение*

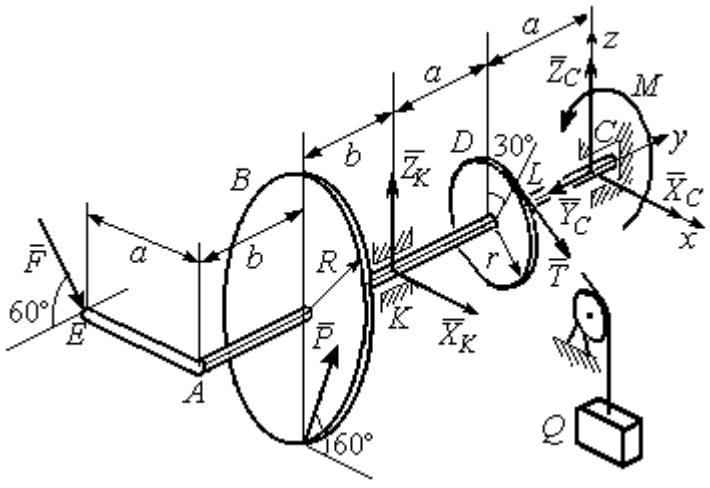


Рис. 1.40. Активные силы и реакции связей, действующие на вал, при его равновесии

Рассмотрим равновесие вала. На вал действуют активные силы $\vec{F}$, $\vec{P}$, пара с моментом *M* и реакции связей. Связями являются нить, натянутая грузом $Q$, подпятник *C* и подшипник *K*. Освобождаем вал от связей, заменяя их действие реакциями. Реакцию $\vec{R}_C$ подпятника *C* раскладываем на три составляющие: $\vec{X}_C$, $\vec{Y}_C$, $\vec{Z}_C$, направленные вдоль координатных осей (рис. 1.40). Реакция $\vec{R}_K$ подшипника *K* лежит в плоскости, перпендикулярной оси вала, и ее составляющими будут вектора

$\vec{X}_K, \vec{Z}_K$, направленные вдоль координатных осей *x*, *z*. Реакция нити $\vec{T}$ направлена вдоль нити от точки *L* и по модулю равна весу груза *Q*.

Активные силы и реакции связей составляют произвольную пространственную уравновешенную систему сил. При составлении уравнений равновесия изобразим вал вместе с действующими на него силами в проекциях на координатные плоскости (рис. 1.41).

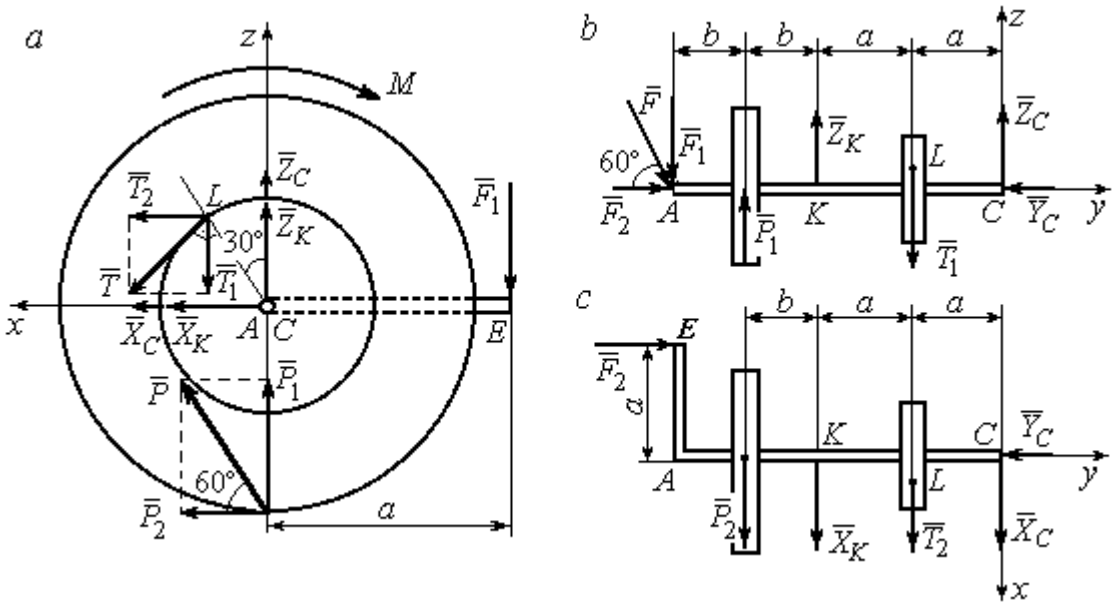



Рис. 1.41. Вал и действующие на него силы в проекциях на координатные плоскости:
*a* – вид вала в проекции на плоскость *zCx* с положительного конца оси *y*;
*b* – вид вала в проекции на плоскость *zCy* с положительного конца оси *x*;
*c* – вид вала в проекции на плоскость *xCy* с положительного конца оси *z*

На рис. 1.41, *a* показаны проекции вала и всех сил на плоскость *zCx*. Вычисляя моменты проекций сил относительно точки *C*, получим значения моментов этих сил относительно оси *y*. При вычислении моментов сил относительно оси *x* достаточно вычислить моменты проекций сил на плоскость *zCy* относительно точки *C* (рис. 1.41, *b*), а вычисляя моменты проекций сил на плоскость *xCy* относительно точки *C*, получим значения моментов сил относительно оси *z* (рис. 1.41, *c*).

Величины проекций сил определяются равенствами: $P_1 = P\cos 30^\circ$; $P_2 = P\cos 60^\circ$; $T_1 = T\cos 60^\circ$; $T_2 = T\cos 30^\circ$; $F_1 = F\cos 30^\circ$; $F_2 = F\cos 60^\circ$.

Составляем уравнения равновесия:

$$\sum F_{kx} = P\cos 60^\circ + X_K + T\cos 30^\circ + X_C = 0;\ \sum F_{ky} = F\cos 60^\circ - Y_C = 0;$$

$$\sum F_{kz} = P\cos 30^\circ + Z_K - T\cos 60^\circ + Z_C - F\cos 30^\circ = 0;$$

$$\sum M_x(\vec{F}_k) = T\cos 60^\circ \cdot a - Z_K \cdot 2a - P\cos 30^\circ \cdot (2a + b) +$$

$$+ F\cos 30^\circ \cdot (2a + 2b) = 0;$$

$$\sum M_y(\vec{F}_k) = -F\cos 30^\circ \cdot a - P\cos 60^\circ \cdot R + T \cdot r - M = 0;$$

$$\sum M_z(\vec{F}_k) = T\cos 30^\circ \cdot a + X_K \cdot 2a + P\cos 60^\circ \cdot (2a + b) - F\cos 60^\circ \cdot a = 0.$$

Подставляя исходные данные задачи, получим систему шести уравнений с шестью неизвестными, решая которую, найдём:

$$X_C = -8{,}09 \text{ кН},\ Y_C = 1 \text{ кН},\ Z_C = 4{,}65 \text{ кН},\ Z_K = 2{,}92 \text{ кН};$$

$$X_K = -10{,}02 \text{ кН},\ T = 18{,}6 \text{ кН}.$$

Реакции подпятника и подшипника:

$$R_C = \sqrt{X_C^2 + Y_C^2 + Z_C^2} = 9{,}4 \text{ кН},\ R_K = \sqrt{X_K^2 + Z_K^2} = 10{,}44 \text{ кН}.$$

Вес удерживаемого груза $Q$ равен реакции нити $T$.

**Задача 14.** Однородная прямоугольная плита (рис. 1.42) веса 25 кН прикреплена к полу при помощи шарового шарнира $A$, подшипника $B$ и удерживается в вертикальном положении стержнем $CO$, лежащим в плоскости, перпендикулярной плоскости плиты так, что $\angle COB = 60^\circ$. В плоскости плиты на неё действуют пара сил с моментом $M = 6$ кН·м, сила $\vec{F}_1$, равная $F_1 = 10$ кН, приложенная на верхней стороне плиты в точке $H$ под углом 30° к линии $EC$, и сила $\vec{F}_2$, равная $F_2 = 5$ кН, приложенная в точке $D$ параллельно стороне $AB$. В точке $E$ к плите прикреплён трос, на другом конце которого, перекинутым через блок $K$, подвешен груз весом $Q = 20$ кН. Отрезок троса $EK$ перпендикулярен плоскости плиты.

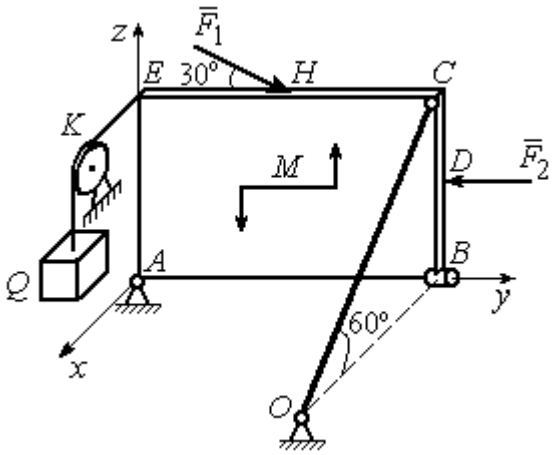



Рис. 1.42. Равновесие плиты

Определить реакции шарнира *A*, подшипника *B* и реакцию стержня *CO*, если ширина плиты *AB* = 3 м; высота *AE* = 2 м; *EH* = *HC*, *CD* = *DB*.

*Решение*

Рассмотрим равновесие плиты *ABCE*. На плиту действуют активные силы $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, сила тяжести плиты $\vec{P}$, пара сил с моментом *M* и реакции связей. Связями являются пространственный шарнир *A*, нить, натянутая грузом $Q$, подшипник *B* и невесомый стержень *CO*.

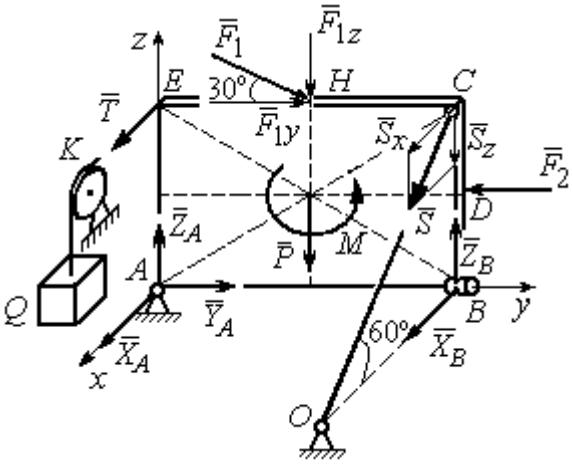



Рис. 1.43. Силы, действующие на плиту, при её равновесии

Выберем систему координат, как показано на рис. 1.43. Освобождаем плиту от связей, заменяя их действие реакциями. Реакцию $\vec{R}_A$ шарнира *A* раскладываем на три составляющие: $\vec{X}_A$, $\vec{Y}_A$, $\vec{Z}_A$, направленные вдоль координатных осей. Реакция нити $\vec{T}$ направлена вдоль нити параллельно оси *Ax* и равна весу груза $T = Q$, реакция $\vec{R}_B$ подшипника *B* расположена в плоскости, перпендикулярной оси *Ay*, и представлена в виде двух своих составляющих $\vec{X}_B$, $\vec{Z}_B$, реакция $\vec{S}$ невесомого стержня *CO* направлена вдоль стержня. Направления активных сил и реакций связей показаны на рис. 1.43.

Силы, действующие на плиту, и реакции связей составляют пространственную уравновешенную систему сил. Составим уравнения равновесия:

$$\sum F_{kx} = X_A + T + X_B + S\cos 60^\circ = 0;$$

$$\sum F_{ky} = Y_A - F_2 + F_1\cos 30^\circ = 0;$$

$$\sum F_{kz} = Z_A - F_1\cos 60^\circ - P + Z_B - S\cos 30^\circ = 0;$$

$$\sum M_x(\vec{F}_k) = -F_1\cos 60^\circ \cdot 0{,}5 \cdot AB - F_1\cos 30^\circ \cdot AE - P \cdot 0{,}5 \cdot AB +$$

$$+ F_2 \cdot BD + Z_B \cdot AB - S\cos 30^\circ \cdot AB + M = 0;$$

$$\sum M_y(\vec{F}_k) = T \cdot AE + S\cos 60^\circ \cdot CB = 0;$$

$$\sum M_z(\vec{F}_k) = -X_B \cdot AB + S\cos 60^\circ \cdot EC = 0.$$

Подставляя исходные данные задачи, получим систему уравнений, решая которую, найдём значения реакций: $S$ = – 40 кН; $X_B$ = – 20 кН; $Z_B$ = – 17,53 кН; $X_A$ = 20 кН; $Y_A$ = – 3, 66 кН; $Z_A$ = 12,89 кН.

**Задача 15.** Прямоугольная фрамуга *ACEB* весом $P$ = 50 Н, закрепленная в точках $A$ и $B$ цилиндрическими шарнирами, открыта на угол 60º (рис. 1.44). На фрамуге в точке $H$ закреплена верёвка, другой конец которой, переброшенный через невесомый блок $K$, несёт груз $Q$. При этом линия верёвки $HK$ параллельна прямой $ED$. На фрамугу действует сила $\vec{F}$, приложенная в верхнем углу в точке $C$ перпендикулярно плоскости фрамуги и равная по величине $F$ = 15 Н.

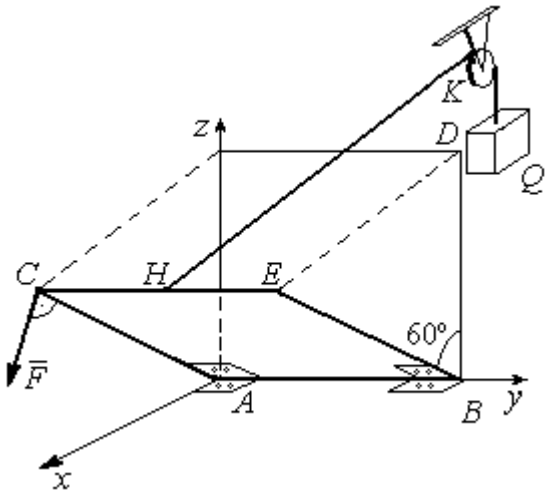


Рис. 1.44. Равновесие фрамуги

Определить вес груза $Q$, необходимый для удержания фрамуги в равновесии и реакции цилиндрических шарниров $A$ и $B$, если размеры фрамуги $BE = BD$ = 2 м; $AB$ = 3 м; $CH = HE$.

*Решение*

Рассмотрим равновесие фрамуги *ABCE*. Изображаем внешние активные силы: силу $\vec{F}$, силу тяжести фрамуги $\vec{P}$, а также реакции связей. Связями являются два цилиндрических шарнира *A* и *B* (связь, аналогичная подшипнику) и нить, натянутая грузом $Q$. Выберем систему координат *Axyz*, как показано на рис. 1.45. Освобождаем фрамугу от связей, заменяя их действие реакциями. Реакции $\vec{R}_A$ и $\vec{R}_B$ шарниров *A* и *B* раскладываем на взаимно перпендикулярные составляющие: $\vec{X}_A$, $\vec{Z}_A$ и $\vec{X}_B$, $\vec{Z}_B$ в плоскостях, перпендикулярных оси вращения фрамуги (ось *Ay*), реакция нити $\vec{T}$ направлена вдоль нити и равна весу груза $T = Q$. Направления активных сил и реакций связей показаны на рис. 1.45.

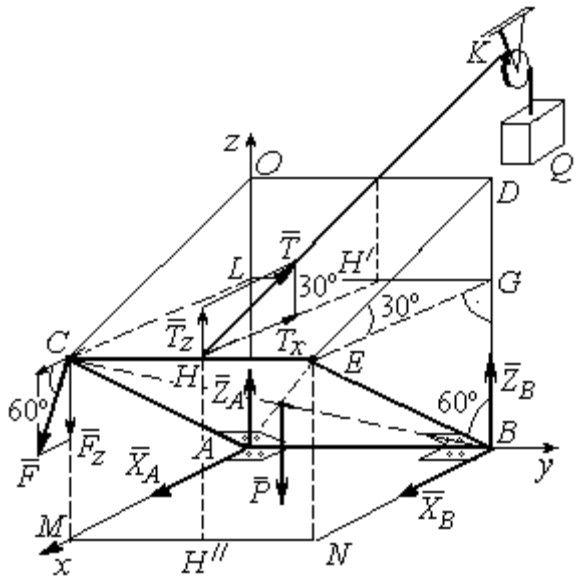


Рис. 1.45. Активные силы и реакции при равновесии фрамуги

Силы, действующие на фрамугу, составляют уравновешенную пространственную систему сил.

Составим уравнения равновесия. При этом для удобства вычисления моментов сил относительно осей изобразим плоскости, перпендикулярные этим осям, с проекциями на них сил, действующих на фрамугу (рис. 1.46). Тогда моменты сил, действующих на фрамугу, например, относительно оси *Ax* определяются как моменты векторов проекций этих сил на плоскость *zAy* относительно точки *A* – пересечения оси *Ax* и перпендикулярной ей плоскости *zAy* (см. рис. 1.46, *a*). Аналогично при вычислении моментов сил относительно оси *Az* достаточно вычислить моменты векторов проекций сил на плоскость *xAy* относительно точки *A* (см. рис. 1.46, *b*).

Значения моментов сил относительно оси *Ay* получим, вычисляя моменты векторов проекций сил на плоскость *zAx* относительно точки *A* (см. рис. 1.46, *c*).

Уравнения равновесия фрамуги имеют вид:

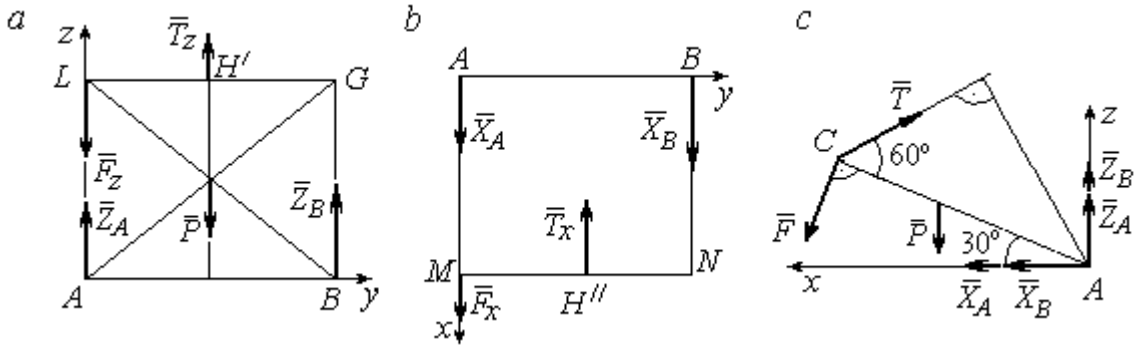



Рис. 1.46. Фрамуга и действующие на неё силы в проекциях на координатные плоскости:
*a* – проекция на плоскость *zAy* со стороны положительного направления оси *x*; *b* – проекция на плоскость *xAy* со стороны положительного направления оси *z*; *c* – проекция на плоскость *zAx* со стороны положительного направления оси *y*

$$X_A + X_B + F\cos 60^\circ - T\cos 30^\circ = 0;$$

$$Z_A + Z_B - P - F\cos 30^\circ + T\cos 60^\circ = 0;$$

$$\sum M_x(\vec{F}_k) = T_z \cdot 0{,}5 \cdot AB - P \cdot 0{,}5 \cdot AB + Z_B \cdot AB = =$$

$$T\cos 60^\circ \cdot 0{,}5 \cdot AB - P \cdot 0{,}5 \cdot AB + Z_B \cdot AB = 0;$$

$$\sum M_y(\vec{F}_k) = P \cdot 0{,}5 \cdot AC\cos 30^\circ + F \cdot AC - T \cdot AC\sin 60^\circ = 0;$$

$$\sum M_z(\vec{F}_k) = -X_B \cdot AB + T_x \cdot 0{,}5 \cdot AB = -X_B \cdot AB + T\cos 30^\circ \cdot 0{,}5 \cdot AB = 0.$$

Подставляя исходные данные из условия задачи и решая систему, найдём реакции шарниров фрамуги:

$$X_B = 18{,}22 \text{ Н},\ Z_B = 14{,}41 \text{ Н},\ R_B = \sqrt{X_B^2 + Z_B^2} = 23{,}31 \text{ Н};$$

$$X_A = 10{,}83 \text{ Н},\ Z_A = 27{,}41 \text{ Н},\ R_A = \sqrt{X_A^2 + Z_A^2} = 29{,}47 \text{ Н}.$$

Вес груза, удерживающий фрамугу в равновесии, численно равен реакции верёвки: $Q = T = 42{,}37$ Н.

**Задача 16.** Горизонтальный коленчатый вал *AD* (рис. 1.47) закреплен в подпятнике *A* и подшипнике *C*. Вал имеет шкив радиуса $r$ и рукоять *DH*, перпендикулярные оси вала. Рукоять *DH* образует угол 30º к направлению оси *Ax*. Колено вала расположено в горизонтальной плоскости *xAy*. Нить, удерживающая груз *Q*, намотана на шкив и сходит с него вертикально вниз. На вал действуют силы $\vec{F}, \vec{P}, \vec{G}$ и пара сил с моментом *M*. Сила $\vec{F}$ приложена в верхней точке вертикального диаметра шкива под углом 30° к направлению оси *Ay* и находится в плоскости z*Ay*. Сила $\vec{P}$ приложена в нижней точке *H* рукояти параллельно оси *Az*. Сила $\vec{G}$ приложена в крайней точке *K* стойки колена вала под углом 60º к стойке и находится в плоскости, перпендикулярной оси вала. Пара сил с моментом *M* создаёт вращение вала вокруг оси *Ay*.

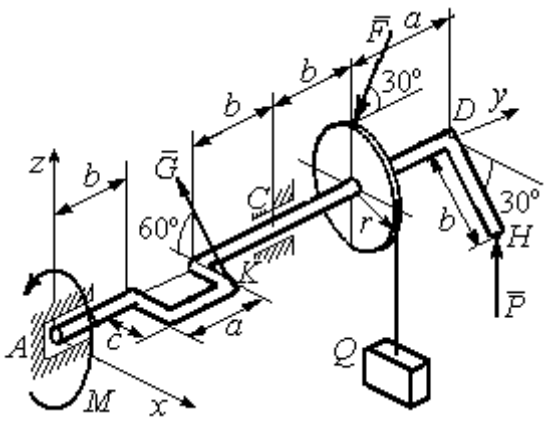


Рис. 1.47. Равновесие вала

Определить вес удерживаемого груза $Q$ и реакции подшипника и подпятника, если: $P$ = 10 кН; $F$ = 12 кН; $G$ = 6 кН; $M$ = 3 кН·м; $r$ = 0,3 м; $a$ = 0,8 м; $b$ = 0,4 м; $c$ = 0,2 м.

*Решение*

Рассмотрим равновесие вала. На вал действуют активные силы – $\vec{F}$, $\vec{P}$, $\vec{G}$, пара сил с моментом *M* и реакции связей. Связями являются нить, натянутая грузом $Q$, подпятник *A* и подшипник *C*.

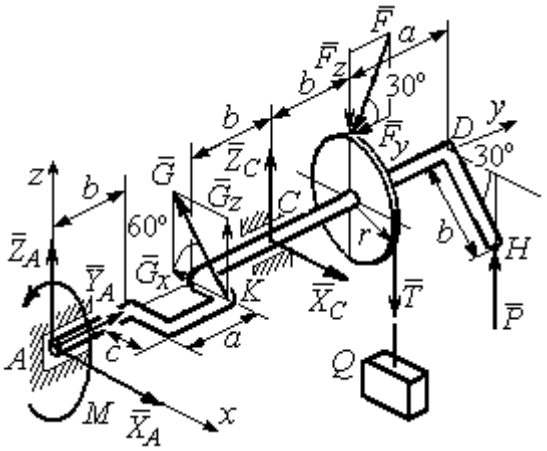


Рис. 1.48. Силы и реакции, действующие на вал при равновесии

Освобождаем вал от связей, заменяя их действие реакциями.

Реакцию подпятника $A$ раскладываем на три составляю-щие: $\vec{X}_A$, $\vec{Y}_A$, $\vec{Z}_A$, направленные вдоль координатных осей. Реакция подшипника $C$ лежит в плоскости, перпендикулярной оси вала, и также может быть разложена на составляющие $\vec{X}_C$, $\vec{Z}_C$, направленные вдоль координатных осей *Ax*, *Az*. Реакция нити $\vec{T}$ направлена вдоль нити и по модулю равна весу груза, $T = Q$. Действие на вал активных сил и реакций связи показано на рис. 1.48.

Указанные силы составляют произвольную пространственную уравновешенную систему сил.

Составим уравнения равновесия:

$$\sum F_{kx} = X_A - G\cos 60^\circ + X_C = 0;$$

$$\sum F_{ky} = Y_A - F\cos 30^\circ = 0;$$

$$\sum F_{kz} = Z_A + G\cos 30^\circ + Z_C - F\cos 60^\circ - T + P = 0.$$

$$\sum M_x(\vec{F}_k) = G_z(b+a) + Z_C(b+a+b) - F_z(b+a+b+b) + F_y r -$$

$$-T(b+a+b+b) + P(b+a+b+b+a) = 0;$$

$$\sum M_y(\vec{F}_k) = -G_z c + Tr - Pb\cos 30^\circ - M = 0;$$

$$\sum M_z(\vec{F}_k) = G_x(b+a) - X_C(b+a+b) = 0,$$

где значения проекций сил на оси $G_z = G\cos 30^\circ$; $G_x = G\cos 60^\circ$; $F_z = F\cos 60^\circ$; $F_y = F\cos 30^\circ$.

Подставляя исходные данные и решая систему, получим значения реакций:

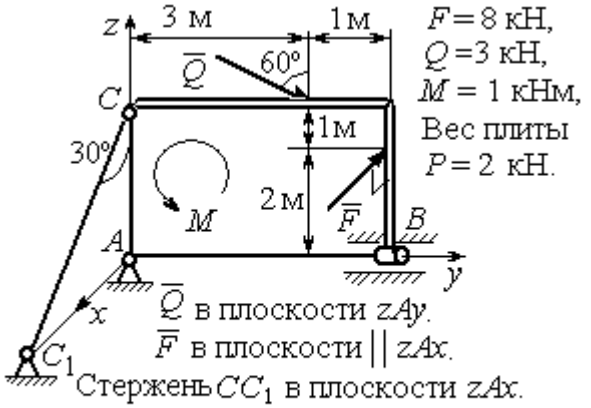
$$X_C = 2{,}25 \text{ кН};\ Z_C = 13{,}57 \text{ кН};\ R_C = \sqrt{X_C^2 + Z_C^2} = 15{,}58 \text{ кН};$$

$$Z_A = 0{,}39 \text{ кН};\ Y_A = 10{,}39 \text{ кН};\ X_A = 0{,}75 \text{ кН};\ R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2 + Z_A^2} = 10{,}42 \text{ кН}.$$

Вес удерживаемого груза равен реакции нити $Q = T = 25{,}03$ кН.

**Упражнения**

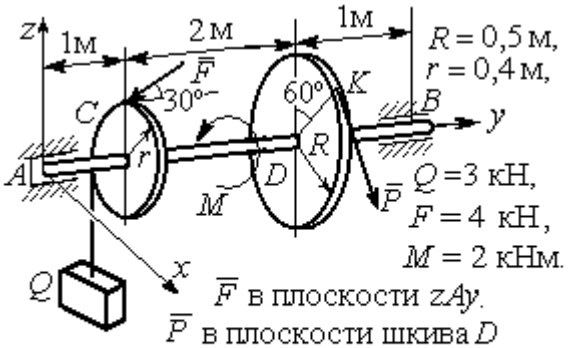
Упражнение 1.9




$F = 8$ кН,
$Q = 3$ кН,
$M = 1$ кНм,
Вес плиты
$P = 2$ кН.

$\overline{Q}$ в плоскости $zAy$.
$\overline{F}$ в плоскости $\| zAx$.
Стержень $CC_1$ в плоскости $zAx$.
Найти реакцию шарнира $A$, реакцию подшипника $B$ и реакцию стержня $CC_1$

Упражнение 1.10




$R = 0{,}5$ м,
$r = 0{,}4$ м,
$Q = 3$ кН,
$F = 4$ кН,
$M = 2$ кНм.

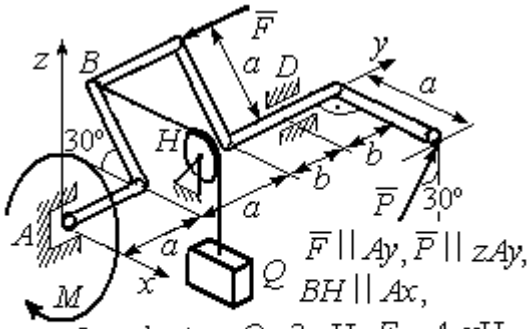
$\overline{F}$ в плоскости $zAy$.
$\overline{P}$ в плоскости шкива $D$
и направлена по касательной в точке $K$.
Найти реакцию подпятника $A$, подшипника $B$ и уравновешивающую силу $P$

Упражнение 1.11




$\overline{P}$ направлена по касат. к шкиву в точке $K$.
$\overline{F}$ в плос-ти $zAy$.
Нить сходит со шкива $\|$ оси $Ay$.
$a = 1$ м, $b = 2$ м,
$R = 0{,}5$ м, $r = 0{,}4$ м,
$Q = 3$ кН, $F = 4$ кН,
$M = 2$ кНм.
Найти реакцию $Q$ подпятника $A$, подшипника $B$ и уравновешивающую силу $P$

Упражнение 1.12




$\overline{F} \| Ay$, $\overline{P} \| zAy$,
$BH \| Ax$,
$a = 2$м, $b = 1$м, $Q = 3$ кН, $F = 4$ кН,
$M = 2$ кНм. Найти реакцию подпятника $A$, подшипника $D$ и уравновешивающую силу $P$

Рис. 1.49. Задания для самостоятельного решения. Упражнения 1.9 – 1.12

## 1.6. Равновесие тел при наличии сил трения

**Трение скольжения.** При наличии трения скольжения полная реакция $\vec{R}$ шероховатой опоры раскладывается на нормальную составляющую $\vec{N}$ опоры и силу $\vec{F}_{\text{тр с}}$ трения скольжения, направленную по касательной к поверхности в точке опоры.

В покое сила трения скольжения может принимать любые значения от нуля до некоторого предельного значения $F_{\text{тр с}}$, называемого **предельной силой трения скольжения** (рис. 1.50).

Наибольший угол $\varphi_0$, который полная реакция шероховатой поверхности образует с нормалью к поверхности, называется **предельным углом трения**. Предельная сила трения численно равна произведению коэффициента трения на величину нормальной реакции опоры тела на поверхность: $F_{\text{тр с}} = f \cdot N$, где $f$ – безразмерный коэффициент трения, определяемый экспериментально.

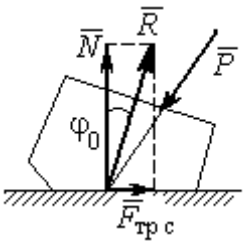


Рис. 1.50. Реакция опоры с трением скольжения

Изучение равновесия тел с учетом сил трения сводится к рассмотрению предельного равновесия, когда сила трения принимает предельное значение.

**Трением качения** называется сопротивление, возникающее при качении одного тела по шероховатой поверхности другого. Реакция шероховатой опоры раскладывается на нормальную составляющую $\vec{N}$ и силу трения качения $\vec{F}_{\text{тр к}}$, направленную по касательной к поверхности качения. При этом за счёт небольшого вдавливания в поверхность качения нормальная реакция опоры $\vec{N}$ смещена в сторону от линии действия силы тяжести $\vec{P}$ так, что вместе с ней образует пару, противодействующую качению (рис. 1.51). В предельном положении равновесия тела смещение нормальной реакции опоры максимально.

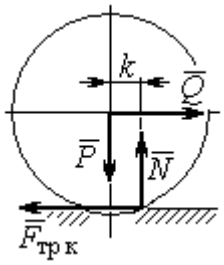


Рис. 1.51. Реакция опоры с трением качения

Величина максимального смещения $k$ называется **коэффициентом трения качения**, измеряемого в единицах длины. Момент, создаваемый парой $(\vec{N}, \vec{P})$, называется **моментом трения качения** $M_{\text{тр к}} = kN$. Максимальная сила трения качения $\vec{F}_{\text{тр к}}$ определяется из условия, что в предельном

положении равновесия момент трения качения равен моменту качения, создаваемого парой ($\vec{F}_{\text{тр к}}, \vec{Q}$) (рис. 1.51).

Если максимальная сила трения качения меньше предельной силы трения скольжения, движение представляет качение без скольжения.

### Примеры решения задач на равновесие тел с трением

**Задача 17.** Груз $Q$ весом 50 Н удерживается нитью на шероховатой наклонной плоскости (рис.1.52). Один конец нити закреплен на грузе $Q$, а к другому, перекинутому через невесомый блок, подвешен груз весом $P$. Отрезок нити $AB$ горизонтальный. Угол наклона плоскости составляет 30º к горизонту. Определить максимальное и минимальное значения веса груза $P$, при которых груз $Q$ может начать скольжение по плоскости без опрокидывания, если коэффициент трения скольжения между грузом $Q$ и наклонной плоскостью $f = 0{,}4$.

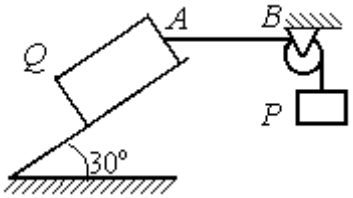


Рис.1.52. Равновесие груза на наклонной плоскости с трением

*Решение*

Рассмотрим равновесие груза $Q$ при минимальном значении веса груза $P$. На груз действуют сила тяжести $\vec{Q}$, реакция нити $\vec{T}_{\min}$ и реакция шероховатой поверхности наклонной плоскости, состоящая из нормальной реакции наклонной плоскости $\vec{N}$ и силы трения $\vec{F}_{\text{тр1}}$ (рис. 1.53, *а*). Особенностью задач на равновесие призм является то, что точка приложения нормальной реакции не определена. В случае необходимости она находится из уравнений равновесия.

Определим направление силы трения. Если вес уравновешивающего груза $P$ имеет минимальное значение $P_{\min}$, то при его дальнейшем уменьшении груз $Q$ начнёт двигаться вниз по наклонной плоскости. Таким образом, предельная сила трения $\vec{F}_{\text{тр}1}$, обеспечивающая равновесие при минимальном значении веса груза $P$, направлена вверх по наклонной плоскости (см. рис. 1.53, *a*).

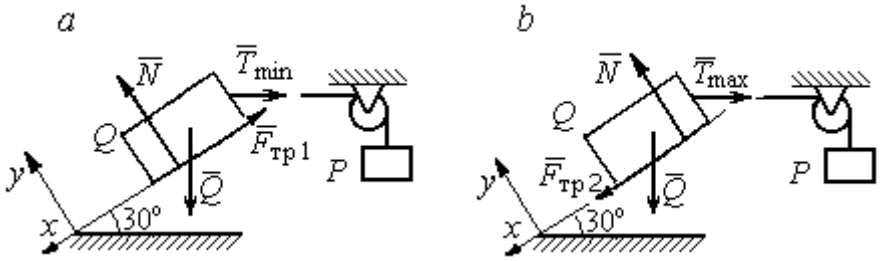



Рис. 1.53. Силы, действующие на груз при равновесии:
*a* – минимальный вес уравновешивающего груза;
*b* – максимальный вес уравновешивающего груза

Выберем систему координат, как показано на рис. 1.53, и составим уравнения равновесия в виде проекций сил:

$$\sum F_{kx} = Q\cos 60^\circ - T_{\min}\cos 30^\circ - F_{\text{тр}} = 0;$$

$$\sum F_{ky} = -Q\cos 30^\circ + N - T_{\min}\cos 60^\circ = 0.$$

Полагая в первом уравнении $F_{\text{тр}1} = f N$, решаем систему и находим реакцию нити $T_{\min} = 7{,}21$ Н. Минимальное значение веса уравновешивающего груза равно реакции нити: $P_{\min} = T_{\min} = 7{,}21$ Н.

Рассмотрим равновесие груза $Q$ при максимальном $P_{\max}$ значении веса груза $P$. На груз действует сила тяжести $\vec{Q}$, реакция нити $\vec{T}_{\max}$ и реакция шероховатой поверхности наклонной плоскости, состоящая, как и в первом случае, из нормальной реакции наклонной плоскости $\vec{N}$ и силы трения $\vec{F}_{\text{тр}2}$ (см. рис. 1.53, *b*).

При определении направления силы трения заметим, что увеличение веса груза $P$ больше максимального вызывает движение груза $Q$ вверх по наклонной

плоскости. Тогда предельная сила трения $\vec{F}_{\text{тр}2}$, действующая против возможного движения, должна быть направлена вниз по наклонной плоскости (см. рис. 1.53, *b*). Уравнения равновесия груза *Q*:

$$\sum F_{kx} = Q\cos 60^\circ - T_{\max}\cos 30^\circ + F_{\text{тр}2} = 0;$$

$$\sum F_{ky} = -Q\cos 30^\circ + N - T_{\max}\cos 60^\circ = 0.$$

Решаем систему, подставляя вместо силы трения её значение $F_{\text{тр}2} = fN$, и находим максимальное значение веса груза *P*: $P_{\max} = T_{\max}$ = 63,54 Н.

Таким образом, груз *Q* будет находиться в равновесии на наклонной плоскости, если вес уравновешивающего груза находится в пределах 8,87 < *P* < 48,87 Н.

**Задача 18.** Цилиндрический каток радиуса *r* = 0,5 м, весом *P* = 50 Н удерживается в равновесии на наклонной плоскости нитью, один конец которой закреплён в центре катка, а другой перекинут через блок и несёт груз весом *Q* (рис. 1.54). Коэффициент трения качения катка $f_{\text{к}}$ = 0,02 м. Наклонная плоскость составляет угол 30º с горизонтом.

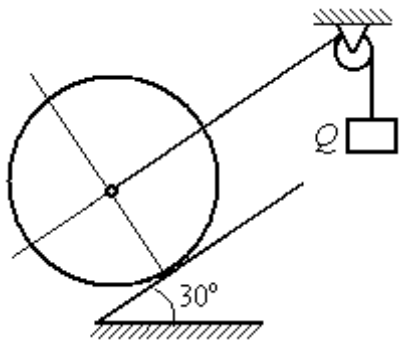


Рис. 1.54. Равновесие катка

Определить наименьшую и наибольшую величину веса *Q*, при которых каток будет в равновесии. Найти наименьшее значение коэффициента трения скольжения $f_{\text{с}}$, при котором в случае движения каток будет катиться без скольжения.

*Решение*

Рассмотрим равновесие катка при минимальном значении веса груза *Q* . На каток действует сила тяжести $\vec{P}$, реакции нити $\vec{Q}_{\min}$ и реакция шероховатой поверхности наклонной плоскости $\vec{R}$, имеющая своими составляющими нормальную реакцию поверхности $\vec{N}$ и силу трения качения $\vec{F}_{\text{тр1к}}$ (рис. 1.55, *a*).

Минимальный вес груза $Q_{\min}$ удерживает каток от качения вниз по наклонной плоскости. В этом случае составляющие реакции шероховатой поверхности наклонной плоскости приложены в точке $K_1$, слева от нормального к плоскости диаметра катка (см. рис. 1.55, *a*). Выбор точки приложения реакции шероховатой поверхности основан на том, что пара ( $\vec{N}$ , $\vec{P}_y$ ) должна создавать момент трения качения, противодействующий предполагаемому движению.

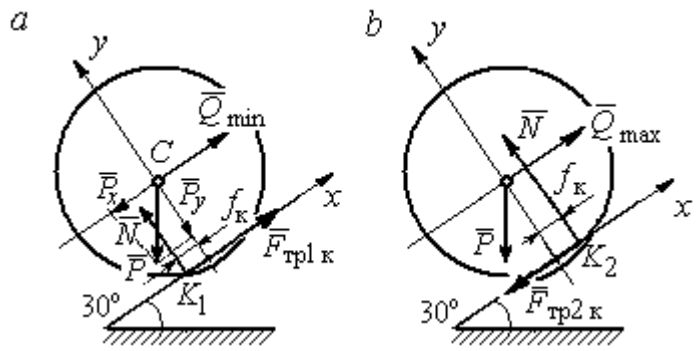


Рис. 1.55. Силы, действующие на каток, при равновесии:
*a* – минимальный вес груза; *b* – максимальный вес груза

На каток действует плоская уравновешенная система сил ($\vec{Q}_{\min}$ , $\vec{F}_{тр1\,к}$, $\vec{N}$ , $\vec{P}$) ∞ 0. Выберем систему координат, как показано на рис. 1.55, *a*, и составим уравнения равновесия катка, где уравнение моментов сил составлено относительно точки $K_1$:

$$\sum F_{kx} = -P\cos 60^\circ + Q_{\min} + F_{тр1к} = 0;$$

$$\sum F_{ky} = = -P\cos 30^\circ + N = 0;$$

$$\sum M_{K_1}(\vec{F}_k) = P\cos 60^\circ \cdot r - Q_{\min} r - P\cos 30^\circ \cdot f_к = 0.$$

Подставляем данные задачи и находим минимальное значение веса груза, при котором каток находится в равновесии $Q_{\min}$ = 7,68 Н, величину нормальной реакции наклонной плоскости $N$ = 43,3 Н и значение силы трения качения, удерживающей каток в равновесии, $F_{тр1к}$ = 17,32 Н.

Рассмотрим равновесие катка при максимальном значении веса груза $Q_{\max}$ . Здесь нарушение предельного равновесия при увеличении веса груза $Q$ вызывает движение катка вверх по наклонной плоскости. В таком случае точка

приложения реакции опоры шероховатой поверхности (точка $K_2$) расположена справа от нормального к плоскости качения диаметра катка (рис. 1.55, *b*).

На каток действует плоская уравновешенная система сил ($\vec{Q}_{\max}$, $\vec{F}_{\text{тр2 к}}$, $\vec{N}$, $\vec{P}$) $\infty$ 0. Выберем систему координат, как показано на рис. 1.55, *b*. Уравнения равновесия катка, где уравнение моментов сил составлено относительно точки $K_2$ имеют вид:

$$\sum F_{kx} = -P\cos 60^\circ + Q_{\max} - F_{\text{тр2 к}} = 0;$$

$$\sum F_{ky} = -P\cos 30^\circ + N = 0;$$

$$\sum M_{K_2}(\vec{F}_k) = -P\cos 60^\circ \cdot r + Q_{\max} r - P\cos 30^\circ \cdot f_{\text{к}} = 0.$$

Решая систему, получим: $Q_{\max} = 42{,}32$ Н; $N = 43{,}3$ Н; $F_{\text{тр2 к}} = 17{,}32$ Н.

Таким образом, на шероховатой поверхности каток находится в равновесии, если вес уравновешивающего груза выбран в пределах $7{,}68 \le Q \le 42{,}32$ Н.

При любом движении (вверх или вниз) качение катка будет без скольжения, если предельная сила трения скольжения $F_{\text{тр с}}$ больше аналогичной силы трения качения: $F_{\text{тр с}} > F_{\text{тр к}}$. Величина силы трения скольжения не зависит от направления движения: $F_{\text{тр с}} = f_{\text{с}} N = 43{,}3 f_{\text{с}}$, где $f_{\text{с}}$ – коэффициент трения скольжения. Величина силы трения качения также не зависит от направления движения: $F_{\text{тр к}} = F_{\text{тр1 к}} = F_{\text{тр2 к}} = 17{,}32$ Н. Таким образом, для определения требуемого коэффициента скольжения имеет место неравенство $43{,}3 f > 17{,}32$, откуда $f > 0{,}4$.

**Задача 19.** Для подъёма и опускания грузов в выработках используется ступенчатый ворот с тормозом, изображённый на рис. 1.56. Радиусы большой и малой ступенек барабана ворота $R$ = 0,5 м и $r$ = 0,2 м. Ворот тормозят, надавливая на конец $A$ рычага $AB$, соединённого цепью $CD$ с концом $D$ тормозного рычага $ED$ с расположенной на нём тормозной колодкой. Коэффициент трения между тормозной колодкой и барабаном ворота $f$ = 0,4. На малой ступеньке барабана ворота навита верёвка, другой конец которой, переброшенный через невесомые неподвижный блок $m$ и подвижный блок $n$, удерживает груз $Q$ весом 1 кН (см. рис. 1.56). Угол наклона к горизонту участка верёвки, соединяющей барабан с неподвижным блоком $m$, составляет 30°.

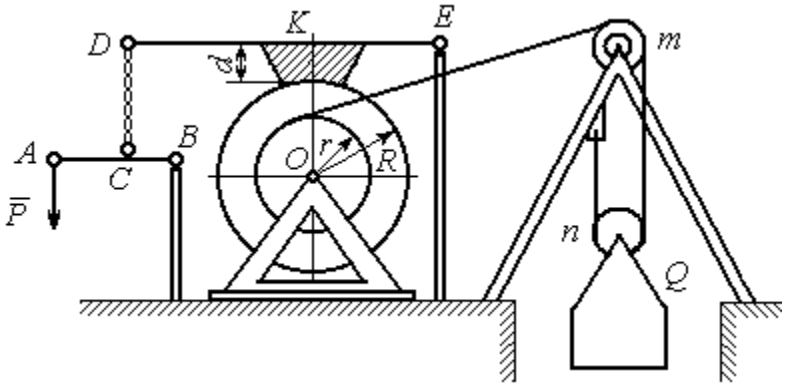


Рис. 1.56. Ворот с колодочным тормозом

Определить величину силы $\vec{P}$, уравновешивающей груз $Q$, и реакции шарниров $O$ и $E$, если вес ворота $G$ = 140 Н, высота тормозной колодки $d$ = 0,1 м, расстояния $AB$ = 1 м, $BC$ = 0,1 м; $ED$ = 1,2 м; $EK$ = 0,6 м.

*Решение*

Рассмотрим отдельно равновесие барабана ворота, тормозного рычага $DE$ и рычага $AB$ (рис. 1.57).

Для того; чтобы определить силу натяжения верёвки, прикреплённой к барабану, рассмотрим равновесие груза вместе с подвижным блоком $n$ (см. рис. 1.57, *а*). На объект равновесия действует сила тяжести груза $\vec{Q}$ и реакции $\vec{T}'$ и $\vec{T}''$ двух ветвей верёвки, огибающей снизу блок $n$.

Уравнения равновесия такой системы сил:

$$T' + T'' - Q = 0; \qquad T''r_{\text{бл}} = T'r_{\text{бл}},$$

где моменты сил вычислены относительно центра блока; $r_{бл}$ – радиус блока *n*. Решая систему уравнений, получим: $T' = T'' = 0{,}5Q = 500$ Н.

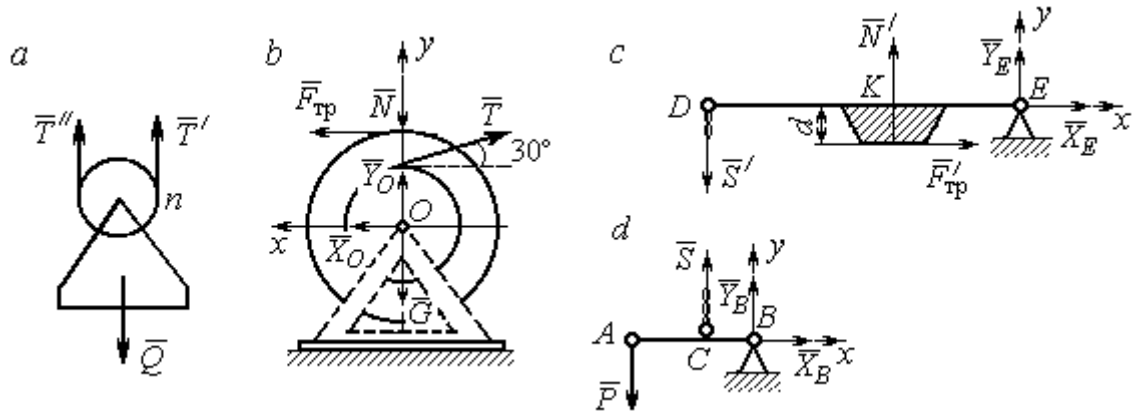



Рис. 1.57. Равновесие элементов конструкции ворота:
*a* – равновесие груза; *b* – силы, действующие на барабан; *c* – силы, действующие на тормозной рычаг *DE*; *d* – силы, действующие на рычаг *AB*

Рассмотрим равновесие барабана. На барабан действуют: сила веса барабана $\vec{G}$, сила давления $\vec{N}$ со стороны рычага, направленная по радиусу барабана, сила трения $\vec{F}_{тр}$, действующая по касательной к барабану в сторону, противоположную движению барабана при опускании груза, реакция $\vec{R}_O$ шарнира *O*, представленная двумя составляющими $\vec{X}_O, \vec{Y}_O$, и реакция верёвки $\vec{T}$, численно равная модулю силы $\vec{T}'$ (см. рис. 1.57, *b*).

Силы, действующие на барабан, составляют уравновешенную произвольную плоскую систему сил ($\vec{G}$, $\vec{X}_O, \vec{Y}_O, \vec{T}, \vec{N}$, $\vec{F}_{тр}$) ~ 0. Составим уравнение моментов относительно точки *O*:

$$-Tr + F_{тр}R = 0,$$ откуда с учётом $T = T'$ $F_{тр} = 200$ Н.

Величина силы $\vec{N}$ давления рычага на барабан находится из вида зависимости силы трения $F_{тр} = f N$, тогда $N = \dfrac{F_{тр}}{f} = 500$ Н.

Составим уравнения равновесия барабана в виде проекций сил на оси, выбранные, как показано на рис. 1.57, *b*:

$$\sum F_{kx} = X_O + F_{тр} - T\cos 30^\circ = 0;$$

$$\sum F_{ky} = Y_O + T\cos 60^\circ - N - G = 0.$$

Решая систему, найдём реакцию шарнира *O*:

$$X_O = 233 \text{ Н};\ Y_O = 390 \text{ Н};\ R_O = \sqrt{X_O^2 + Y_O^2} = 454{,}3 \text{ Н}.$$

Рассмотрим теперь равновесие тормозного рычага *DE* (см. рис. 1.57, *c*).

На рычаг действуют сила $\vec{N}'$ давления со стороны барабана и сила трения $\vec{F}'_{\text{тр}}$, приложенные в точке касания тормозной колодки с барабаном, равные по величине и противоположные по направлению, соответственно, силам $\vec{N}$ и $\vec{F}_{\text{тр}}$. Кроме того, в точке *D* на рычаг действует сила $\vec{S}'$, под действием которой рычаг прижимается к барабану, и реакция шарнира *E*, разложенная на составляющие $\vec{X}_E$, $\vec{Y}_E$ вдоль осей *x*, *y*. Уравнения равновесия рычага имеют вид:

$$\sum F_{kx} = X_E + F'_{\text{тр}} = 0; \quad \sum F_{ky} = Y_E + N' - S' = 0;$$

$$\sum M_E(\vec{F}_k) = S' \cdot DE - N' \cdot EK + F'_{\text{тр}} d = 0.$$

Подставляя в систему данные из условия задачи, с учётом найденных значений $F'_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} = 200$ Н, $N' = N = 500$ Н, определим усилие $S'$, с которым тормозной рычаг прижимается к барабану, и реакцию шарнира *E*:

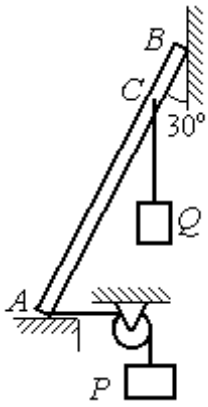
$$S' = 233{,}33 \text{ Н};\ X_E = -200 \text{ Н};\ Y_E = -266{,}67 \text{ Н};\ R_E = \sqrt{X_E^2 + Y_E^2} = 333{,}34 \text{ Н}.$$

Силу $\vec{P}$, необходимую для уравновешивания груза *Q*, найдём рассматривая равновесие рычага *AB* (см. рис. 1.57, *d*) . На рычаг действуют сила $\vec{P}$, реакция цепи $\vec{S}$ и реакция шарнира *B*, показанная на рис. 1.57, *d* составляющими $\vec{X}_B$, $\vec{Y}_B$.

Составим уравнение равновесия рычага в форме равенства нулю суммы моментов сил относительно точки *B*: $P \cdot AB - S \cdot CB = 0$. С учётом того, что модули сил $\vec{S}$ и $\vec{S}'$ равны, найдем $P = 23{,}3$ Н.

## Упражнения

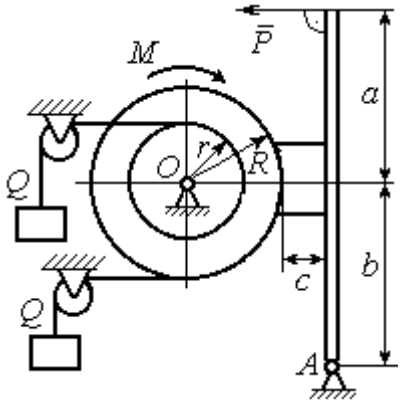
Упражнение 1.13




Невесомый стержень $AB$ опирается в точках $A$ и $B$ на шероховатые поверхности – горизонтальный пол и вертикальную стену. Коэффициент трения между стержнем и полом и между стержнем и стеной $f = 0{,}2$. Угол наклона стержня к вертикальной стене 30°. В точке $C$ к стержню подвешен груз $Q$. Стержень удерживается в равновесии горизонтальной нитью, прикреплённой в точке $A$ и перекинутой через блок. К другому концу нити подвешен груз $P$. В каких границах можно изменять вес груза $P$, не нарушая равновесия стержня?

$AB = 3$ м, $AC = 2$ м, $Q = 200$ Н.

Упражнение 1.14




Шкив $O$ состоит из двух барабанов радиусов $R$ и $r$. На барабаны навиты верёвки, натянутые одинаковыми грузами $Q$. К шкиву приложена пара сил с моментом $M$. Шкив затормаживается с помощью рычажного тормоза. Коэффициент трения между тормозной колодкой и шкивом $f = 0{,}4$. Определить силу $\vec{P}$, приложенную к рычагу тормозной колодки и уравновешивающую шкив. Найти реакцию шарнира $A$.

$a = b = 1$ м; $c = 0{,}1$ м; $Q = 100$ Н; $M = 120$ Н·м;
$R = 0{,}6$ м; $r = 0{,}2$ м.

Рис. 1.58. Задания для самостоятельного решения. Упражнения № 1.13, 1.14

# 2. КИНЕМАТИКА ТОЧКИ И ТВЁРДОГО ТЕЛА

## 2.1. Криволинейное движение точки

Кривая, которую описывает движущаяся точка, называется **траекторией** точки. Движение точки может быть задано **векторным**, **координатным** или **естественным** способами.

**Координатный способ** задания движения точки основан на том, что положение точки определяется ее координатами, заданными для каждого момента времени (рис. 2.1): $x = x(t)$, $y = y(t)$, $z = z(t)$.

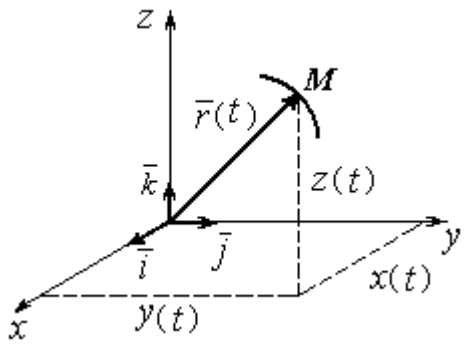


Рис. 2.1. Векторный и координатный способы задания движения точки

**Мгновенная скорость,** или скорость точки в данный момент времени, является векторной величиной и определяется как производная по времени от радиус-вектора точки: $\vec{V} = \frac{d\vec{r}}{dt}$. **Вектор скорости точки $\vec{V}$ всегда направлен по касательной к траектории в сторону движения точки.** Величины $V_x$, $V_y$, $V_z$ проекций вектора скорости $\vec{V}$ на координатные оси определяются как производные по времени от соответствующих координат: $V_x = \frac{dx}{dt} = \dot{x}$; $V_y = \frac{dy}{dt} = \dot{y}$; $V_z = \frac{dz}{dt} = \dot{z}$. Модуль вектора скорости: $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$.

**Мгновенное ускорение** точки**,** или ускорение в данный момент времени, является векторной величиной и определяется как производная по времени от вектора скорости точки или как вторая производная от радиус-вектора точки: $\vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}$. Величины $a_x$, $a_y$, $a_z$ проекций вектора ускорения на координатные оси определяются равенствами: $a_x = \frac{dV_x}{dt} = \dot{V}_x = \ddot{x}$;

$a_y = \frac{dV_y}{dt} = \dot{V}_y = \ddot{y}$; $a_z = \frac{dV_z}{dt} = \dot{V}_z = \ddot{z}$. Модуль вектора ускорения: $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$.

**Естественный способ** задания движения используется, если траектория движения точки заранее известна. Тогда положение точки однозначно определяется длиной дуги $\breve{OM} = S(t)$, отсчитываемой от некоторой фиксированной точки *O*, принятой за начало отсчета (рис. 2.2). При этом заранее устанавливаются положительное и отрицательное направления отсчета дуговой координаты.

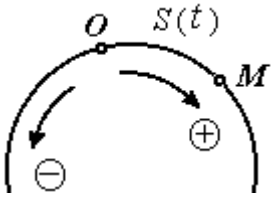


Рис. 2.2. Естественный способ задания движения точки

При естественном способе задания движения вектор скорости точки определяется равенством: $\vec{V} = \dot{S}\vec{\tau} = V_\tau \vec{\tau}$, где $S$ – дуговая координата; $\vec{\tau}$ – единичный вектор касательной к траектории движения, направленный в сторону положительного направления дуговой координаты. Величина $V_\tau = \dot{S}$ называется алгебраической скоростью точки и представляет собой проекцию вектора скорости точки на касательную к траектории.

Вектор ускорения точки $\vec{a}$ раскладывается на составляющие по направлениям естественных осей – касательную (ось $\tau$) и перпендикулярную к ней нормальную (ось *n*):

$$\vec{a} = a_\tau \vec{\tau} + a_n \vec{n} \text{ или } \vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n,$$

где $\vec{\tau}$ – единичный направляющий вектор касательной; $\vec{n}$ – единичный направляющий вектор нормали траектории; $a_\tau$ – проекция ускорения точки на касательную называется **касательным ускорением**; $a_n$ – проекция вектора ускорения точки на нормаль называется **нормальным ускорением** (рис. 2.3). Касательная составляющая ускорения характеризует изменение величины скорости точки, нормальная – изменение направления вектора скорости.

Если проекции $V_\tau$ и $a_\tau$ имеют одинаковые знаки (направлены в одну сторону), движение будет ускоренным, если разных знаков (разнонаправлены) – замедленным (см. рис. 2.3, *a*, *b*).

Проекции ускорения на естественные оси и модуль вектора ускорения вычисляются по формулам:

$$a_\tau = \ddot{S} = \dot{V}_\tau,\ a_n = \frac{V^2}{\rho};$$

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2},$$

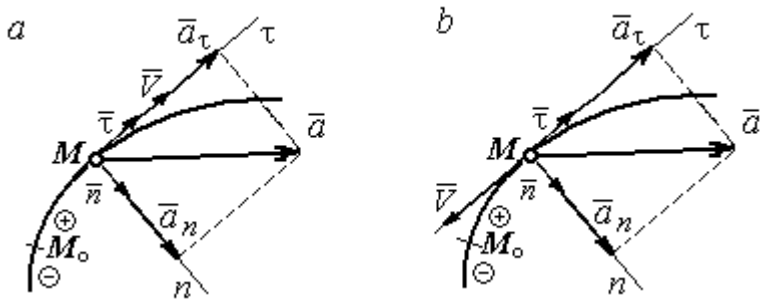



Рис. 2.3. Скорость и ускорение точки. Разложение ускорения на нормальную и касательную составляющие:
*a* – ускоренное движение; *b* – замедленное движение

где $\rho$ – радиус кривизны траектории. Иногда при вычислении касательной составляющей ускорения удобнее пользоваться формулой $a_\tau = \dfrac{a_x V_x + a_y V_y}{V_\tau}$.

Вектор нормальной составляющей ускорения $\vec{a}_n$ всегда направлен к центру кривизны траектории. Вектор касательной составляющей ускорения $\vec{a}_\tau$ направлен в сторону положительного направления касательной (по направлению единичного вектора $\vec{\tau}$), если $\ddot{S} > 0$, и в противоположную сторону – при $\ddot{S} < 0$.

Криволинейное движение точки называется **равномерным**, если проекция вектора скорости на касательную – постоянная величина: $V_\tau$ = const.

Криволинейное движение точки называется **равнопеременным**, если постоянна проекция вектора ускорения на касательную: $a_\tau$ = const.

### Примеры решения задач на криволинейное движение точки

**Задача 20.** Движение точки задано координатным способом уравнениями $x(t) = 2\sin\pi t$, $y(t) = \cos 2\pi t$, где *x*, *y* – в сантиметрах, *t* – в секундах.

Найти траекторию точки, величину и направление скорости и ускорения в моменты времени $t_1$ = 0,25 с, $t_2$ = 0,75 с. Определить участки ускоренного и замедленного движений точки.

*Решение*

Определяем траекторию точки. Из уравнений движения находим $y = \cos 2\pi t = \cos^2 \pi t - \sin^2 \pi t = 1 - 2\sin^2 \pi t = 1 - \frac{x^2}{2}$. Траекторией точки является парабола $y = 1 - \frac{x^2}{2}$ (рис. 2.4). Однако не вся парабола будет траекторией движения, а только та её часть, точки которой согласно уравнениям движения удовлетворяют неравенствам: $-2 \le x \le 2$, $-1 \le y \le 1$.

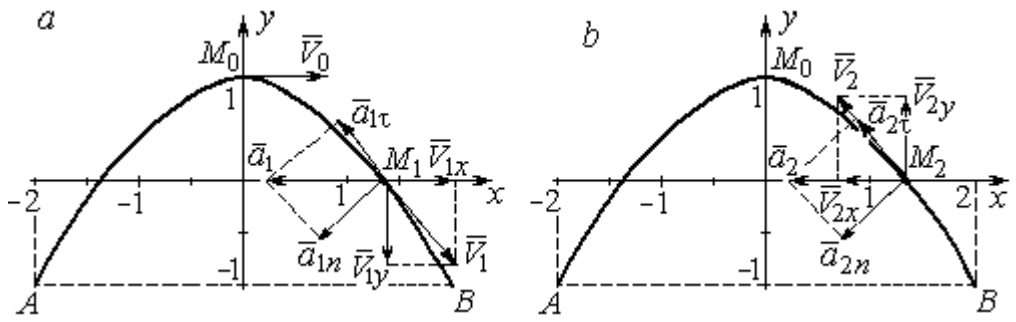



Рис. 2.4. Траектория движения точки:

*a* – замедленное движение точки на участке от $M_0$ к *B*;
*b* – ускоренное движение точки на участке от *B* к $M_0$

Определяем параметры движения точки в момент времени $t_1$ = 0,25 с.

Находим координаты $x_1$, $y_1$ положения точки $M_1$:

$$x_1 = x(0{,}25) = 2\sin\frac{\pi}{4} = \sqrt{2} \text{ см}, \quad y_1 = y(0{,}25) = \cos\frac{\pi}{2} = 0.$$

Находим проекции $V_{1x}$, $V_{1y}$ вектора $\vec{V}_1$ скорости точки на оси системы координат:

$$V_x(t) = \dot{x} = 2\pi\cos\pi t; \; V_y(t) = \dot{y} = -2\pi\sin 2\pi t;$$

$$V_{1x} = V_x(0{,}25) = 2\pi\cos\frac{\pi}{4} = \pi\sqrt{2} \text{ см/с}; \quad V_{1y} = V_y(0{,}25) = -2\pi\sin\frac{\pi}{2} = -2\pi \text{ см/с}.$$

Модуль скорости $V_1 = \sqrt{V_{1x}^2 + V_{1y}^2} = \pi\sqrt{6}$ см/с.

Находим проекции $a_{1x}$, $a_{1y}$ вектора $\vec{a}_1$ ускорения точки на оси системы координат:

$$a_x(t) = \dot{V}_x = -2\pi^2 \sin \pi t\,;\; a_y(t) = \dot{V}_y = -4\pi^2 \cos 2\pi t\,;$$

$$a_{1x} = a_x(0{,}25) = -2\pi^2 \sin\frac{\pi}{4} = -\pi^2\sqrt{2} \text{ см/с}^2;\; a_{1y} = a_y(0{,}25) = -4\pi^2 \cos\frac{\pi}{2} = 0.$$

Модуль вектора ускорения $a_1 = \sqrt{a_{1x}^2 + a_{1y}^2} = \pi^2\sqrt{2}$ см/с.

Положение точки $M_1$ в момент времени $t_1 = 0{,}25$ с, построение векторов скорости $\vec{V}_1$ и ускорения $\vec{a}_1$ по их проекциям показано на рис. 2.4, *а*.

Для того чтобы определить характер движения точки в положении $M_1$ – ускоренное или замедленное, найдём направление касательного ускорения. С этой целью разложим известный уже вектор ускорения $\vec{a}_1$ на нормальную и касательную составляющие согласно равенству $\vec{a}_1 = \vec{a}_{1\tau} + \vec{a}_{1n}$. При этом направление касательной совпадает с направлением вектора скорости $\vec{V}_1$, а направление нормали – перпендикулярно ему. Касательное ускорение $\vec{a}_{1\tau}$ оказалось направленным противоположно вектору скорости $\vec{V}_1$ (см. рис. 2.4, *а*). Следовательно, точка в рассматриваемый момент движется замедленно.

В момент времени $t_2 = 0{,}75$ с положение $M_2$ совпадает с положением $M_1$:

$$x_2 = x(0{,}75) = 2\sin\frac{3\pi}{4} = \sqrt{2} \text{ см};\; y_2 = y(0{,}75) = \cos 2\pi\frac{3}{4} = 0.$$

Проекции векторов скорости $\vec{V}_2$ и ускорения $\vec{a}_2$ точки на оси координат:

$$V_{2x} = V_x(0{,}75) = 2\pi\cos\frac{3\pi}{4} = -\pi\sqrt{2} \text{ см/с};\; V_{2y} = V_y(0{,}75) = -2\pi\sin 2\pi\frac{3}{4} = 2\pi \text{ см/с};$$

$$a_{2x} = a_x(0{,}75) = -2\pi^2 \sin\frac{3\pi}{4} = -\pi^2\sqrt{2} \text{ см/с}^2;\; a_{2y} = a_y(0{,}75) = -4\pi^2 \cos 2\pi\frac{3}{4} = 0.$$

Модули скорости и ускорения точки в момент времени $t_2 = 0{,}75$ с:

$$V_2 = \sqrt{V_{2x}^2 + V_{2y}^2} = \pi\sqrt{6} \text{ см/с};\;\; a_2 = |a_{2x}| = \pi^2\sqrt{2} \text{ см/с}^2.$$

Положение точки $M_2$ в момент времени $t_2$ = 0,75 с, построение векторов скорости $\vec{V}_2$ и ускорения $\vec{a}_2$ по их проекциям, а также разложение вектора ускорения $\vec{a}_2$ на составляющие $\vec{a}_{2n}$ и $\vec{a}_{2\tau}$ показано на рис. 2.4, *b*. В данном случае вектор касательного ускорения совпадает по направлению с вектором скорости (см. рис. 2.4, *b*), поэтому движение ускоренное.

В целом движение точки по траектории происходит следующим образом. Из начального положения $M_0$ ($t_0$ = 0) точка с замедлением перемещается по правой ветви параболы. Достигнув положения *B* на траектории ($t_B$ = 0,5 с), точка совершает мгновенную остановку и начинает обратное ускоренное движение. Достигнув положения $M_0$ ($t_{M_0}$ = 1 с), точка переходит на левую часть параболы, где движется аналогично.

**Задача 21.** Рудничный поезд выходит на закруглённый участок пути радиуса *R* = 1 км с начальной скоростью 54 км/ч. Считая движение поезда равнопеременным, определить его скорость и ускорение в конце 10-й секунды движения по закруглённому участку, если за это время поезд прошёл путь 500 м.

*Решение*

Примем за начало отсчёта расстояния точку $M_0$, где поезд выходит на закруглённый участок пути (рис. 2.5). Предположим, движение поезда равноускоренное и происходит в сторону возрастания дуговой координаты *S*. В этом случае вектор скорости и вектор касательного ускорения направлены в положительную сторону касательной.

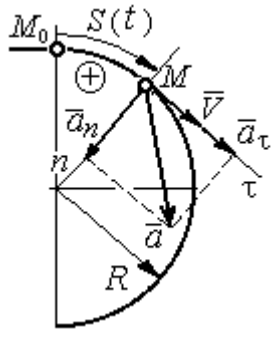


Рис. 2.5. Скорость и ускорение поезда

При равнопеременном движении проекция вектора ускорения на касательную постоянна: $a_\tau$ = const. Так как $a_\tau = \dfrac{dV_\tau}{dt}$, то $V_\tau = a_\tau t + C_1$, где $V_\tau$ – проекция вектора скорости на касательную ось. Далее, поскольку $V_\tau = \dfrac{dS}{dt}$, имеем

$S = \frac{a_\tau t^2}{2} + C_1 t + C_2$. Константы интегрирования $C_1$ и $C_2$ находятся из начальных условий: при $t = 0$ $S = 0$ и $V_\tau = V_0 = = 54$ км/ч = 15 м/с. Подставив эти условия в уравнения движения, найдём константы интегрирования: $C_1 = 15$ м/с; $C_2 = 0$.

В результате получена система уравнений:

$$V_\tau = a_\tau t + 15; \quad S = \frac{a_\tau t^2}{2} + 15t .$$

По условию задачи через 10 с от начала движения по закруглённому участку поезд прошёл по дуге путь $S = 500$ м. Подставляя это условие во второе уравнение, получим $a_\tau = 7$ м/с$^2$. Скорость поезда в конце пройденного пути с учётом известной величины касательного ускорения найдём из первого уравнения $V_\tau = 85$ м/с. Следует заметить, что при указанном движении поезда проекция вектора скорости на касательную ось положительна и равна его модулю: $V_\tau = V$.

Нормальное ускорение поезда при движении по дуге окружности радиуса $R = 1000$ м в момент времени $t = 10$ с равно $a_n = \frac{V_\tau^2}{R} = 7{,}23$ м/с$^2$. Величина (модуль) полного ускорения поезда $a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2} = 10{,}06$ м/с$^2$. Разложение вектора ускорения поезда на нормальную и касательную составляющие показано на рис. 2.5.

**Задача 22.** Вагонетка движется равнопеременно по дуге окружности радиуса $R = 80$ м. За время движения скорость вагонетки изменилась от начальной $V_0 = 18$ км/ч до конечной $V_1 = 9$ км/ч.

Определить характер движения – ускоренное или замедленное. Найти ускорение вагонетки в начале и в конце участка движения, если за это время она прошла путь $S = 60$ м.

*Решение*

Выберем некоторую точку на траектории в качестве начальной, а направление положительного отсчёта расстояний – в сторону движения вагонетки.

Уравнения равнопеременного движения точки при начальных условиях: $t = 0$; $S = 0$ и $V_\tau = V_0 = 5$ м/с имеют вид:

$$V_\tau = 5 + a_\tau t\,;\;\; S = 5t + \frac{a_\tau t^2}{2}.$$

Подставим в уравнения параметры движения в момент времени $t = t_1$, когда скорость вагонетки стала $V_{1\tau} = 2{,}5$ м/с, а пройденный ею путь составил 60 м. Получим систему:

$$-2{,}5 = a_\tau t_1;\;\; 60 = 5t_1 + \frac{a_\tau t_1^2}{2},$$

откуда найдём касательное ускорение: $a_\tau = -0{,}16$ м/с$^2$.

Отрицательная величина означает, что вектор касательного ускорения направлен в сторону, противоположную направлению вектора скорости, и движение равнозамедленное.

Нормальное ускорение вагонетки в начале движения $a_{n0} = \frac{V_0^2}{R} = 0{,}31$ м/с$^2$.

Полное ускорение $a_0 = \sqrt{a_{n0}^2 + a_\tau^2} = 0{,}35$ м/с$^2$. В конце движения нормальное ускорение $a_{n1} = \frac{V_1^2}{R} = 0{,}08$ м/с$^2$. Полное ускорение $a_1 = \sqrt{a_{n1}^2 + a_\tau^2} = 0{,}18$ м/с$^2$.

## 2.2. Поступательное движение и вращение твердого тела вокруг неподвижной оси

Движение твёрдого тела называется **поступательным**, если любой прямолинейный отрезок, связанный с телом, остаётся в процессе движения параллельным самому себе. При **поступательном** движении твёрдого тела все его точки движутся по одинаковым траекториям, имеют равные скорости и ускорения.

**Вращением** твёрдого тела вокруг неподвижной оси называется такое его движение, при котором две точки тела остаются неподвижными в течение всего времени движения. Прямая, проходящая через неподвижные точки, называется **осью вращения** тела.

Положение вращающегося тела определяется углом поворота $\varphi = \varphi(t)$ относительно какой-либо системы отсчёта, например, относительно неподвижной плоскости, проходящей через ось вращения.

**Вектор угловой скорости** вращения тела $\vec{\omega}$ лежит на оси вращения и направлен в сторону, откуда вращение тела видно против хода часовой стрелки. **Алгебраическим значением угловой скорости** вращения тела называют проекцию вектора угловой скорости на ось вращения (ось $z$) $\omega_z = \dot{\varphi}$. При $\dot{\varphi} > 0$ тело вращается в сторону положительного направления отсчёта угла $\varphi$, при $\dot{\varphi} < 0$ – в обратную сторону. Направление угловой скорости обычно показывают дуговой стрелкой вокруг оси вращения. Модуль алгебраического значения угловой скорости вращения тела называется угловой скоростью $\omega = |\omega_z| = |\dot{\varphi}|$.

Алгебраическим значением **углового ускорения** вращающегося тела называют проекцию вектора углового ускорения на ось вращения (ось $z$) $\varepsilon_z = \dot{\omega}_z = \ddot{\varphi}$. Модуль алгебраического значения углового ускорения вращения тела называется угловым ускорением: $\varepsilon = |\varepsilon_z| = |\dot{\omega}_z| = |\ddot{\varphi}|$.

Вектор углового ускорения направлен вдоль оси вращения. Если $\varepsilon_z \omega_z > 0$ (вектора угловой скорости и углового ускорения сонаправлены), движение ускоренное, если $\varepsilon_z \omega_z < 0$ (векторы угловой скорости и углового ускорения противоположны по направлению), – замедленное.

При равномерном вращении угловая скорость тела (алгебраическое значение) – постоянная величина: $\omega_z$ = const. Угол поворота тела изменяется по линейному закону $\varphi = \varphi_0 + \omega_z t$, где $\varphi_0$ – начальный угол поворота тела.

При равнопеременном вращении постоянной величиной является алгебраическое значение углового ускорения: $\varepsilon_z$ = const. В этом случае справедливы уравнения движения: $\omega_z = \omega_{z0} + \varepsilon_z t$; $\varphi = \varphi_0 + \omega_{z0} t + \dfrac{\varepsilon_z t^2}{2}$.

При вращательном движении тела все его точки движутся по окружностям, радиусы которых равны расстояниям от выбранной точки до неподвижной оси. **Скорость точки** вращающегося твердого тела **(**в отличие от угловой скорости тела) называют **линейной,** или **окружной скоростью** точки. Модуль скорости точки рассчитывается по формуле: $V = \omega h$, где $\omega$ – угловая скорость тела; $h$ – расстояние от точки до оси вращения. Вектор скорости направлен по касательной к описываемой точкой окружности в сторону вращения тела.

При вращении тела отношение скоростей двух точек тела равно отношению расстояний от этих точек до оси вращения: $\dfrac{V_{M_1}}{V_{M_2}} = \dfrac{h_1}{h_2}$ (рис. 2.6).

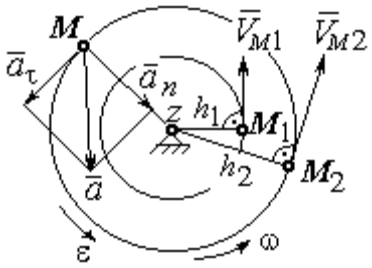


Рис. 2.6. Скорость и ускорение точек вращающегося тела

**Ускорение точки вращающегося твердого тела** рассчитывается как ускорение точки при естественном способе задания движения в виде суммы векторов касательного и нормального ускорений (см. рис. 2.6): $\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n$, где модули векторов $a_\tau = \varepsilon h$, $a_n = \omega^2 h$; $a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}$; $\omega$, $\varepsilon$ – угловая скорость и угловое ускорение тела, $\varepsilon = |\varepsilon_z|$; $h$ – расстояние от точки до оси вращения. **Вектор касательного ускорения точки** $\vec{a}_\tau$ направлен по касательной к описываемой точкой окружности в сторону движения точки, если вращение тела ускоренное, и в противоположную сторону, если движение тела замедленное. **Вектор нормального ускорения точки** $\vec{a}_n$ направлен вдоль радиуса описываемой точкой окружности к её центру.

При **передаче вращения** одного тела другому без проскальзывания соотношения между угловыми скоростями и угловыми ускорениями выражаются из равенства скоростей и касательных ускорений в точке контакта: $\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_2}{r_1}$; $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{r_2}{r_1}$ (рис. 2.7).

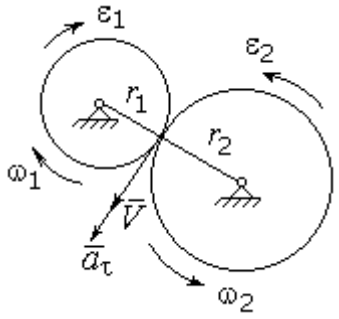


Рис. 2.7. Передача вращения одного тела другому

## Примеры решения задач на вращательное движение тел

**Задача 23.** Вал, начиная вращаться равноускоренно из состояния покоя, за первые 2 мин. сделал 3600 оборотов. Определить угловую скорость вала в конце 2-й минуты и угловое ускорение вала.

*Решение*

Допустим, вращение вала вокруг оси $z$ происходит в сторону положительного направления отсчёта угла. Тогда алгебраические значения угловой скорости и углового ускорения равны модулям соответствующих векторов $\omega_z = \omega$; $\varepsilon_z = \varepsilon$.

Воспользуемся уравнениями равнопеременного вращения вала с нулевыми начальными условиями (начальный угол поворота $\varphi_0 = 0$ и начальная угловая скорость вала $\omega_0 = 0$). Имеем $\omega = \varepsilon t$; $\varphi = \frac{\varepsilon t^2}{2}$.

Подставим в уравнения параметры движения вала в момент времени $t = t_1$ = 2 мин = 120 с; $\varphi_1$ = 3600 об = $7200\pi$ рад. Получим систему:

$$\omega_1 = \varepsilon \cdot 120, \quad 7200\pi = \frac{\varepsilon \cdot 120^2}{2}, \text{ откуда } \varepsilon = \pi \text{ с}^{-2}; \quad \omega_1 = 120\pi \text{ с}^{-1}.$$

**Задача 24.** В механизме стрелочного индикатора (рис. 2.8) движение от рейки мерительного штифта 1 передаётся шестерне 2, скреплённой на одной оси с зубчатым колесом 3. Колесо 3 сцепляется, в свою очередь, с шестернёй 4, несущей стрелку-индикатор. Определить угловую скорость стрелки, если движение штифта задаётся уравнением $x = 4\sin\pi t$ и радиусы зубчатых колёс: $r_2$ = 6 см, $r_3$ = 10 см, $r_4$ = 4 см.

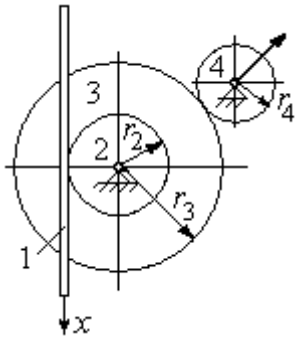


Рис. 2.8. Механизм стрелочного индикатора

*Решение*

Мерительный штифт движется поступательно вдоль оси *x* (см. рис. 2.8). Проекция скорости любой точки штифта на ось *x* $V_{1x} = \dot{x} = 4\pi\cos\pi t$ см/с. Такую же скорость имеет и точка касания штифта с шестернёй 2.

Полагая, что точка касания штифта с шестернёй 2 принадлежит и шестерне, найдём алгебраическое значение угловой скорости шестерни 2: $\omega_{2z} = \dfrac{V_{1x}}{r_2} = \dfrac{4\pi\cos\pi t}{6} = \dfrac{2\pi}{3}\cos\pi t$ рад/с. Зубчатое колесо 3 скреплено с шестернёй 2 на одной оси и имеет ту же угловую скорость $\omega_{3z} = \omega_{2z}$. Вращение колеса 3 через точку зацепления передаётся шестерне 4. Выразим соотношение между алгебраическими значениями угловых скоростей при передаче вращения одного тела другому: $\dfrac{\omega_{3z}}{\omega_{4z}} = \dfrac{r_4}{r_3}$. Отсюда получим: $\omega_{4z} = \dfrac{V_{1x} r_3}{r_2 r_4} = \dfrac{5\pi}{3}\cos\pi t$ с$^{-1}$. Угловая скорость стрелки равна угловой скорости шестерни 4.

**Задача 25.** Ведущее колесо 1 подъёмного устройства (рис. 2.9) передаёт движение шестерне 2. На одной оси с шестернёй 2 расположен шкив 3, жёстко скреплённый с

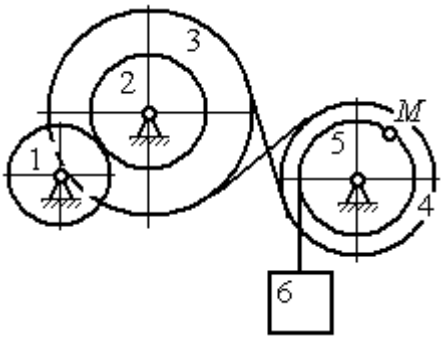


Рис. 2.9. Схема механизма подъёмного устройства

шестернёй. Шкив 3 соединяется со шкивом 4 бесконечным перекрёстным ремнём. Барабан 5 скреплён со шкивом 4 и находится с ним на одной оси. На барабан намотана нить, удерживающая груз 6. По заданному уравнению движения колеса 1 определить скорость, нормальное, касательное и полное ускорения точки $M$ на ободе барабана 5 в момент времени $t_1 = 1$ с, а также скорость и ускорение груза 6. Скольжение между звеньями механизма отсутствует.

Значения радиусов колёса, шкивов и барабана механизма: $r_1 = 20$ см, $r_2 = 10$ см, $r_3 = 40$ см, $r_4 = 16$ см, $r_5 = 8$ см. Уравнение вращения колеса 1: $\varphi_1 = 2t^2 - 5t$ рад.

*Решение*

Ведущим звеном в механизме является колесо 1. Выберем положительное направление отсчёта угла поворота колеса 1 в сторону, противоположную направлению вращения часовой стрелки. На рис. 2.10 это направление показано дуговой стрелкой $\varphi_1$.

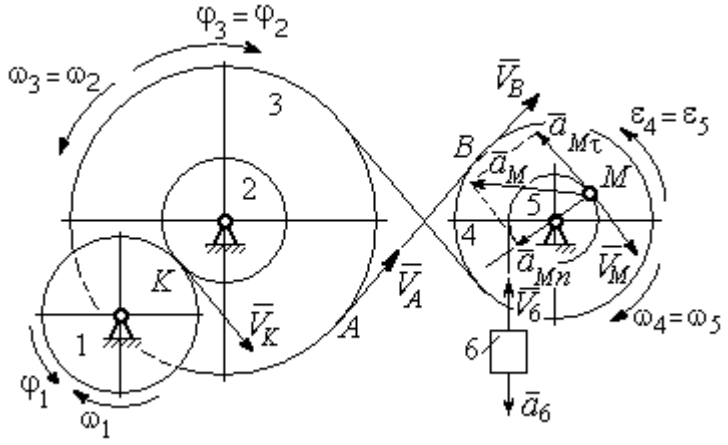


Рис. 2.10. Расчётная схема механизма

Продифференцировав по времени уравнение движения колеса 1, получим алгебраическое значение его угловой скорости: $\omega_{1z} = \dot{\varphi}_1 = 4t - 5$ рад/с. В момент времени $t_1 = 1$ с алгебраическое значение угловой скорости колеса 1 отрицательно: $\dot{\varphi}_1(1) = -1$ рад/с. Это означает, что в данный момент времени колесо 1 вращается в сторону, противоположную положительному направлению отсчёта угла $\varphi_1$. Угловая скорость колеса 1 равна модулю: $\omega_1 = |\omega_{1z}| = 1$ рад/с. Направление угловой скорости $\omega_1$ колеса 1 в момент времени $t_1 = 1$ с показано дуговой стрелкой $\omega_1$.

Вращение колеса 1 передаётся шестерне 2 через точку контакта *K*. Из соотношения $\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_2}{r_1}$ найдём угловую скорость шестерни 2: $\omega_2 = \frac{\omega_1 r_1}{r_2}$. Шкив 3, закреплённый на одной оси с шестернёй 2 имеет такую же угловую скорость, $\omega_3 = \omega_2$. Направление угловых скоростей шестерни 2 и шкива 3 показано на рис. 2.10 дуговой стрелкой $\omega_2$.

Передача движения шкива 3 шкиву 4 производится с помощью ремённой передачи. На участке от точки *A*, где ремень сходит со шкива 3, и до точки *B*, где ремень набегает на шкив 4, ремень движется поступательно, поэтому скорости точек *A* и *B* равны: $V_A = V_B$. Выразив скорости точек через угловые скорости тел, имеем равенство $\omega_3 r_3 = \omega_4 r_4$, откуда с учётом, что $\omega_3 = \omega_2$, найдём угловую скорость шкива 4: $\omega_4 = \frac{\omega_3 r_3}{r_4} = \frac{\omega_1 r_1 r_3}{r_2 r_4}$. Угловая скорость барабана 5 равна угловой скорости шкива 4, $\omega_5 = \omega_4$. Направление угловых скоростей шкива 4 и барабана 5 показано на рис. 2.10 дуговой стрелкой $\omega_4$.

Величина (модуль) скорости точки *M* рассчитывается по формуле: $V_M = \omega_5 r_5$. В момент времени $t_1 = 1$ с $\omega_5 = \frac{\omega_1 r_1 r_3}{r_2 r_4} = 5$ рад/с и $V_M = 20$ см/с. Вектор скорости $\vec{V}_M$ направлен по касательной к ободу барабана в точке *M* и направлен в сторону вращения барабана 5 (см. рис. 2.10).

Нить, несущая груз 6, сматываясь с обода барабана, имеет скорость, равную скорости точек обода барабана, и, следовательно, равна скорости точки *M*: $V_6 = V_M$. Направление скорости груза 6 определяется направлением вращения барабана 5. При $t_1 = 1$с груз поднимается со скоростью $V_6 = 20$ см/с.

Определим ускорение точки *M*. Вектор ускорения точки *M* равен сумме векторов: $\vec{a}_M = \vec{a}_M^{\tau} + \vec{a}_M^{n}$, где $\vec{a}_M^{\tau}$, $\vec{a}_M^{n}$ – касательная и нормальная составляющие ускорения.

Найдём алгебраическое значение угловой скорости барабана 5: $\omega_{5z} = \dfrac{\omega_{1z} r_1 r_3}{r_2 r_4} = 20t - 25$ рад/с. Алгебраическое значение углового ускорения барабана 5 $\varepsilon_{5z}$ равно производной $\varepsilon_{5z} = \dot{\omega}_{5z} = 20$ рад/с$^2$. Так как в момент времени $t_1 = 1$ с знаки алгебраических значений угловой скорости барабана и его углового ускорения разные ($\omega_{5z} = -5$ рад/с $\vec{a}_M = \vec{a}_M^{\tau} + \vec{a}_M^{n}$ $\varepsilon_{5z} = +20$ рад/с$^2$), угловое ускорение (по величине равное модулю $\varepsilon_5 = |\varepsilon_{5z}|$) направлено в сторону, противоположную угловой скорости. На рис. 2.10 направление углового ускорения барабана 5 показано дуговой стрелкой $\varepsilon_5$.

Касательное ускорение точки: $a_{M\tau} = \varepsilon_5 r_5 = 80$ см/с$^2$. Вектор $\vec{a}_{M\tau}$ касательного ускорения точки $M$ направлен по касательной к траектории в точке $M$ в сторону углового ускорения $\varepsilon_5$ (см. рис. 2.10).

Нормальное ускорение точки $M$ рассчитывается как $a_M^n = \omega_5^2 r_5$, где угловая скорость барабана $\omega_5 = |\omega_{5z}|$. В момент времени $t_1 = 1$ с $\omega_5 = 5$ рад/с и величина нормального ускорения: $\vec{a}_M^{\,n} = 100$ см/с$^2$. Вектор нормального ускорения $\vec{a}_M^{\,n}$ направлен по радиусу к центру барабана 5.

Модуль полного ускорения точки $M$ в заданный момент времени: $a_M = \sqrt{(a_M^{\tau})^2 + (a_M^{n})^2} = 128{,}06$ см/с$^2$. Вектор ускорения $\vec{a}_M$ направлен по диагонали прямоугольника, построенного на векторах $\vec{a}_M^{\,n}$ и $\vec{a}_M^{\tau}$ (см. рис. 2.10).

Ускорение $a_6$ груза 6 находится из условия, что груз движется прямолинейно. При прямолинейном движении нормальная составляющая ускорения равна нулю. В результате, ускорение груза 6 $a_6 = a_6^{\tau} = \dot{V}_6 = \dot{V}_M = a_M^{\tau} = \varepsilon_5 r_5 = 80$ см/с$^2$. Направление вектора ускорения груза 6 определяется направлением углового ускорения барабана 5. На рис. 2.10 направление ускорения груза 6 показано вектором $\vec{a}_6$.

**Задача 26.** По заданному уравнению поступательного движения звена 1 механизма (рис. 2.11, *a*) определить скорость, нормальное, касательное и полное ускорения точки *M* диска 3 в момент времени $t_1 = 1$ с, а также скорость и ускорение звена 4. Скольжение между звеньями механизма отсутствует. Значения радиусов колес механизма и закон движения звена 1: $R_2 = 20$ см, $r_2 = 5$ см, $R_3 = 8$ см, $r_3 = 4$ см, $x_1 = \cos\pi t + \sin\pi t$ см.

*Решение*

Звено 1 движется поступательно вдоль оси *x*. Положительное направление движения задаётся направлением оси *x* (рис. 2.11, *a*). Продифференцировав по времени уравнение движения звена 1, получим его алгебраическое значение скорости: $V_{1x}(t) = \dot{x}_1 = -\pi\sin\pi t + \pi\cos\pi t$.

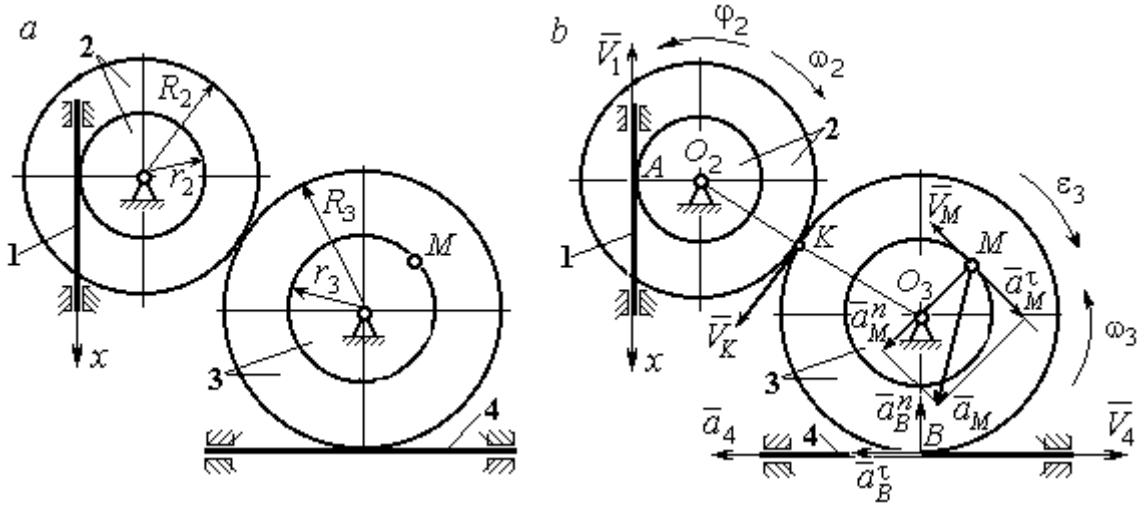



Рис. 2.11. Кинематика поступательного и вращательного движений твердого тела:
*a* – схема механизма; *b* – расчетная схема для определения скоростей
и ускорений точек механизма

В момент времени $t_1 = 1$ с алгебраическое значение скорости звена 1 отрицательное: $V_{1x}(1) = -\pi$ см/с. Это показывает, что в данный момент времени звено 1 движется в сторону, противоположную положительному направлению оси *x*. Скорость звена 1 равна модулю производной $V_1(1) = |\dot{x}_1| = \pi$ см/с. На рис. 2.11, *b* показано направление вектора скорости $\vec{V}_1$.

Точка $A$ соприкосновения звена 1 с диском 2 имеет ту же скорость, что и звено 1. Угловая скорость диска 2 определяется из равенства $\omega_2 = \frac{V_1}{r_2}$ рад/с. Направление угловой скорости вращения диска 2 показано на рис. 2.11, *b* дуговой стрелкой $\omega_2$.

Передача вращения диска 2 диску 3 происходит в точке *K*. Из соотношения $\frac{\omega_3}{\omega_2} = \frac{R_2}{R_3}$ находим угловую скорость диска 3: $\omega_3 = \frac{V_1 R_2}{r_2 R_3} = \frac{\pi}{2}$. Направление угловой скорости диска 3 показано на рис. 2.11, *b* дуговой стрелкой $\omega_3$.

Модуль скорости точки $M$ $V_M = \omega_3 r_3 = 2\pi$ см/с. Вектор скорости $\vec{V}_M$ направлен по касательной к траектории движения точки $M$ в сторону вращения диска 3 (см. рис. 2.11, *b*).

Звено 4 движется поступательно. Величина и направление скорости звена 4 совпадают с величиной и направлением скорости точки $B$ касания звена 4 с диском 3: $V_4 = V_B = \omega_3 R_3$. В момент времени $t_1 = 1$ с $V_4 = 4\pi$ см/с. Направление вектора скорости $\vec{V}_4$ определяется направлением вращения диска 3.

Определим ускорение точки $M$. Найдём алгебраическое значение $\omega_{3z}$ угловой скорости диска 3: $\omega_{3z} = \frac{V_{1x} R_2}{r_2 R_3} = \frac{\pi}{2}(-\sin\pi t + \cos\pi t)$. Алгебраическое значение $\varepsilon_{3z}$ углового ускорения диска 3: $\varepsilon_{3z} = \dot{\omega}_{3z} = -\frac{\pi^2}{2}(\cos\pi t + \sin\pi t)$ и в момент времени $t_1 = 1$ с $\varepsilon_{3z} = \frac{\pi^2}{2}$. Разные знаки алгебраических значений угловой скорости и углового ускорения диска 3 $(\omega_{3z} = -\frac{\pi}{2}; \varepsilon_{3z} = +\frac{\pi^2}{2})$ показывают, что угловое ускорение направлено в сторону, противоположную угловой скорости. На рис 2.11, *b* направление углового ускорения диска 3 показано дуговой стрелкой $\varepsilon_3$.

Касательное ускорение точки $M$ рассчитывается по формуле $a_M^\tau = \varepsilon_3 r_3$, где угловое ускорение $\varepsilon_3 = |\varepsilon_{3z}|$. В момент времени $t_1 = 1$ с $a_M^\tau = 2\pi^2$ см/с$^2$. Вектор касательного ускорения точки $M$ $\vec{a}_M^\tau$ направлен по касательной к траектории точки $M$ в сторону углового ускорения $\varepsilon_3$ (см. рис. 2.11, *b*).

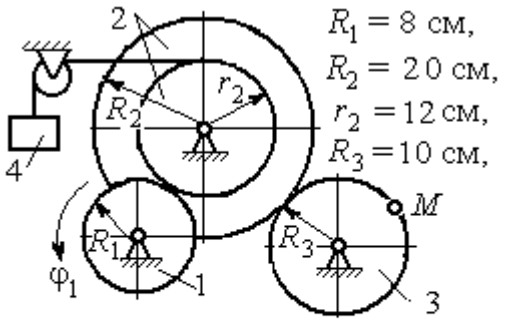
Нормальное ускорение точки $M$ рассчитывается как $a_M^n = \omega_3^2 r_3$. В момент времени $t_1 = 1$ с величина нормального ускорения $a_M^n = \pi^2$ см/с$^2$. Вектор нормального ускорения $\vec{a}_M^n$ направлен по радиусу к центру диска 3.

Модуль полного ускорения точки $M$: $a_M = \sqrt{(a_M^n)^2 + (a_M^\tau)^2} = \pi^2\sqrt{5}$ см/с$^2$. Вектор полного ускорения $\vec{a}_M$ направлен по диагонали прямоугольника, построенного на векторах $\vec{a}_M^n$ и $\vec{a}_M^\tau$.

Звено 4 движется поступательно и прямолинейно. Ускорение звена 4 равно проекции ускорения точки $B$ (касания диска 3 со звеном 4) на линию движения звена 4: $a_4 = a_B^\tau = \varepsilon_3 R_3 = 4\pi^2$ см/с$^2$. Направление ускорения звена 4 совпадает с касательным ускорением точки $B$.

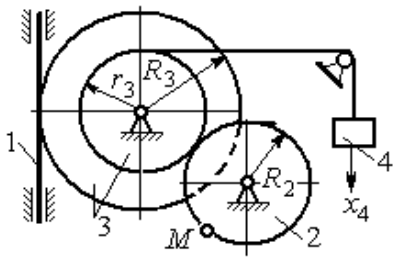
## Упражнения

Упражнение 2.1




$\varphi_1 = 3t + 2\sin\frac{\pi t}{2}$ рад,
Найти скорость и ускорение точки $M$ и груза 4 в момент $t = 1$ с

Упражнение 2.2




$R_2 = 0{,}2$ м, $R_3 = 0{,}4$ м, $r_3 = 0{,}3$ м,
$x_4 = t - 1 - \sin\frac{\pi t}{3} + \cos\frac{\pi t}{3}$ м.
Найти скорость и ускорение точки $M$ и звена 1 в момент $t = t_1 = 3$ с.

Рис. 2.12. Задания для самостоятельного решения. Упражнения 2.1, 2.2

## 2.3. Скорости точек при плоскопараллельном движении твёрдого тела

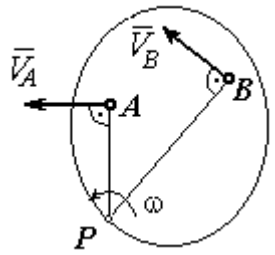
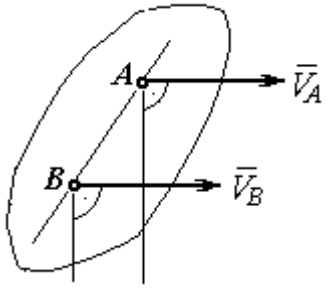
**Плоскопараллельным,** или плоским движением твердого тела, называется такое движение, при котором все точки тела движутся параллельно некоторой неподвижной (основной) плоскости.

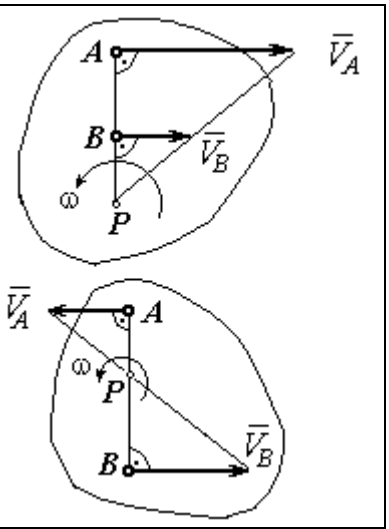
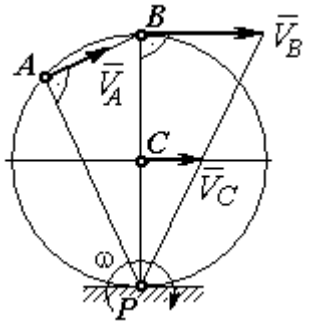
Для скоростей $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_M$ двух точек $A$ и $M$ тела, совершающего плоское движение, справедливо утверждение: **проекции скоростей двух точек твердого тела на ось, проходящую через эти точки, равны друг другу:** $V_A\cos\alpha = V_M\cos\beta$, где $\alpha$, $\beta$ – углы между векторами скорости $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_M$ и осью, проходящей через точки $A$ и $M$.

**Мгновенным центром скоростей** (МЦС) называется точка $P$ плоской фигуры, скорость которой в данный момент времени равна нулю. При известном положении МЦС скорость любой точки плоской фигуры находят так, как если бы движение фигуры было мгновенно вращательным вокруг мгновенного центра скоростей с угловой скоростью, равной угловой скорости плоской фигуры. Способы построения мгновенного центра скоростей приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

**Способы построения мгновенного центра скоростей**

| | |
|---|---|
| 1. Если известны направления скоростей $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_B$ каких-нибудь двух точек $A$ и $B$ плоской фигуры, то мгновенный центр скоростей $P$ находится в точке пересечения перпендикуляров, восстановленных из этих точек к векторам скоростей. |  |
| 2. Если скорости двух точек $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_B$ параллельны, но точки $A$ и $B$ не лежат на общем перпендикуляре к скоростям, то, как видно из рисунка, мгновенный центр $P$ бесконечно удалён. В этом случае угловая скорость $\omega = 0$ и тело в данный момент движется поступательно (движение является мгновенным поступательным). При таком движении скорость любой точки тела равна $\vec{V}_A$. |  |

| | |
|---|---|
| 3. Если скорости двух точек $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_B$ параллельны, а точки $A$ и $B$ лежат на общем перпендикуляре к скоростям, то мгновенный центр скоростей $P$ находится как пересечение прямой, соединяющей точки $A$ и $B$ и линии, проходящей через концы векторов, изображающих скорости $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_B$. |  |
| 4. Если плоскопараллельное движение осуществляется путем качения без скольжения одного тела по неподвижной поверхности другого, то мгновенный центр скоростей $P$ расположен в точке касания катящегося тела с неподвижной поверхностью. |  |

**Примеры решения задач на плоскопараллельное движение тела**

**Задача 27.** Приводной механизм насоса находится в положении, показанном на рис. 2.13. Кривошип $O_1C$ вращается с постоянной угловой скоростью $\omega_{O_1C}$ = 2 рад/с вокруг оси, проходящей через точку $O_1$ перпендикулярно плоскости чертежа. Определить скорость поршня $D$ и угловые скорости шатуна $BC$, коромысла $AB$ и штока $AD$, если $O_1C$ = 20 см, $OB = 2 \cdot OA$ = 40 см, $AD$ = 60 см.

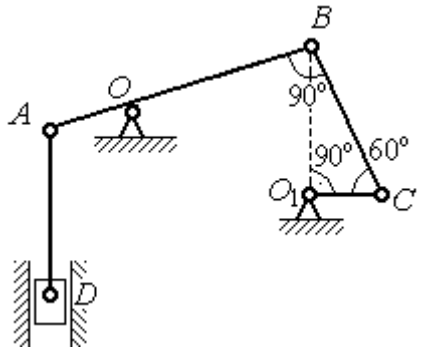



Рис. 2.13. Приводной механизм насоса

*Решение*

Предположим для определённости, что кривошип $O_1C$ вращается в направлении по ходу часовой стрелки. Вектор $\vec{V}_C$ скорости точки $C$ направлен

перпендикулярно кривошипу $O_1C$, в сторону его вращения (рис. 2.14). Модуль скорости $V_C = \omega_{O_1C} \cdot O_1C = 40$ см/с.

Коромысло $AB$ качается (вращается) вокруг оси, проходящей через точку $O$, параллельно оси вращения кривошипа. Скорость точки $B$ направлена перпендикулярно коромыслу $AB$ вдоль шатуна $BC$ (рис. 2.14).

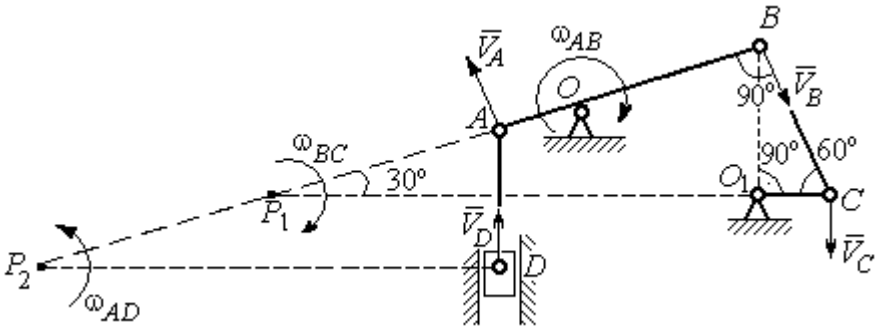


Рис. 2.14. Расчётная кинематическая схема механизма привода насоса

Шатун $BC$ совершает плоскопараллельное движение. Мгновенный центр скоростей шатуна $P_1$ расположен в точке пересечения перпендикуляров к скоростям $\vec{V}_C$ и $\vec{V}_B$ точек $C$ и $B$ шатуна. Находим $P_1C = 4O_1C = 80$ см. Угловая скорость вращения шатуна $BC$ $\omega_{BC} = \dfrac{V_C}{CP_1} = 0{,}5$ рад/с. Направление угловой скорости вращения шатуна $BC$ определяется направлением вращения кривошипа $O_1C$ и на рис. 2.14 показано дуговой стрелкой $\omega_{BC}$.

Скорость $V_B$ найдём по теореме о проекциях скоростей. Спроектируем вектора скоростей $\vec{V}_C$ и $\vec{V}_B$ точек $C$ и $B$ на линию $BC$. Получим $V_B \cos 0^\circ = V_C \cos 30^\circ$. Отсюда $V_B = 20\sqrt{3}$ см/с.

Угловая скорость коромысла $AB$ $\omega_{AB} = \dfrac{V_B}{OB} = \dfrac{\sqrt{3}}{2}$ рад/с. Направление угловой скорости коромысла определяется направлением вектора скорости $\vec{V}_B$ и показано дуговой стрелкой $\omega_{AB}$.

Скорость точки $A$ коромысла равна половине скорости точки $B$: $V_A = \frac{1}{2}V_B$ = $10\sqrt{3}$ см/с. Вектор скорости $\vec{V}_A$ направлен перпендикулярно коромыслу $AB$ в сторону его вращения.

Точка $P_2$ пересечения перпендикуляров к скоростям $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_D$ является мгновенным центром скоростей штока $AD$. Тогда угловая скорость штока $\omega_{AD} = \frac{V_A}{AP_2} = \frac{\sqrt{3}}{12}$ рад/с. Направление угловой скорости штока определяется по направлению скорости точки $A$ и на рис. 2.14 показано дуговой стрелкой $\omega_{AD}$.

Скорость поршня $V_D = \omega_{AD} \cdot P_2D = 15$ см/с.

**Задача 28.** Механизм качалки (рис. 2.15) состоит из кривошипа $OA$, вращающегося вокруг оси $O$ и несущего в точке $A$ ось подвижной шестерни 2, которая катится по неподвижной шестерне 1. Вращение кривошипа происходит с угловой скоростью $\omega_{OA} = 2$ рад/с. Радиусы шестерён $r_1 = r_2 = 6$ см. К ободу шестерни 2 в точке $B$ шарнирно прикреплён шатун $BC$ длиной $BC = 8$ см, который в точке $C$ передаёт движение коромыслу $CO_1$ длиной $CO_1 = 16$ см.

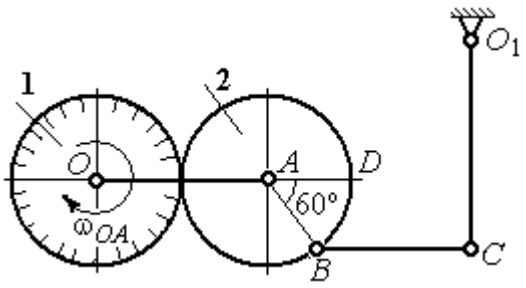


Рис. 2.15. Схема механизма качалки

Определить угловые скорости шестерни 2, шатуна $BC$, коромысла $CO_1$, а также скорости точек $A$, $B$, $C$, $D$ в момент, когда кривошип $OA$ и шатун $BC$ горизонтальны и угол $\angle DAB = 60^\circ$.

*Решение*

Найдём скорость точки $A$ кривошипа: $V_A = \omega_{OA} \cdot OA = 24$ см/с. Вектор скорости точки $\vec{V}_A$ расположен перпендикулярно кривошипу $OA$ и направлен в сторону вращения кривошипа (рис. 2.16).

Мгновенный центр скоростей $P_2$ шестерни 2 находится в точке касания с неподвижной поверхностью шестерни 1. Угловая скорость шестерни 2 $\omega_2 = \dfrac{V_A}{AP_2}$ = 4 рад/с. Направление угловой скорости шестерни 2 определяется направлением вектора скорости $\vec{V}_A$ и на рис. 2.16 показано дуговой стрелкой $\omega_2$.

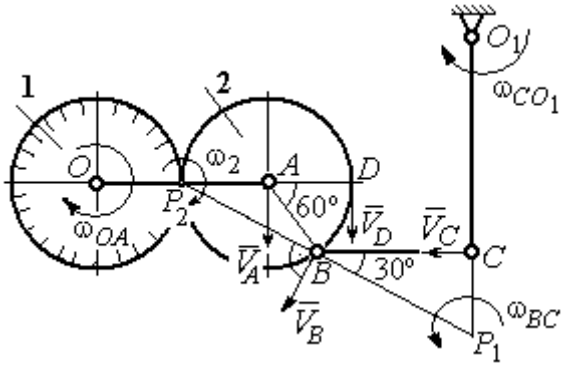


Рис.2.16. Расчётная кинематическая схема механизма качалки

Найдём расстояние $P_2B$ из равнобедренного треугольника $P_2AB$ по теореме косинусов: $P_2B = \sqrt{r^2 + r^2 - 2r^2\cos 120^\circ}$ = $6\sqrt{3}$ см. Скорость точки $B$ $V_B = \omega_2 \cdot P_2B$ = $24\sqrt{3}$ см/с. Вектор скорости $\vec{V}_B$ перпендикулярен линии $P_2B$ и направлен в сторону вращения шестерни 2.

Скорость точки $D$: $V_D = \omega_2 \cdot P_2D$ = 48 см/с. Вектор скорости $\vec{V}_D$ перпендикулярен линии $P_2D$ и направлен в ту же сторону (см. рис. 2.16).

Скорость точки $C$ перпендикулярна линии $CO_1$. Восстанавливая перпендикуляры к скоростям $\vec{V}_B$ и $\vec{V}_C$, получим точку пересечения $P_1$, которая будет мгновенным центром скоростей шатуна $BC$. Расстояние $P_1B = \dfrac{BC}{\cos 30^\circ}$ = $\dfrac{16}{\sqrt{3}}$ см. Угловая скорость шатуна $\omega_{BC} = \dfrac{V_B}{P_1B}$ = $\dfrac{9}{2}$ рад/с. Направление угловой скорости определяется по направлению скорости $\vec{V}_B$ и показано дуговой стрелкой $\omega_{BC}$.

Скорость точки $C$: $V_C = \omega_{BC} \cdot P_1C$ = $\dfrac{36}{\sqrt{3}}$ см/с. Направление вектора скорости определяется направлением вращения шатуна $BC$.

Угловая скорость коромысла $CO_1$: $\omega_{CO_1} = \dfrac{V_C}{O_1C}$ = $\dfrac{9}{4\sqrt{3}}$ рад/с.

**Задача 29.** В планетарном механизме (рис. 2.17) кривошип *OA* длиной *OA* = 25 см вращается вокруг неподвижной оси *O*, перпендикулярной плоскости рисунка, с угловой скоростью $\omega_{OA}$ = 3,6 рад/с. На конец *A* кривошипа насажена шестерёнка 2, находящаяся во внутреннем зацеплении с колесом 1 радиуса $r_1$ = 45 см, соосным с кривошипом *OA* и вращающимся с угловой скоростью $\omega_1$ = 1 рад/с. Шатун *BC*, шарнирно соединённый с шестерёнкой 2 на её ободе в точке *B*, приводит в движение кривошип $CO_1$. Определить угловые скорости шестерёнки 2, шатуна *BC* и кривошипа $CO_1$, скорости точек *A, B, C* в положении, показанном на рис.2.17, если длина шатуна *BC* = 100 см, длина кривошипа $CO_1$ = 50 см.

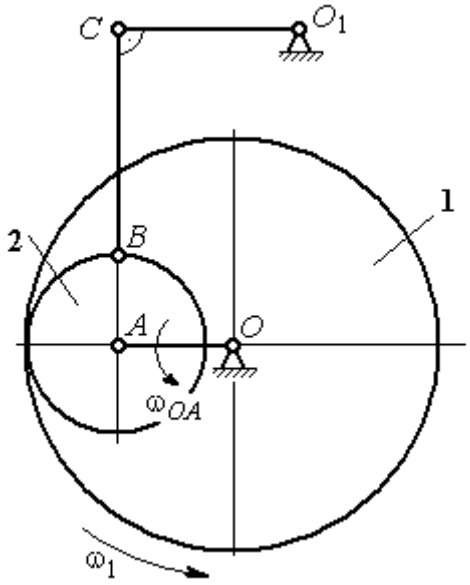


Рис. 2.17. Планетарный механизм

*Решение*

Найдём скорости точек *A* и *D*

$$V_A = \omega_{OA} \cdot OA = 90 \text{ см/с}; \quad V_D = \omega_1 \cdot r_1 = 45 \text{ см/с}.$$

Вектор скорости $\vec{V}_A$ направлен перпендикулярно кривошипу *OA* в сторону его вращения. Вектор скорости $\vec{V}_D$ перпендикулярен радиусу *OD* колеса 1 и направлен в сторону вращения колеса (рис. 2.18).

Мгновенный центр скоростей $P_2$ шестерни 2 находится на пересечении прямой, соединяющей точки *A* и *D*, и линии, проходящей через концы векторов $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_D$, изображающих скорости точек *A* и *D* Расстояние $P_2D$ от центра скоростей до точки *D* находится из пропорции $\frac{V_A}{V_D} = \frac{AP_2}{DP_2} = \frac{DP_2 + 20}{DP_2}$, откуда $P_2D$ = 20 см.

Угловая скорость шестерёнки 2 $\omega_2 = \dfrac{V_D}{P_2 D} = 2{,}25$ рад/с. Направление угловой скорости $\omega_2$ показано на рис. 2.18 дуговой стрелкой $\omega_2$.

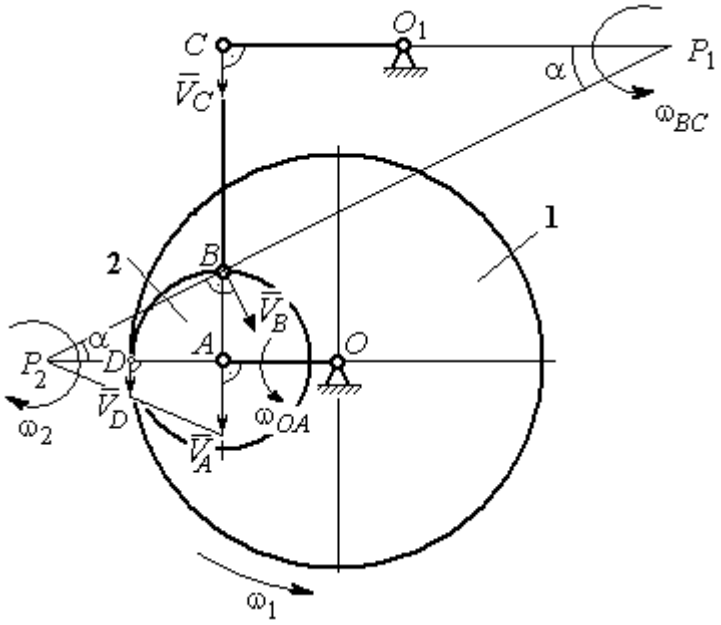


Рис. 2.18. Расчётная кинематическая схема планетарного механизма

Скорость точки *B,* которая находится на ободе шестеренки, $V_B = \omega_2 \cdot P_2 B = 45\sqrt{5}$ см/с. Вектор скорости $\vec{V}_B$ перпендикулярен линии $P_2B$ и направлен в сторону вращения шестерни 2.

Направим вектор скорости $\vec{V}_C$ перпендикулярно кривошипу $CO_1$ и восстановим перпендикуляры к скоростям $\vec{V}_C$ и $\vec{V}_B$. Точка $P_1$ пересечения перпендикуляров является мгновенным центром скоростей шатуна *BC*. Расстояние $P_1B$ найдём из треугольника $P_1BC$: $P_1B = \dfrac{BC}{\sin\alpha}$, где $\sin\alpha = \dfrac{AB}{P_2B} = \dfrac{1}{\sqrt{5}}$. Тогда $P_1B = 100\sqrt{5}$ см.

Угловая скорость шатуна $\omega_{BC} = \dfrac{V_B}{P_1 B} = 0{,}45$ рад/с. Скорость точки *C* шатуна *BC* найдём по теореме о проекциях скоростей. Спроектируем скорости $\vec{V}_C$ и $\vec{V}_B$ точек *C* и *B* на линию, проходящую через эти точки Имеем: $V_C \cos 0^\circ = V_B \cos\alpha$, откуда $V_C = 90$ см/с.

Угловая скорость кривошипа $CO_1$ $\omega_{CO_1} = \dfrac{V_C}{O_1 C} = 1{,}8$ рад/с.

**Задача 30.** В плоском механизме (рис. 2.19) кривошип $OA$ вращается вокруг оси $O$ с угловой скоростью $\omega_{OA}$. На конец $A$ кривошипа насажена шестерня 2, находящаяся во внешнем зацеплении с неподвижным колесом 1. Радиусы колеса и шестерни $r_1$ и $r_2$. Шестерня 2 соединяется с колесом 3 шатуном $BC$, закреплённым на шестерне в точке $B$ и на колесе в точке $C$. Колесо 3 катится без скольжения по горизонтальной поверхности. Все соединения шарнирные. Качение шестерни 2 по неподвижному колесу 1 без проскальзывания. Для положения механизма, изображенного на рис. 2.19, определить скорости точек $A$, $B$, $C$ и угловые скорости шатуна $BC$, шестерни 2 и колеса 3, если $\omega_{OA} = 4$ рад/с; $r_1 = 4$ см; $r_2 = r_3 = 8$ см.

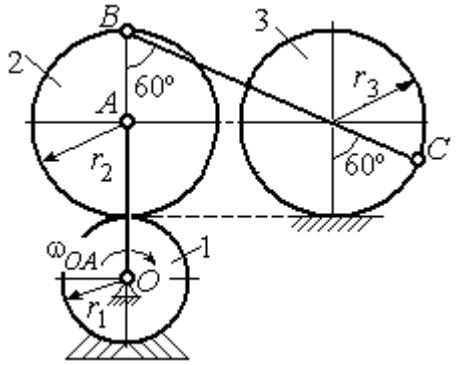


Рис. 2.19. Схема движения плоского механизма

*Решение*

Рассмотрим вращательное движение кривошипа $OA$. Скорость точки $A$ кривошипа: $V_A = \omega_{OA} \cdot OA =$ 48 см/с. Вектор скорости $\vec{V}_A$ направлен перпендикулярно кривошипу $OA$ в сторону его вращения (рис. 2.20).

При качении шестерни 2 по неподвижной поверхности колеса 1 точка их соприкосновения $P_2$ является мгновенным центром скоростей шестерни.

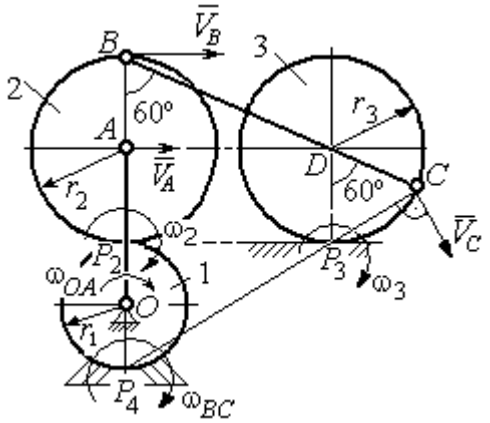


Рис. 2.20. Расчетная схема для определения угловых скоростей звеньев механизма

Угловая скорость шестерни 2 $\omega_2 = \dfrac{V_A}{AP_2} = 6$ рад/с.

Скорость точки $B$ шестерни 2 $V_B = \omega_2 \cdot BP_2 = 96$ см/с.

Точка $P_3$ касания колеса 3 с неподвижной поверхностью является его мгновенным центром скоростей. Вектор $\vec{V}_C$ скорости точки $C$ колеса 3 перпендикулярен линии $P_3C$ и направлен в сторону качения колеса (см. рис. 2.20).

Мгновенный центр скоростей шатуна $BC$ – точка $P_4$ находится на пересечении перпендикуляров, восстановленных к скоростям точек $B$ и $C$. По построению $BP_4 = BC = BD + DC = 2r_2 + r_3 = 24$ см. Угловая скорость шатуна $BC$ $\omega_{BC} = \dfrac{V_B}{BP_4} = 4$ рад/с. Так как $BP_4 = CP_4$, скорости точек $C$ и $B$ $V_C = 96$ см/с.

Угловая скорость колеса 3 $\omega_3 = \dfrac{V_C}{CP_3} = 12$ рад/с.

**Задача 31.** В плоском механизме (рис. 2.21) кривошип $OC$, вращаясь вокруг неподвижной оси $O$, приводит в движение два шатуна $CD$ и $CE$, присоединённых к кривошипу в точке $C$. Шатун $CE$ прикреплён в точке $E$ к ободу цилиндрического выступа диска 1, который катится без проскальзывания своим выступом по неподвижному горизонтальному рельсу. К другому шатуну $CD$ в точке $D$ прикреплён ползун, перемещающийся вдоль направления вертикального диаметра диска 1. Все соединения шарнирные. Радиусы диска и цилиндрического выступа $R_1 = 3$ см, $r_1 = 2$ см. Длина шатуна $CE = 4$ см. В заданном положении механизма (см. рис. 2.21) шатун $CE$ горизонтален.

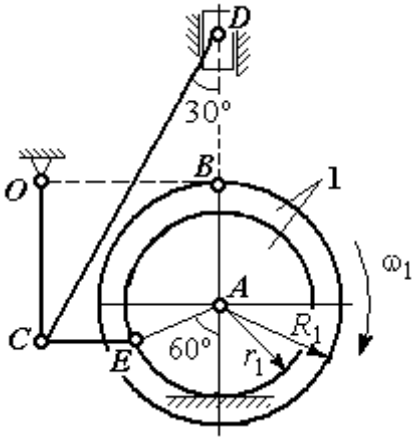


Рис. 2.21. Схема движения плоского механизма

Определить скорости точек $A, E, C, D$ и угловые скорости диска 1, шатунов $CE, CD$ и кривошипа $CO$, если известна скорость точки $B$ на ободе диска 1 $V_B = 10$ см/с и направление $\omega_1$ угловой скорости диска.

*Решение*

Изобразим вектор скорости точки *B* диска 1 в соответствии с заданным направлением его движения. При качении диска 1 по неподвижной поверхности рельса точка $P_1$ касания обода выступа с поверхностью рельса является его мгновенным центром скоростей (рис. 2.22).

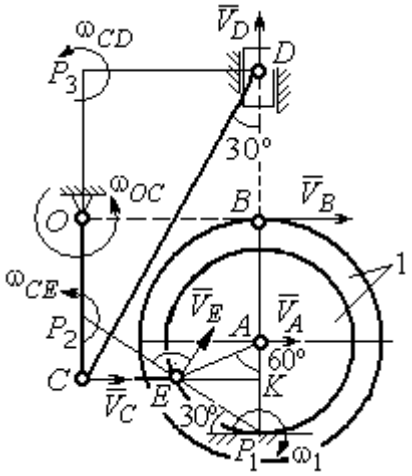



Рис. 2.22. Расчётная схема для определения скоростей точек и угловых скоростей звеньев механизма

Угловая скорость диска 1 $\omega_1 = \dfrac{V_B}{BP_1}$ = 2 рад/с. Скорость точки $A$ $V_A = \omega_1 \cdot AP_1$ = 4 см/с. Скорость точки $E$ $V_E = \omega_1 \cdot EP_1 = 4$ см/с. Вектор скорости $\vec{V}_A$ и вектор скорости $\vec{V}_E$ перпендикулярны, соответственно, линиям $AP_1$ $EP_1$ и направлены в сторону вращения диска.

Шатун $CE$ совершает плоскопараллельное движение. Скорость точки $C$ шатуна неизвестна по величине, но известно, что вектор скорости $\vec{V}_C$ перпендикулярен кривошипу $OC$ и направлен вдоль $CE$ в сторону точки $E$. Мгновенный центр скоростей $P_2$ шатуна $CE$ находится на пересечении перпендикуляров, восстановленных к скоростям $\vec{V}_E$ и $\vec{V}_C$ (см. рис. 2.22).

Расстояние $EP_2 = \dfrac{EC}{\cos 30^\circ}$ = 4,62 см. Угловая скорость шатуна $CE$ $\omega_{CE} = \dfrac{V_E}{EP_2}$ = 0,86 рад/с. Направление угловой скорости шатуна, определяемое по направлению скорости точки $E$, на рис. 2.22 показано дуговой стрелкой $\omega_{CE}$. Скорость точки $C$ шатуна $CE$ $V_C = \omega_{CE} \cdot CP_2 = \dfrac{V_E}{2} = 2$ см/с.

Длина кривошипа $OC = BK = R_1 + r_1 \sin 30^\circ =$ 4 см. Угловая скорость кривошипа $\omega_{OC} = \dfrac{V_C}{OC} = 0{,}5$ рад/с.

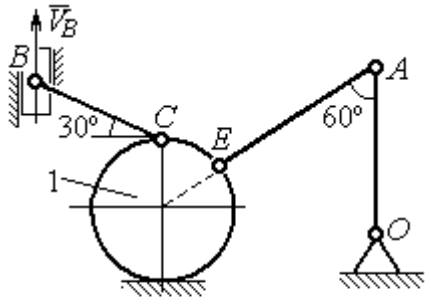
Для шатуна *CD* известны величина и направление вектора $\vec{V}_C$ скорости точки *C* и направление вектора $\vec{V}_D$ скорости точки *D*. Мгновенный центр скоростей шатуна *CD* находится в точке $P_3$, полученной на пересечении перпендикуляров, восстановленных к скоростям $\vec{V}_C$ и $\vec{V}_D$.

Расстояние $CP_3 = DK =$ $(CE + r_1 \cos 30^\circ)\operatorname{ctg} 30^\circ =$ 9,92 см (см. рис. 2.22). Угловая скорость шатуна *CD:* $\omega_{CD} = \dfrac{V_C}{CP_3} = 0{,}21$ рад/с.

Скорость ползуна *D:* $V_D = \omega_{CD} DP_3 = \omega_{CD}(CE + r_1 \cos 30^\circ) = 1{,}2$ см/с.

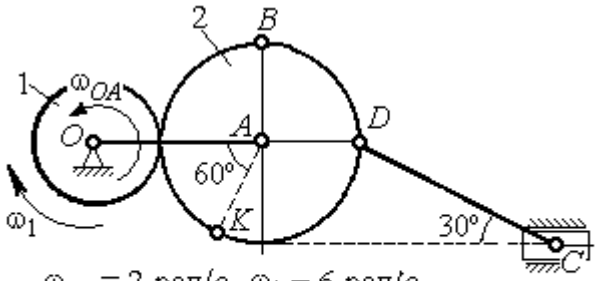
## Упражнения

Упражнение 2.3




$R_1 = 2$ см, $OA = AE = 6$ см,
$BC = 5$ см, $V_B = 5$ см/с.
Найти: $\omega_{OA}, \omega_{AE}, \omega_{CB}, \omega_1, V_C, V_A, V_E$

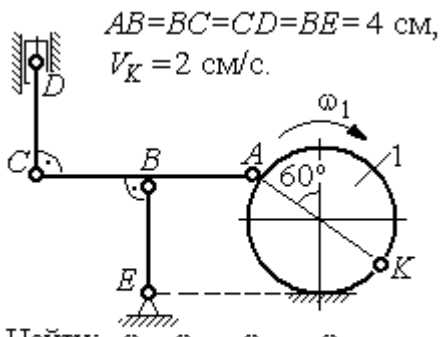
Упражнение 2.4



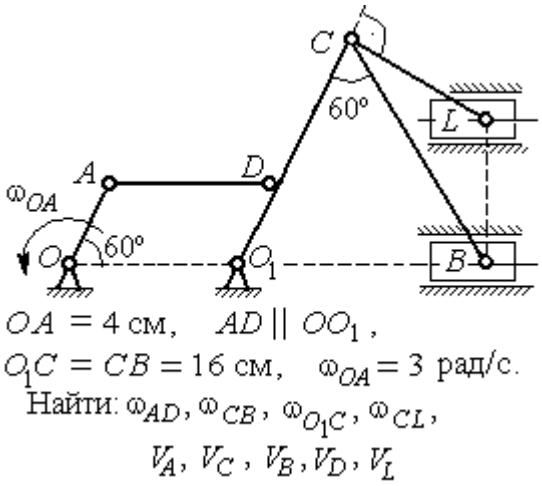

$\omega_{OA} = 2$ рад/с, $\omega_1 = 6$ рад/с,
$r_1 = 3$ см, $r_2 = 6$ см.
Найти: $\omega_2, \omega_{DC}, V_B, V_K, V_D, V_C$

Рис. 2.23. Задания для самостоятельного решения. Упражнения 2.3, 2.4

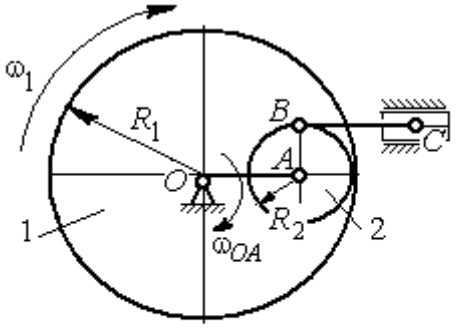
Упражнение 2.5




Упражнение 2.6




Упражнение 2.7




Упражнение 2.8

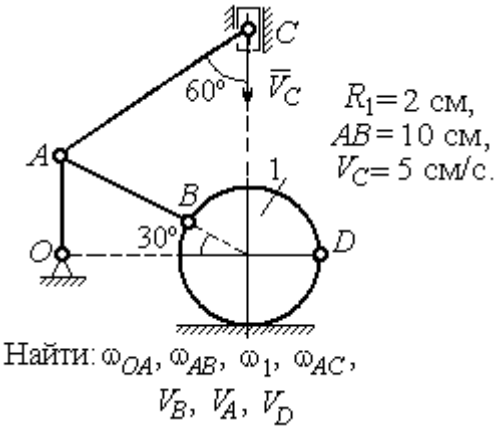



Рис. 2.24. Задания для самостоятельного решения. Упражнения 2.5 – 2.8

## 2.4. Ускорения точек при плоскопараллельном движении твёрдого тела

Ускорение любой точки $M$ плоской фигуры при плоскопараллельном движении твердого тела представляется как сумма векторов $\vec{a}_M = \vec{a}_A + \vec{a}^{\tau}_{MA} + \vec{a}^{n}_{MA}$, где $\vec{a}_A$ – ускорение полюса $A$; $\vec{a}^{\tau}_{MA}$, $\vec{a}^{n}_{MA}$ – касательная и нормальная составляющие ускорения точки $M$ при вращении фигуры вокруг полюса $A$ (рис. 2.25).

Вектор нормального ускорения $\vec{a}^{n}_{MA}$ всегда направлен от точки $M$ к полюсу $A$. Вектор касательного ускорения $\vec{a}^{\tau}_{MA}$ направлен перпендикулярно отрезку $AM$ в сторону вращения, если оно ускоренное (см. рис. 2.25, *a*), и против вращения, если оно замедленное (см. рис. 2.25, *b*). Величины касательного и нормального составляющих ускорения точки $M$ определяются по формулам: $a^{\tau}_{MA} = \varepsilon \cdot AM$; $a^{n}_{MA} = \omega^2 \cdot AM$, где $\omega$, $\varepsilon$ – угловая скорость и угловое ускорение тела (плоской фигуры); $AM$ – расстояние от точки $M$ до полюса $A$.

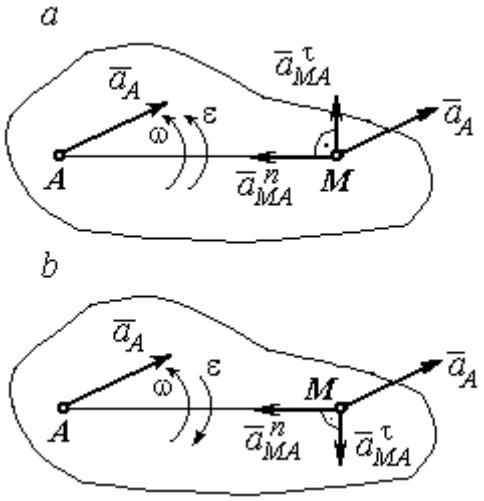



Рис. 2.25. Ускорение точки плоской фигуры:
*a* – ускоренное движение;
*b* – замедленное движение

Если при движении плоской фигуры известны траектории движения полюса $A$ и точки $M$, то для определения ускорения точки $M$ используется векторное равенство $\vec{a}^{\tau}_{M} + \vec{a}^{n}_{M} = \vec{a}^{\tau}_{A} + \vec{a}^{n}_{A} + \vec{a}^{\tau}_{MA} + \vec{a}^{n}_{MA}$, где $\vec{a}^{\tau}_{M}$, $\vec{a}^{n}_{M}$, $\vec{a}^{\tau}_{A}$, $\vec{a}^{n}_{A}$ – касательная и нормальная составляющие ускорения точки $M$ и полюса $A$ при движении их по заданным траекториям.

## Примеры решения задач на определение ускорений точек

**Задача 32.** Поршень $D$ гидравлического пресса приводится в движение шарнирно-рычажным механизмом $OABD$. В положении механизма, указанном на рис. 2.26, точка $L$ рычага имеет скорость $V_L$ = 0,6 м/с и ускорение $a_L$ = 0,5 м/с$^2$. Длина рычага $OA = 2 \cdot AL$ = 0,6 м, длина звена $AB$ = 0,4 м. Определить скорость и ускорение поршня $D$, угловую скорость и ускорение звена $AB$.

*Решение*

Найдём угловую скорость рычага $OL$: $\omega_{OL} = \dfrac{V_L}{OL} = \dfrac{2}{3}$ рад/с.

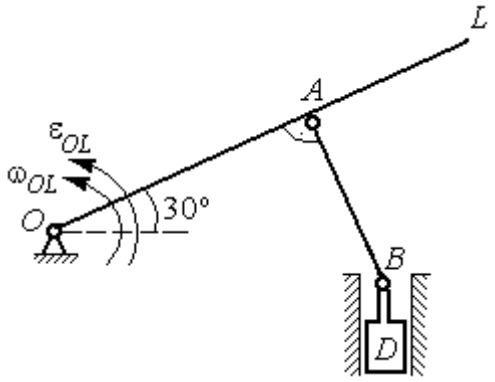



Рис. 2.26. Шарнирно-рычажный механизм гидравлического пресса

Ускорение точки $L$ представляется в виде суммы векторов нормального и касательного ускорений: $\vec{a}_L = \vec{a}_L^{\,\tau} + \vec{a}_L^{\,n}$ (рис. 2.27). Модуль нормального ускорения точки $L$ $a_L^n = \omega_{OL}^2 \cdot OL = 0{,}4$ м/с$^2$. Модуль её касательного ускорения и угловое ускорение рычага, соответственно, равны:

$$a_L^{\tau} = \sqrt{a_L^2 - (a_L^n)^2} = 0{,}3 \text{ м/с}^2, \quad \varepsilon_{OL} = \frac{a_L^{\tau}}{OL} = \frac{1}{3} \text{ рад/с}^2.$$

Скорость $\vec{V}_A$ точки $A$ перпендикулярна рычагу $OL$ и направлена в сторону вращения рычага. Её модуль $V_A = \omega_{OL} \cdot OA = 0{,}4$ м/с. Скорость $\vec{V}_B$ точки $B$ направлена вертикально вверх вдоль линии движения поршня. Направления векторов скоростей $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_B$ показаны на рис. 2.27. Точка $P_1$ – пересечения перпендикуляров, восстановленных к векторам скоростей $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_B$ - определяет положение мгновенного центра скоростей звена $AB$. Расстояние $AP_1 = P_1B \cdot \cos 30^\circ = 0{,}4\sqrt{3}$ м.

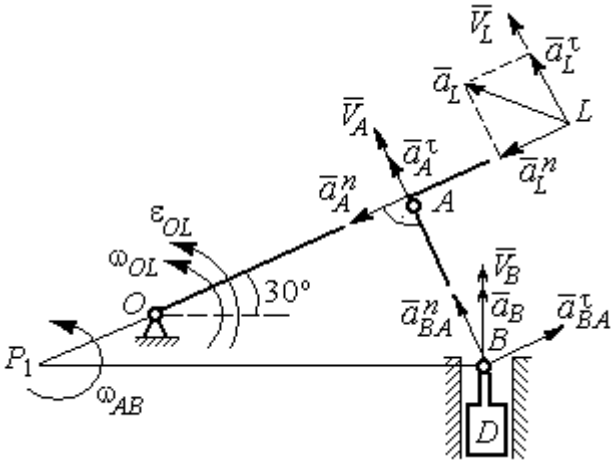



Рис. 2.27. Расчётная кинематическая схема механизма

Угловая скорость звена $AB$ $\omega_{AB} = \dfrac{V_A}{P_1A} = \dfrac{1}{\sqrt{3}}$ рад/с.

Представим ускорение точки *B* через полюс *A*: $\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}^{\tau}_{BA} + \vec{a}^{n}_{BA}$, где $\vec{a}_A$ – ускорение полюса *A*; $\vec{a}^{\tau}_{BA}$, $\vec{a}^{n}_{BA}$ – касательная и нормальная составляющие ускорения точки *B* при вращении звена *AB* вокруг полюса *A*. Так как траекторией точки *A* является окружность с центром в точке *O*, ускорение этой точки может быть разложено на две составляющие: $\vec{a}_A = \vec{a}^{\tau}_A + \vec{a}^{n}_A$. В результате ускорение точки *B* представляется в виде векторной суммы $\vec{a}_B = \vec{a}^{\tau}_A + \vec{a}^{n}_A + \vec{a}^{\tau}_{BA} + \vec{a}^{n}_{BA}$. Направления векторов ускорений показаны на рис. 2.27.

Модули ускорений:

$$a^{n}_A = \omega^2_{OL} \cdot OA = 0{,}27 \text{ см/с}^2;\ a^{n}_{BA} = \omega^2_{AB} \cdot AB = 0{,}13 \text{ см/с}^2;$$

$$a^{\tau}_A = \varepsilon_{OL} \cdot OA = 0{,}2 \text{ см/с}^2.$$

Ускорение $a^{\tau}_{BA} = \varepsilon_{AB} \cdot AB$ остаётся неизвестной величиной, так как угловое ускорение $\varepsilon_{AB}$ звена *AB* неизвестно.

Спроектируем векторное равенство ускорения точки *B* на оси *x*, *y*, где ось *x* проходит вдоль линии звена *AB*, ось *y* – перпендикулярна ей (рис. 2.28). Получим равенства:

$$a_B \cdot \cos 30^\circ = a^{\tau}_A + a^{n}_{BA};\ \ a_B \cdot \cos 60^\circ = -a^{n}_A + a^{\tau}_{BA}.$$

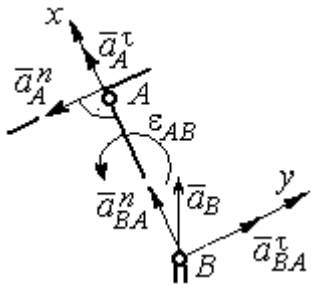


Рис. 2.28. Вычисление проекций векторов ускорений

Решая систему уравнений, находим модуль ускорения точки *B*: $a_B = 0{,}38$ см/с$^2$ и величину касательного ускорения: $a^{\tau}_{BA} = 0{,}46$ см/с$^2$. Угловое ускорение стержня *AB* $\varepsilon_{AB} = \dfrac{a^{\tau}_{BA}}{AB} = 1{,}15$ рад/с$^2$. Направление углового ускорения $\varepsilon_{AB}$ звена *AB* определяется направлением вектора $\vec{a}^{\tau}_{BA}$ касательного ускорения точки *B* при вращении звена вокруг полюса *A* (см. рис. 2.28).

Ускорение поршня *D* равно ускорению точки *B*: $a_D = a_B = 0{,}38$ см/с$^2$.

**Задача 34.** Колесо 1 радиуса $r_1 = 0{,}6$ м катится без скольжения по прямолинейному участку пути и приводит в движение шатун 2, соединённый шарнирно с колесом в точке $B$ на его ободе. На другом конце шатуна в точке $C$ к нему присоединён ползун, перемещающийся горизонтально (рис. 2.29).

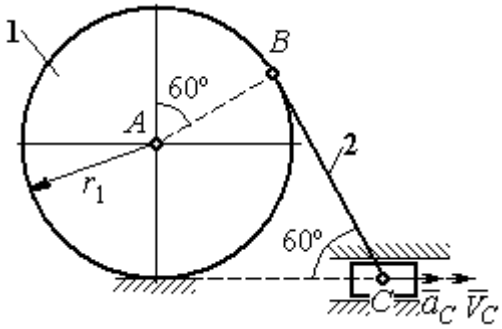


Рис. 2.29. Механизм, связывающий качение колеса с поступательным движением ползуна

В положении механизма, показанном на рис. 2.29, найти ускорение центра $A$ колеса 1, его угловое ускорение, а также угловое ускорение шатуна 2, если заданы скорость и ускорение ползуна $C$: $V_C = 9$ м/с; $a_C = 4$ м/с$^2$.

*Решение*

При качении диска 1 по неподвижной поверхности точка $P_1$ касания его с поверхностью является мгновенным центром скоростей диска. Вектор скорости $\vec{V}_B$ перпендикулярен линии $P_1B$. Восстановим перпендикуляры к скоростям $\vec{V}_B$ и $\vec{V}_C$. Их пересечение в точке $P_2$ определяет положение мгновенного центра скоростей шатуна 2 (рис. 2.30).

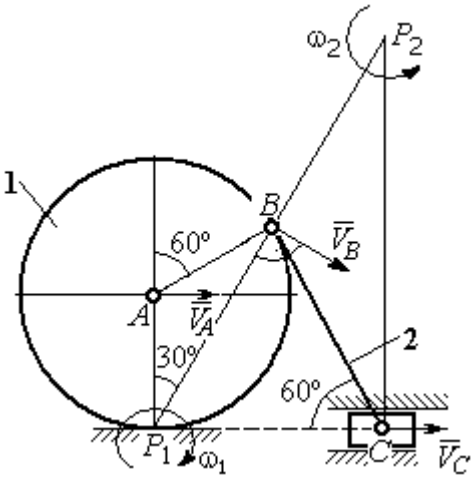


Рис. 2.30. Расчётная схема механизма для определения скоростей точек

Вычислим необходимые расстояния.

Расстояние $P_1B$ (см. рис. 2.30) найдём из треугольника $P_1AB$ по теореме косинусов: $P_1B = r_1\sqrt{3} = 1{,}04$ м. Из построения мгновенных центров скоростей $P_1$ и $P_2$ следует: $P_1B = BP_2 = BC$. Расстояние $P_2C$ определяется из треугольника $P_1P_2C$: $P_2C = P_1P_2 \cdot \cos 30^\circ = 1{,}8$ м.

Угловая скорость шатуна 2 $\omega_2 = \dfrac{V_C}{P_2C}$ = 5рад/с. Направление угловой скорости $\omega_2$ определяется направлением скорости $\vec{V}_C$.

Скорость точки *B* найдём по формуле $V_B = \omega_2 \cdot P_2B$ = 5,2 м/с.

Угловая скорость диска 1 $\omega_1 = \dfrac{V_B}{P_1B}$ = 5 рад/с. Скорость центра колеса 1 $V_A = \omega_1 \cdot P_1A$ = 3 м/с.

Найдём ускорение точки *A*.

Примем точку *B* за полюс и выразим ускорение точки *A* через полюс *B*: $\vec{a}_A = \vec{a}_B + \vec{a}^{\tau}_{AB} + \vec{a}^{n}_{AB}$, где $\vec{a}_B$ – ускорение полюса *B*; $\vec{a}^{\tau}_{AB}$, $\vec{a}^{n}_{AB}$ – касательная и нормальная составляющие ускорения точки *A* при вращении диска 1 вокруг полюса *B* (рис. 2.31). Направления ускорения точки $\vec{a}_A$ и касательной составляющей ускорения $\vec{a}^{\tau}_{AB}$ точки *A* выбраны в предположении ускоренного движения диска.

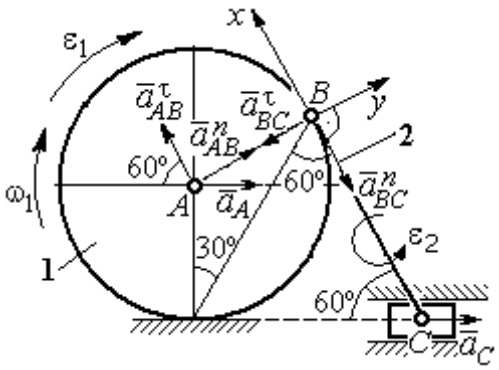


Рис. 2.31. Расчётная схема механизма для определения ускорений точек

Ускорение полюса *B* выразим через полюс *C*: $\vec{a}_B = \vec{a}_C + \vec{a}^{\tau}_{BC} + \vec{a}^{n}_{BC}$, где $\vec{a}_C$ – ускорение полюса *C*; $\vec{a}^{\tau}_{BC}$, $\vec{a}^{n}_{BC}$ – касательная и нормальная составляющие ускорения точки *B* при вращении шатуна 2 вокруг полюса *C*. Направление касательной составляющей ускорения $\vec{a}^{\tau}_{BC}$ точки *B* выбрано в направлении вращения шатуна 2 (см. рис. 2.30) исходя из предположения его ускоренного движения. В результате ускорение точки *A* выражается векторной суммой:

$$\vec{a}_A = \vec{a}^{\tau}_{AB} + \vec{a}^{n}_{AB} + \vec{a}^{\tau}_{BC} + \vec{a}^{n}_{BC} + \vec{a}_C.$$

Направления векторов ускорений показаны на рис. 2.31.

Заметим, что в любой момент времени движения колеса 1 расстояние от точки $A$ до мгновенного центра скоростей колеса $P_1$ остаётся постоянным, равным радиусу колеса. Дифференцируем выражение $V_A = \omega_1 \cdot P_1A = \omega_1 \cdot r_1$. Получим $\frac{dV_A}{dt} = \frac{d\omega_1}{dt} r_1 = \varepsilon_1 \cdot r_1$, откуда с учётом $\frac{dV_A}{dt} = a_A$ (прямолинейное движение точки $A$) угловое ускорение диска 1 $\varepsilon_1 = \frac{a_A}{r_1}$. В результате, касательное ускорение $a^{\tau}_{AB}$ точки $A$ при вращении диска 1 вокруг полюса $B$ $a^{\tau}_{AB} = \varepsilon_1 \cdot AB = a_A$.

Найдём модули векторов ускорений:

$$a^n_{AB} = \omega_1^2 \cdot AB = 15 \text{ м/с}^2;\ a^n_{BC} = \omega_2^2 \cdot BC = 26 \text{ м/с}^2.$$

Ускорение $a^{\tau}_{BC} = \varepsilon_2 \cdot BC$ остаётся неизвестным. Применить здесь способ дифференцирования выражения $V_C = \omega_2 \cdot P_2C$ для определения углового ускорения $\varepsilon_2$ невозможно, так как расстояние $P_2C$ от мгновенного центра скоростей $P_2$ шатуна 2 до точки $C$ меняется во время движения механизма неизвестным образом.

Спроектируем векторное равенство ускорения точки $A$ на оси $x$, $y$, выбранные, как показано на рис. 2.31. Получим систему уравнений:

$$\text{проекция на ось } x\text{: } -a_A \cos 60^\circ = a^{\tau}_{AB} - a^n_{BC} - a_C \cos 60^\circ;$$

$$\text{проекция на ось } y\text{: } a_A \cos 30^\circ = a^n_{AB} - a^{\tau}_{BC} + a_C \cos 30^\circ.$$

Из первого уравнения с учётом того, что $a^{\tau}_{AB} = a_A$, найдём ускорение точки $A$: $a_A$ = 18,67 м/с$^2$. Положительное значение ускорения точки $A$ означает, что вектор $\vec{a}_A$ направлен так, как показано на рис. 2.31, – в сторону направления вектора скорости $\vec{V}_A$. Из этого следует, что диск 1 движется ускоренно и угловое ускорение направлено в сторону его угловой скорости.

Из второго уравнения получим: $a^{\tau}_{BC} = 2{,}29$ м/с$^2$. Угловое ускорение шатуна 2: $\varepsilon_2 = \dfrac{\left|a^{\tau}_{BC}\right|}{BC} = 2{,}2$ рад/с$^2$. Из того, что касательное ускорение $a^{\tau}_{BC}$ положительно, следует, что направление вектора $\vec{a}^{\tau}_{BC}$ совпадает с направлением, указанным на рис. 2.31. Это, в свою очередь, означает, что в данном положении механизма угловое ускорение шатуна 2 направлено так, как показано на рис. 2.31, – по направлению его угловой скорости, то есть шатун 2 вращается ускоренно.

**Задача 35.** По неподвижной шестерне 1 радиуса $r_1$ обкатывается шестерня 2 радиуса $r_2$, насаженная в центре на кривошип $OA$ (рис. 2.32). Кривошип $OA$ вращается вокруг оси $O$ с угловой скоростью $\omega_{OA}$ и угловым ускорением $\varepsilon_{OA}$. На ободе шестерни 2 в точке $B$ шарнирно прикреплен стержень $BC$, соединенный другим концом с центром $C$ диска 3, катящегося без скольжения вдоль горизонтальной прямой. Радиус диска 3 равен радиусу шестерни 2: $r_3 = r_2$. Для положения механизма, изображенного на рис. 2.32, определить ускорение точки $D$ и угловое ускорение стержня $BC$, если $r_1 = 0{,}2$ м, $r_2 = 0{,}4$ м, $\omega_{OA} = 4$ рад/с, $\varepsilon_{OA} = 2$ рад/с$^2$. Длина стержня $BC = 1$ м.

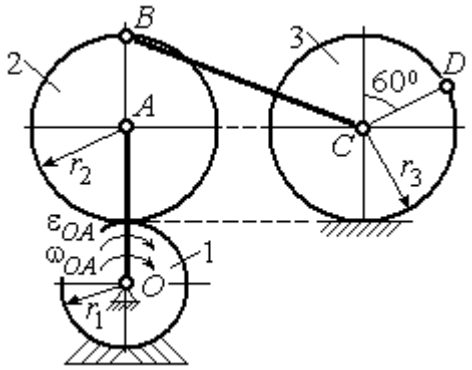


Рис. 2.32. Схема движения плоского механизма

*Решение*

Найдём угловые скорости звеньев механизма.

Рассмотрим вращательное движение кривошипа $OA$. Скорость его точки $A$: $V_A = \omega_{OA} \cdot OA = 2{,}4$ м/с. Вектор скорости $\vec{V}_A$ направлен перпендикулярно кривошипу $OA$ в сторону его вращения (рис. 2.33).

При качении подвижной шестерни 2 по неподвижной 1, точка их соприкосновения $P_2$ является мгновенным центром скоростей шестерни 2. Угловая скорость шестерни 2: $\omega_2 = \dfrac{V_A}{AP_2} = 6$ рад/с. Скорость точки *B* шестерни 2:

$V_B = \omega_2 \cdot BP_2 = 4{,}8$ м/с.

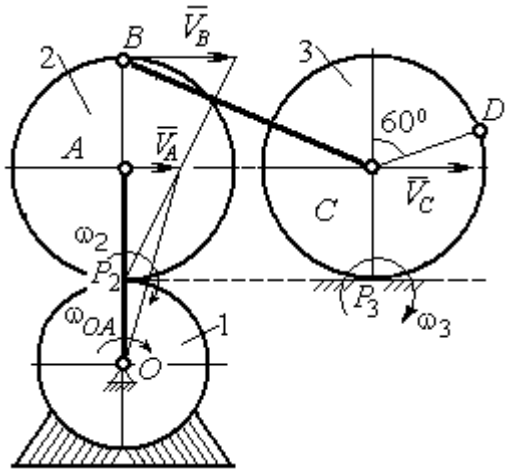



Рис. 2.33. Расчетная схема для определения угловых скоростей звеньев механизма

Для определения угловой скорости стержня *BC* заметим, что скорости двух точек стержня $\vec{V}_B$ и $\vec{V}_C$ параллельны, но точки *B* и *C* не лежат на общем перпендикуляре к скоростям. В этом случае мгновенный центр скоростей стержня *BC* отсутствует (или бесконечно удалён), угловая скорость стержня равна нулю и стержень совершает мгновенное поступательное движение. При таком движении мгновенные скорости всех точек стержня *BC* одинаковы по величине и направлению. Таким образом, $\omega_{BC} = 0$; $V_C = V_B = 4{,}8$ м/с.

При качении диска 3 по неподвижной поверхности без проскальзывания точка $P_3$ касания диска с поверхностью является его мгновенным центром скоростей. Угловая скорость диска 3: $\omega_3 = \dfrac{V_C}{CP_3} = 12$ рад/с. Направление угловой скорости $\omega_3$ определяется направлением вектора $\vec{V}_C$.

Найдём ускорения точек и угловые ускорения звеньев механизма.

Выразим ускорение $\vec{a}_C$ точки *C*, направленное вдоль линии движения центра колеса 3, через полюс *B*. Ускорение представляется векторной суммой: $\vec{a}_C = \vec{a}_B + \vec{a}^{\,n}_{CB} + \vec{a}^{\,\tau}_{CB}$, где $\vec{a}_B$ – вектор ускорения полюса *B*; $\vec{a}^{\,n}_{CB}$, $\vec{a}^{\,\tau}_{CB}$ – нормальная и касательная составляющие ускорения точки *C* при вращении стержня *BC* вокруг полюса *B*. Вектор $\vec{a}^{\,n}_{CB}$ направлен вдоль стержня от точки *C* к

полюсу $B$, вектор $\vec{a}^{\tau}_{CB}$ перпендикулярен стержню $BC$. Направление вектора $\vec{a}^{\tau}_{CB}$ выбрано по предполагаемому угловому ускорению стержня $BC$, показанному на рис. 2.34 дуговой стрелкой $\varepsilon_{CB}$.

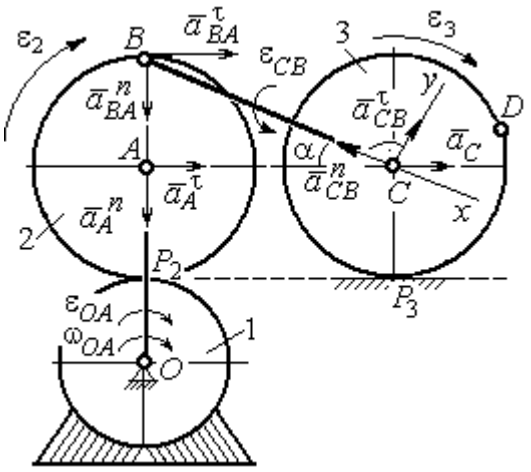



Рис. 2.34. Расчетная схема для определения ускорений точек механизма и угловых ускорений его звеньев

Рассмотрим плоскопараллельное движение шестерни 2 и выразим ускорение точки $B$ через полюс $A$ в виде векторного равенства: $\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}^{n}_{BA} + \vec{a}^{\tau}_{BA}$, где $\vec{a}_A$ – ускорение полюса $A$; $\vec{a}^{n}_{BA}$, $\vec{a}^{\tau}_{BA}$ – нормальная и касательная составляющие ускорения точки $B$ при вращении шестерни 2 вокруг полюса $A$. Вектор $\vec{a}^{n}_{BA}$ направлен вдоль радиуса шестерни от точки $B$ к полюсу $A$, вектор $\vec{a}^{\tau}_{BA}$ перпендикулярен линии $BA$. Направление вектора $\vec{a}^{\tau}_{BA}$ соответствует ускоренному вращению шестерни 2.

Рассмотрим вращение кривошипа $OA$. Вектор ускорения точки $A$ кривошипа при вращении его вокруг неподвижной оси $O$ представляется в виде суммы: $\vec{a}_A = \vec{a}^{n}_A + \vec{a}^{\tau}_A$, где $\vec{a}^{n}_A$ и $\vec{a}^{\tau}_A$ – вектора нормальной и касательной составляющих ускорения точки $A$. Вектор $\vec{a}^{n}_A$ направлен вдоль кривошипа по направлению к оси вращения, вектор $\vec{a}^{\tau}_A$ перпендикулярен кривошипу и направлен в сторону углового ускорения $\varepsilon_{OA}$ вращения кривошипа.

В результате для определения ускорения точки $C$ имеем векторное равенство:

$$\vec{a}_C = \vec{a}^{n}_A + \vec{a}^{\tau}_A + \vec{a}^{n}_{BA} + \vec{a}^{\tau}_{BA} + \vec{a}^{n}_{CB} + \vec{a}^{\tau}_{CB}.$$

Направления всех векторов ускорений показаны на рис. 2.34.

Вычислим модули векторов, составляющих векторную сумму:

$$a_A^n = \omega_{OA}^2 \cdot OA = 9{,}6 \text{ м/с}^2; \quad a_A^\tau = \varepsilon_{OA} \cdot OA = 1{,}2 \text{ м/с}^2;$$

$$a_{BA}^n = \omega_2^2 \cdot BA = 14{,}4 \text{ м/с}^2; \quad a_{CB}^n = \omega_{BC}^2 \cdot BC = 0.$$

Заметим, что во время движения шестерни 2 расстояние $AP_2$ остается постоянным, равным $r_2$. Дифференцируя равенство $V_A = \omega_2 \cdot AP_2 = \omega_2 r_2$, получим: $\frac{dV_A}{dt} = \frac{d\omega_2}{dt} r_2$. При криволинейном движении точки $A$ производная от скорости равна касательному ускорению: $\frac{dV_A}{dt} = a_A^\tau$. С учётом, что $\frac{d\omega_2}{dt} = \varepsilon_2$, получим: $a_A^\tau = \varepsilon_2 r_2$, откуда $\varepsilon_2 = \frac{a_A^\tau}{r_2} = 3$ рад/с$^2$ и $a_{BA}^\tau = \varepsilon_2 \cdot BA = 1{,}2$ м/с$^2$.

Выберем оси $Cx$, $Cy$, как показано на рис. 2.34, – вдоль отрезка $BC$ и перпендикулярно ему и спроектируем на них векторное равенство ускорения точки $C$. Получим систему уравнений:

$$a_C \cos\alpha = a_A^n \sin\alpha + a_A^\tau \cos\alpha + a_{BA}^n \sin\alpha + a_{BA}^\tau \cos\alpha - a_{CB}^n;$$

$$a_C \sin\alpha = -a_A^n \cos\alpha + a_A^\tau \sin\alpha - a_{BA}^n \cos\alpha + a_{BA}^\tau \sin\alpha + a_{CB}^\tau,$$

где $\alpha$ – угол между стержнем $BC$ и линией центров $AC$, $\sin\alpha = \frac{AB}{BC} = 0{,}4$; $\cos\alpha = 0{,}92$.

Находим из первого уравнения ускорение точки $C$: $a_C = 12{,}83$ м/с$^2$, из второго – касательное ускорение точки $C$ при вращении стержня $BC$ вокруг полюса $B$: $a_{CB}^\tau = 33{,}95$ м/с$^2$. Величина углового ускорения стержня $BC$: $\varepsilon_{CB} = \frac{\left|a_{CB}^\tau\right|}{BC} = 33{,}95$ рад/с$^2$. Положительное значение $a_{CB}^\tau$ означает, что вектор касательного ускорения $\vec{a}_{CB}^\tau$ направлен так, как показано на рис. 2.34. Тогда и

направление углового ускорения $\varepsilon_{CB}$ стержня $BC$ совпадает с направлением, показанным дуговой стрелкой на рис. 2.34.

При качении диска 3 точка $C$ движется по прямой и расстояние $CP_3$ остается постоянным, равным радиусу диска 3. В этом случае равенство $V_C = \omega_3 \cdot CP_3 = \omega_3 r_3$ можно продифференцировать по времени. Получим: $\frac{dV_C}{dt} = \frac{d\omega_3}{dt} r_3$. Так как движение точки $C$ является прямолинейным, производная от скорости точки $C$ равна ускорению этой точки: $\frac{dV_C}{dt} = a_C$. Тогда с учётом $\frac{d\omega_3}{dt} = \varepsilon_3$ имеем равенство $a_C = \varepsilon_3 r_3$. Угловое ускорение диска 3: $\varepsilon_3 = \frac{a_C}{r_3} = 32{,}07$ рад/с$^2$.

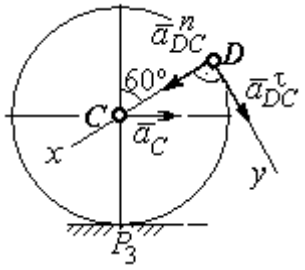


Рис.2.35. Расчетная схема для определения ускорения точки $D$

Выразим ускорение точки $D$ через полюс $C$, ускорение которого известно и по величине, и по направлению: $\vec{a}_D = \vec{a}_C + \vec{a}^n_{DC} + \vec{a}^\tau_{DC}$, где $\vec{a}_C$ – ускорение точки $C$; $\vec{a}^n_{DC}$, $\vec{a}^\tau_{DC}$ – нормальное и касательное составляющие ускорения точки $D$ при вращении диска 3 вокруг полюса $C$. Модули ускорений

$$a_C = 12{,}83 \text{ м/с}^2;\ a^n_{DC} = \omega_3^2 DC = 57{,}6 \text{ м/с}^2;\ a^\tau_{DC} = \varepsilon_3 DC = 12{,}83 \text{ м/с}^2.$$

Проведём оси $Dx$ и $Dy$, как показано на рис. 2.34, и спроектируем векторное равенство ускорения точки $D$ на оси. Получим систему уравнений:

$$a_{Dx} = -a_C \cos 30^\circ + a^n_{DC};\quad a_{Dy} = a_C \cos 60^\circ + a^\tau_{DC}.$$

Подставляя в уравнения проекций значения модулей ускорений, найдём: $a_{Dx} = 46{,}49$ м/с$^2$; $a_{Dy} = 19{,}25$ м/с$^2$.

Величина ускорения точки $D$: $a_D = \sqrt{a_{Dx}^2 + a_{Dy}^2} = 50{,}32$ м/с$^2$.

Заметим, что для определения ускорения точки $D$ невозможно было сразу использовать приём с последовательным выражением ускорения точки $D$ через ускорения полюсов $C$, $B$ и $A$, так как в полученной в результате проекций системе двух уравнений будет три неизвестных величины - $a_{Dx}$, $a_{Dy}$ и величина ускорения $a_{CB}^{\tau}$.

**Задача 36.** Механизм качалки (рис. 2.36) включает в себя кривошип $OA$, вращающийся вокруг неподвижной оси $O$, шестерню 1 радиуса $r_1$, насаженную на кривошип в точке $A$ и обкатывающуюся по неподвижной цилиндрической поверхности, и шатун $BC$, присоединённый одним концом в точке $B$ к шестерне, а другим – в точке $C$ к коромыслу $CO_1$. В положении, указанном на рис. 2.36, определить угловую скорость и угловое ускорение коромысла $CO_1$, если $\omega_{OA} = 2$ рад/с; $\varepsilon_{OA} = 4$ рад/с$^2$; $OA = 0{,}8$ м; $r_1 = 0{,}4$ м; $AB = 0{,}2$ м; $BC = 0{,}6$ м. Для этого же положения определить ускорение точки $C$.

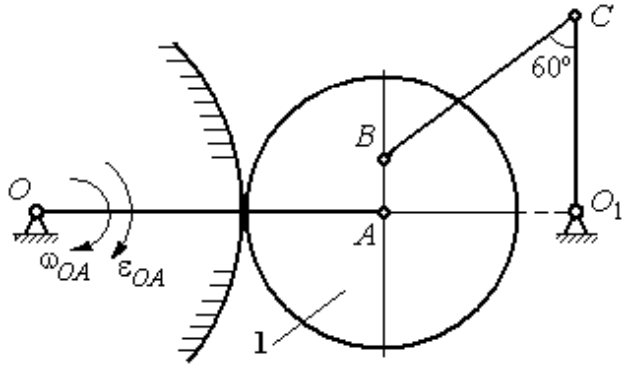


Рис. 2.36. Механизм качалки

*Решение*

Найдём угловые скорости звеньев механизма.

Скорость точки $A$ кривошипа $V_A = \omega_{OA} \cdot OA = 1{,}6$ м/с. Вращаясь, кривошип передаёт движение шестерне 1, которая катится по неподвижной поверхности. Точка касания $P_1$ шестерни с неподвижной поверхностью является мгновенным центром скоростей шестерни. Тогда её угловая скорость $\omega_1 = \dfrac{V_A}{AP_1} = 4$ рад/с. Направление угловой скорости показано на рис. 2.37 дуговой стрелкой $\omega_1$.

Расстояние от мгновенного центра скоростей шестерни до её точки $B$ $P_1B$ = 0,45 м. Скорость точки $B$: $V_B = \omega_1 \cdot P_1B =$ 1,8 м/с. Вектор скорости $\vec{V}_B$ перпендикулярен линии $P_1B$ и направлен в сторону вращения шестерни.

При вращении коромысла $CO_1$ вокруг неподвижной оси $O_1$ вектор скорости $\vec{V}_C$ перпендикулярен коромыслу. Точка $P_2$, лежащая на пересечении перпендикуляров, восстановленных к векторам $\vec{V}_B$ и $\vec{V}_C$ – скоростей точек $B$ и $C$, является мгновенным центром скоростей шатуна $BC$ (рис. 2.37). Расстояние $BK = BC\cos 30^\circ = 0{,}52$ м; $\cos\alpha = \dfrac{AP_1}{BP_1} = 0{,}89$; $P_2B = \dfrac{BK}{\cos\alpha} = 0{,}58$ м. Угловая скорость шатуна $\omega_{BC} = \dfrac{V_B}{BP_2} = 3{,}1$ рад/с. Направление угловой скорости шатуна показано на рис. 2.37 дуговой стрелкой $\omega_{BC}$.

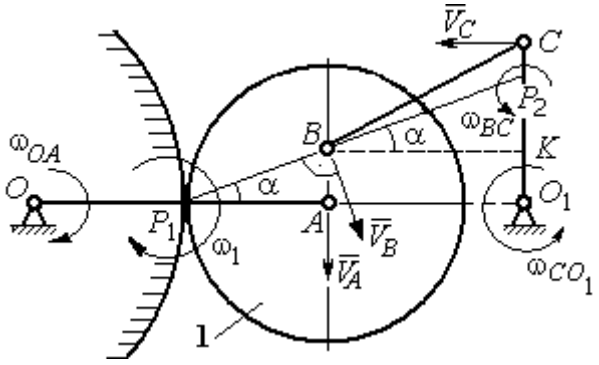



Рис. 2.37. Расчётная схема для определения угловых скоростей звеньев механизма

Расстояние $P_2C = BC \cdot \sin 30^\circ - P_2B \cdot \sin\alpha = 0{,}04$ м. Скорость точки $C$ шатуна $BC$: $V_C = \omega_{BC} \cdot P_2C = 0{,}12$ м/с. Длина коромысла $CO_1 = CK + KO_1 = 0{,}5$ м, угловая скорость коромысла $\omega_{CO_1} = \dfrac{V_C}{CO_1} = 0{,}24$ рад/с.

Найдём ускорения звеньев механизма.

Считая, что точка $C$ принадлежит шатуну $BC$, выразим ускорение точки $C$ через полюс $B$: $\vec{a}_C = \vec{a}_B + \vec{a}^{\,n}_{CB} + \vec{a}^{\,\tau}_{CB}$, где $\vec{a}_B$ – ускорение полюса $B$; $\vec{a}^{\,n}_{CB}$, $\vec{a}^{\,\tau}_{CB}$ – нормальная и касательная составляющие вектора ускорения точки $C$ при вращении шатуна вокруг полюса $B$.

Полагая, что точка $B$ принадлежит шестерне 1, выразим её ускорение через полюс $A$: $\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}^{\,n}_{BA} + \vec{a}^{\,\tau}_{BA}$, где $\vec{a}_A$ – ускорение точки $A$ шестерни; $\vec{a}^{\,n}_{BA}$

, $\vec{a}_{BA}^{\tau}$ – нормальная и касательная составляющие вектора ускорения точки $B$ при вращении шестерни вокруг полюса $A$.

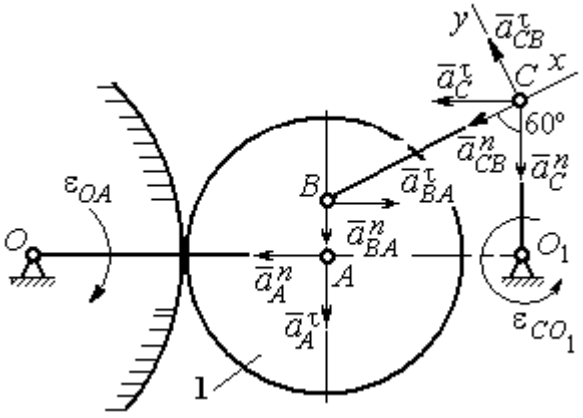



Рис. 2.38. Расчётная схема для определения ускорений точек механизма

Поскольку точка $A$ принадлежит и кривошипу $OA$, а точка $C$ – коромыслу $CO_1$, вращающихся вокруг своих неподвижных осей, вектора ускорений этих точек можно представить в виде сумм векторов:

$$\vec{a}_A = \vec{a}_A^{\,n} + \vec{a}_A^{\,\tau},\ \vec{a}_C = \vec{a}_C^{\,n} + \vec{a}_C^{\,\tau},$$

где $\vec{a}_A^{\,n}$, $\vec{a}_A^{\,\tau}$ – нормальная и касательная составляющие вектора ускорения точки $A$ при вращении кривошипа вокруг оси $O$; $\vec{a}_C^{\,n}$, $\vec{a}_C^{\,\tau}$ – нормальная и касательная составляющие вектора ускорения точки $C$ при вращении коромысла вокруг оси $O_1$.

В результате подстановок получим полное векторное равенство, связывающее ускорения точек механизма:

$$\vec{a}_C^{\,n} + \vec{a}_C^{\,\tau} = \vec{a}_{CB}^{\,n} + \vec{a}_{CB}^{\,\tau} + \vec{a}_{BA}^{\,n} + \vec{a}_{BA}^{\,\tau} + \vec{a}_A^{\,n} + \vec{a}_A^{\,\tau}.$$

Направления векторов ускорений показаны на рис. 2.38.

Модули векторов ускорений:

$$a_C^n = \omega_{CO_1}^2 \cdot CO_1 = 0{,}03 \text{ м/с}^2;\ \ a_{CB}^n = \omega_{CB}^2 \cdot CB = 5{,}77 \text{ м/с}^2,$$

$$a_A^n = \omega_{OA}^2 \cdot OA = 3{,}2 \text{ м/с}^2;\ a_A^{\tau} = \varepsilon_{OA} \cdot OA = 3{,}2 \text{ м/с}^2,$$

$$a_{BA}^n = \omega_1^2 \cdot BA = 3{,}2 \text{ м/с}^2;\ \ a_{BA}^{\tau} = \varepsilon_1 \cdot BA.$$

Для определения $\varepsilon_1$ углового ускорения шестерни 1 продифференцируем равенство $V_A = \omega_1 \cdot AP_1 = \omega_1 r_1$. Получим: $a_A^{\tau} = \varepsilon_1 r_1$, откуда $\varepsilon_1 = \dfrac{a_A^{\tau}}{r_1} = 8$ рад/с$^2$.

Тогда $a_{BA}^{\tau} = 1{,}6$ м/с$^2$.

Неизвестными в векторном равенстве ускорений остаются модули векторов $\vec{a}^{\tau}_{CB}$ и $\vec{a}^{\tau}_{C}$. Выберем ось *x* вдоль шатуна *BC*, как показано на рис. 2.38, и спроектируем на неё полное векторное равенство.

Получим уравнение:

$$-a^{n}_{C}\cos 60^{\circ} - \vec{a}^{\tau}_{C}\cos 30^{\circ} = -a^{n}_{CB} - a^{n}_{BA}\cos 60^{\circ} + a^{\tau}_{BA}\cos 30^{\circ} - a^{n}_{A}\cos 30^{\circ} - a^{\tau}_{A}\cos 60^{\circ},$$

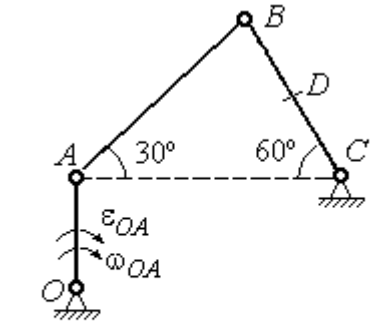
откуда найдём ускорение $a^{\tau}_{C}$ = 11,94 м/с$^2$. Угловое ускорение качалки

$$\varepsilon_{CO_1} = \frac{\left|a^{\tau}_{C}\right|}{CO_1} = 23{,}88 \text{ рад/с}^2.$$

Положительное значение касательного ускорения $a^{\tau}_{C}$ свидетельствует о том, что направление вектора ускорения $\vec{a}^{\tau}_{C}$ совпадает с направлением, показанным на рис. 2.38. В эту же сторону направлена и скорость $\vec{V}_C$ точки *C* (см. рис. 2.37). Следовательно, в данном положении движение качалки ускоренное и угловое ускорение направлено в сторону угловой скорости.

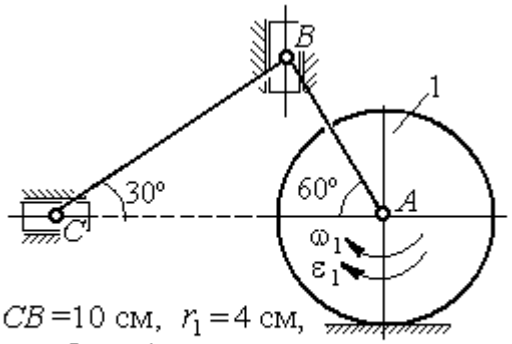
## Упражнения

Упражнения 2.9




$OA = 4$ см, $BD = DC = 4$ см,
$\omega_{OA} = 3$ рад/с, $\varepsilon_{OA} = 2$ рад/с$^2$.
Найти ускорение точки *D*

Упражнения 2.10




$CB = 10$ см, $r_1 = 4$ см,
$\omega_1 = 3$ рад/с, $\varepsilon_1 = 2$ рад/с$^2$.
Найти ускорение точки *C*

Рис. 2.39. Задания для самостоятельного решения. Упражнения 2.9, 2.10

# 3. СЛОЖНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТОЧКИ

## 3.1. Основные понятия и определения сложного движения точки

Рассматривается подвижное твердое тело и точка, перемещающаяся относительно тела.

Неподвижная система координат, относительно которой определяются движения точки и тела, называется **основной**. Связанная с телом и движущаяся вместе с ним система координат называется **подвижной.**

Движение точки относительно подвижной системы координат (фактически движение точки относительно тела) называется **относительным**. **Переносным** движением называют движение, которое совершает точка вместе с подвижной системой координат (фактически вместе с телом). Движение точки относительно основной (неподвижной) системы координат называется **абсолютным.**

Скорость точки относительно подвижной системы координат называют **относительной скоростью**, ускорение – **относительным ускорением**.

**Переносной скоростью** точки и **переносным ускорением** называют скорость и ускорение той точки тела, с которой в данный момент совпадает движущаяся точка.

Скорость и ускорение точки относительно основной системы называют **абсолютной скоростью и абсолютным ускорением.**

При вычислении абсолютной скорости используется теорема о сложении скоростей: **скорость абсолютного движения точки равна векторной сумме переносной и относительной скоростей:** $\vec{V} = \vec{V}_e + \vec{V}_r$, где $\vec{V}$, $\vec{V}_e$, $\vec{V}_r$ – вектора абсолютной, переносной и относительной скоростей точки.

При вычислении абсолютного ускорения используется теорема Кориолиса о сложении ускорений: **абсолютное ускорение точки равно векторной сумме трех ускорений – относительного, переносного и ускорения Кориолиса:** $\vec{a} = \vec{a}_e + \vec{a}_r + \vec{a}_к$, где $\vec{a}$ – вектор абсолютного ускорения точки; $\vec{a}_e, \vec{a}_r$ – вектора

соответственно переносного и относительного ускорений точки; $\vec{a}_{\text{к}}$ – вектор ускорения Кориолиса.

Вектор ускорения Кориолиса определяется векторным произведением: $\vec{a}_{\text{к}} = 2(\vec{\omega}_e \times \vec{V}_r)$, где $\vec{\omega}_e$ – вектор угловой скорости переносного движения; $\vec{V}_r$ – вектор относительной скорости точки. Модуль ускорения Кориолиса: $|\vec{a}_{\text{к}}| = 2|\vec{\omega}_e| \cdot |\vec{V}_r| \sin\alpha$, где $\alpha$ – угол между вектором угловой скорости переносного движения $\vec{\omega}_e$ и вектором относительной скорости точки $\vec{V}_r$ (рис. 3.1).

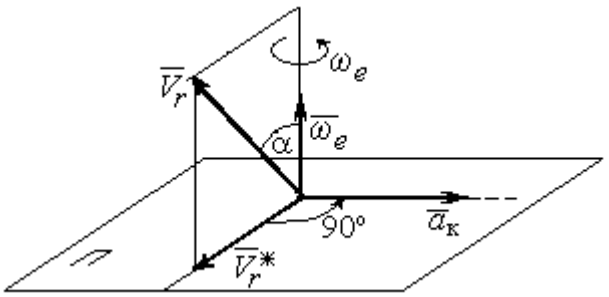


Рис. 3.1. Определение ускорения Кориолиса по правилу Жуковского

На рис. 3.1 показан способ определения вектора ускорения Кориолиса по правилу Н. Е. Жуковского. Правило состоит в следующем. Построим плоскость *П*, перпендикулярную вектору угловой скорости $\vec{\omega}_e$, и спроектируем вектор относительной скорости $\vec{V}_r$ на эту плоскость. Проекцию обозначим $\vec{V}_r^*$ (см. рис. 3.1). Чтобы получить направление ускорения Кориолиса, следует вектор проекции относительной скорости $\vec{V}_r^*$ повернуть на 90° в плоскости *П* вокруг оси переносного вращения в направлении этого вращения.

Если сложное движение точки происходит в плоскости, перпендикулярной оси переносного вращения, направление ускорения Кориолиса можно получить простым поворотом вектора относительной скорости на угол 90° вокруг оси переносного вращения в направлении этого вращения. При этом модуль ускорения Кориолиса $a_{\text{к}} = 2|\omega_e| \cdot |V_r| \sin 90^\circ = 2\omega_e V_r$.

**Примеры решения задач на сложное движение точки**

**Задача 37.** Компрессор с криволинейными каналами (рис. 3.2) вращается с постоянной угловой скоростью $\omega = 10$ рад/с вокруг оси *O*, перпендикулярной плоскости рисунка. Воздух перемещается по каналу *AB* с постоянной относительной скоростью $V_r = 4$ м/с. Найти ускорение частицы воздуха в начале канала в точке *A* и проекции этого ускорения на оси неподвижной системы координат *xOy*, если радиус $OA = 0{,}5$ м, радиус кривизны канала в точке *A* $\rho = 0{,}8$ м, угол между нормалью *n* к кривой *AB* в точке *A* и радиусом *OA* $\alpha = 30^\circ$.

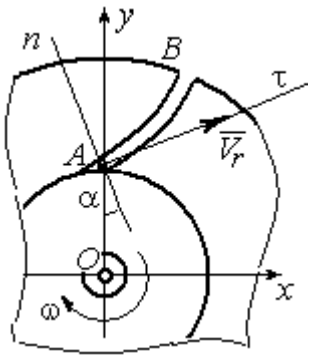


Рис.3.2. Движение воздуха по каналу компрессора

*Решение*

Переносным движением для частицы воздуха будет вращательное движение компрессора, а скорость точки *A* компрессора, где по условию находится частица воздуха, будет её переносной скоростью: $V_e = \omega \cdot OA = 5$ м/с. Вектор $\vec{V}_e$ переносной скорости частицы перпендикулярен радиусу *OA* и направлен в сторону угловой скорости вращения компрессора (рис. 3.3).

Вектор $\vec{V}_r$ относительной скорости частицы воздуха направлен вдоль касательной к кривой *AB* (стенки канала) в точке *A*.

Вектор абсолютной скорости частицы воздуха равен геометрической сумме векторов относительной и переносной скоростей: $\vec{V} = \vec{V}_r + \vec{V}_e$ (см. рис. 3.3). Спроектируем это векторное равенство на оси *x*, *y*. Получим систему уравнений:

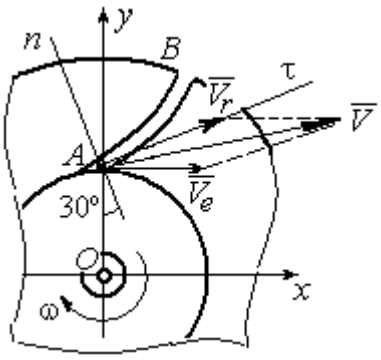


Рис. 3.3. Построение вектора абсолютной скорости частицы

$$V_x = V_e + V_r \cos 30^\circ = 8{,}46 \text{ м/с}; \; V_y = V_r \cos 60^\circ = 2 \text{ м/с}.$$

Модуль абсолютной скорости $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = 8{,}69$ м/с.

Найдём ускорение частицы воздуха.

Абсолютное ускорение частицы определяется по теореме сложения ускорений:

$$\vec{a} = \vec{a}_r + \vec{a}_e + \vec{a}_к.$$

В относительном движении частица движется между стенками канала по криволинейной траектории, и её ускорение $\vec{a}_r$ представляется суммой: $\vec{a}_r = \vec{a}_r^{\,n} + \vec{a}_r^{\,\tau}$, где $\vec{a}_r^{\,n}$, $\vec{a}_r^{\,\tau}$ – вектора нормальной и касательной составляющих относительного ускорения частицы.

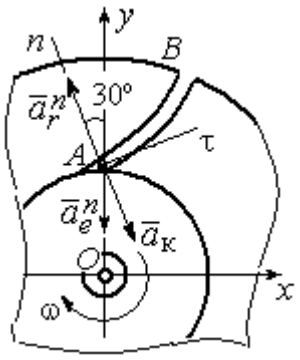


Рис. 3.4. Составляющие ускорения частицы в сложном движении

Переносное ускорение частицы $\vec{a}_e$ есть ускорение точки $A$ вращающегося компрессора, которое выражается суммой $\vec{a}_e = \vec{a}_e^{\,n} + \vec{a}_e^{\,\tau}$, где $\vec{a}_e^{\,n}$, $\vec{a}_e^{\,\tau}$ – вектора нормальной и касательной составляющих переносного ускорения частицы.

В результате абсолютное ускорение частицы воздуха в точке А выражается векторной суммой:

$$\vec{a} = \vec{a}_r^{\,n} + \vec{a}_r^{\,\tau} + \vec{a}_e^{\,n} + \vec{a}_e^{\,\tau} + \vec{a}_к.$$

Вычислим модули ускорений:

$$a_r^{\tau} = \dot{V}_r = 0,\ a_r^{n} = \frac{V_r^2}{\rho} = 20\ \text{м/с}^2;\ a_e^{\tau} = \varepsilon \cdot OA = \dot{\omega} \cdot OA = 0,$$

$$a_e^{n} = \omega^2 r = 50\ \text{м/с}^2;\ a_к = 2\omega V_r = 80\ \text{м/с}^2.$$

Направление ускорения Кориолиса определяется простым поворотом вектора относительной скорости на угол 90° вокруг оси переносного вращения в направлении этого вращения. Вектора ускорений показаны на рис. 3.4.

Спроектируем векторное равенство ускорения частицы на оси неподвижной системы координат *xOy*. Получим:

$$a_x = -a_r^{n}\cos 60^\circ + a_к \cos 60^\circ = 30\ \text{м/с}^2;$$

$$a_y = a_r^n \cos 30^\circ - a_e^n - a_к \cos 30^\circ = -101{,}96 \text{ м/с}^2.$$

Модуль ускорения $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = 106{,}28$ м/с$^2$.

**Задача 38.** При совмещении работы механизмов подъёма груза и поворота крана (рис. 3.5) груз $A$ перемещается в горизонтальном и вертикальном направлениях. На участке разгона барабан $B$ радиуса $r_1 = 0{,}5$ м, на который навит канат, поддерживающий груз, вращается с постоянным угловым ускорением $\varepsilon_1 = 3$ рад/с$^2$, а кран разворачивается вокруг оси $O_1O_2$ с угловым ускорением $\varepsilon_2 = 0{,}5$ рад/с$^2$.

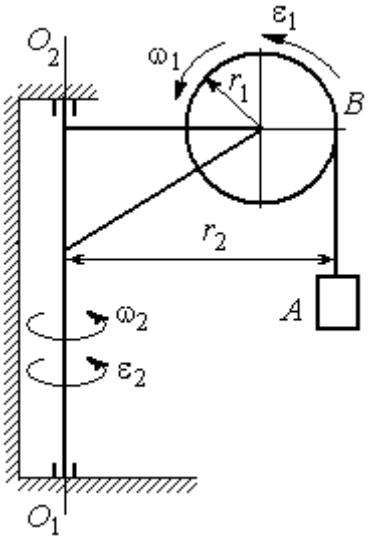


Рис. 3.5. Механизм поворотного крана

Пренебрегая отклонением каната от вертикали, определить скорость и ускорение груза в момент времени $t_1 = 1$ с, если вылет стрелы крана до линии подвеса груза $r_2 = 10$ м.

*Решение*

Подъём груза $A$ на канате является для груза относительным движением, а вращение крана – переносным. Вектор абсолютной скорости груза равен сумме $\vec{V} = \vec{V}_r + \vec{V}_e$, где вектора относительной $\vec{V}_r$ и переносной $\vec{V}_e$ скоростей.

При равноускоренном вращении барабана $B$ из состояния покоя его угловая скорость $\omega_1 = \varepsilon_1 t$. В момент времени $t_1 = 1$ с $\omega_1 = 3$ рад/с. Скорость подъёма груза $A$ в этот момент $V_r(1) = \omega_1(1) r_1 = 1{,}5$ м/с. Вектор относительной скорости $\vec{V}_r$ направлен вдоль линии движения груза, в сторону его подъёма (рис. 3.6).

Угловая скорость крана при постоянном угловом ускорении $\omega_2 = \varepsilon_2 t$. При $t_1$ = 1 с $\omega_2$ = 0,5 рад/с. Переносная скорость груза $A$ равна скорости груза, движущегося вместе со стрелой крана по окружности радиуса $r_2$: $V_e = \omega_2 r_2$ = 5 м/с. Вектор переносной скорости груза $\vec{V}_e$ направлен по касательной к траектории переносного движения груза в сторону угловой скорости вращения крана (см. рис. 3.6).

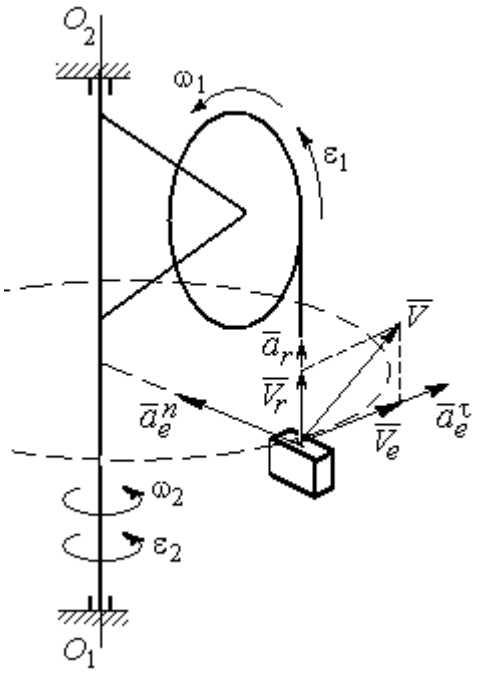



Рис. 3.6. Расчётная схема для определения скорости и ускорения груза на поворотном кране

Так как вектора относительной и переносной скоростей груза взаимно перпендикулярны, модуль абсолютной скорости $V = \sqrt{V_r^2 + V_e^2}$ = 5,22 м/с.

Найдём абсолютное ускорение груза.

Теорема сложения ускорений имеет вид векторной суммы: $\vec{a} = \vec{a}_r + \vec{a}_e + \vec{a}_к = \vec{a}_r^n + \vec{a}_r^\tau + \vec{a}_e^n + \vec{a}_e^\tau + \vec{a}_к$, где $\vec{a}_r^n$, $\vec{a}_r^\tau$, $\vec{a}_e^n$, $\vec{a}_e^\tau$, $\vec{a}_к$ – вектора нормального и касательного ускорений груза в относительном и переносном движениях и ускорение Кориолиса. Найдём модули векторов ускорений.

Нормальное относительное ускорение $a_r^n$ груза, движущегося прямолинейно, равно нулю: $a_r^n$ = 0, а касательное $a_r^\tau$ равно по величине касательному ускорению точки на поверхности барабана: $a_r^\tau = \varepsilon_1 r_1$ = 1,5 м/с$^2$. Направление вектора $\vec{a}_r^\tau$ относительного касательного ускорения груза определяется направлением углового ускорения барабана.

Переносные нормальное $a_e^n$ и касательное $a_e^\tau$ ускорения груза: $a_e^n = \omega_2^2 r_2$ = 2,5 м/с$^2$; $a_e^\tau = \varepsilon_2 r_2$ = 5 м/с$^2$. Вектор касательного ускорения $\vec{a}_e^\tau$ направлен в сторону углового ускорения вращения крана.

Ускорение Кориолиса $a_к$ равно нулю, так как вектор $\vec{V}_r$ параллелен вектору $\vec{\omega}_2$: $a_к = 0$.

Направления векторов ускорений, модули которых отличны от нуля, показаны на рис. 3.6. В результате вектор абсолютного ускорения груза представлен в виде разложения на три взаимно перпендикулярных вектора: $\vec{a} = \vec{a}_e^n + \vec{a}_e^\tau + \vec{a}_r^\tau$, поэтому модуль абсолютного ускорения груза $a = \sqrt{(a_e^n)^2 + (\vec{a}_e^\tau)^2 + (\vec{a}_r)^2}$ = 5,79 м/с$^2$.

**Задача 39.** Фигура, состоящая из половины диска и построенного на его диаметре равнобедренного треугольника (рис. 3.7), вращается вокруг оси, перпендикулярной плоскости фигуры и проходящей через вершину $A$ треугольника, по закону $\varphi_e = 5t - 2t^2$ рад. Положительное направление вращения отмечено на схеме дуговой стрелкой $\varphi$.

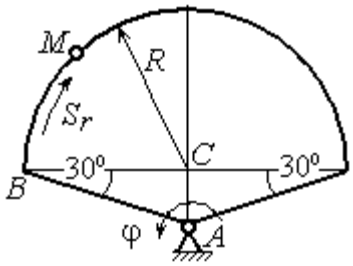


Рис. 3.7. Схема сложного движения точки

По ободу диска из начального положения B движется точка $M$. Уравнение движения точки: $B\breve{M} = S_r = 9\pi t^2$, см.. Положительное направление отсчёта дуги $BM$ показано дуговой стрелкой $S_r$ (см. рис. 3.7). Радиус диска $R$ = 9 см. Найти абсолютную скорость и абсолютное ускорение точки $M$ в момент времени $t_1$ = 1 с.

*Решение*

Переносным движением точки $M$ является вращение фигуры вокруг оси $A$, относительным – её движение по окружности обода диска.

Положение точки $M$ на окружности определяется центральным углом: $\alpha = \frac{S_r}{R}$, где $S_r$ – длина дуги окружности, пройденная точкой. В момент времени $t_1 = 1$ с $S_r = 9\pi$ см и $\alpha = \pi$. Расчётное положение точки $M$ на рис. 3.8 обозначено $M_1$.

Угловая скорость вращения фигуры равна модулю производной $\omega_e = |\dot{\varphi}_e| = |5 - 4t|$. При $t_1 = 1$ с $\omega_e(1) = 1$ рад/с. Направление угловой скорости определяется знаком производной $\dot{\varphi}_e$. Положительная на данный момент времени величина производной ($\dot{\varphi}_e = 1$) показывает, что вращение фигуры происходит в положительном направлении отсчёта угла $\varphi_e$ и отмечено на рис. 3.8 дуговой стрелкой $\omega_e$.

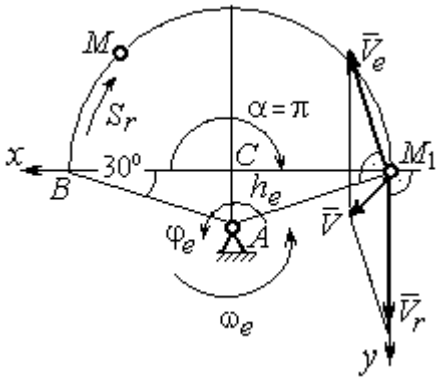


Рис. 3.8. Расчетная схема для вычисления абсолютной скорости точки

Переносная скорость точки $V_e$ – это скорость расчётного положения точки $M$ вращающейся фигуры: $V_e = \omega_e h_e = = \omega_e AM_1 = \frac{\omega_e R}{\cos 30^\circ} = 10{,}39$ см/с. Вектор переносной скорости точки $\vec{V}_e$ перпендикулярен отрезку $AM_1$ и направлен в сторону вращения фигуры (см. рис. 3.8).

Скорость точки в относительном движении определяется как модуль производной: $V_r = |\dot{S}_r| = |18\pi t|$. При $t_1 = 1$ с $V_r = 56{,}5$ см/с. Положительное значение производной $\dot{S}_r = 18\pi > 0$ указывает, что в этот момент времени относительное движение точки происходит в положительном направлении отсчёта дуги окружности, по которой движется точка. Вектор $\vec{V}_r$ относительной скорости точки перпендикулярен отрезку $CM_1$ и направлен в сторону её движения.

Абсолютная скорость точки равна сумме векторов переносной и относительной скоростей $\vec{V} = \vec{V}_e + \vec{V}_r$. Для того чтобы найти абсолютную скорость точки, выберем оси координат $M_1x$, $M_1y$, как показано на рис. 3.8, и спроектируем обе части векторного равенства теоремы сложения скоростей на эти оси:

$$V_x = V_e \cos 60^\circ = 5{,}2 \text{ см/с}, \; V_y = -V_e \cos 30^\circ + V_r = 47{,}5 \text{ см/с}.$$

Модуль абсолютной скорости: $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = 47{,}8$ см/с.

Абсолютное ускорение точки определяется по теореме сложения ускорений: $\vec{a} = \vec{a}_e + \vec{a}_r + \vec{a}_к$.

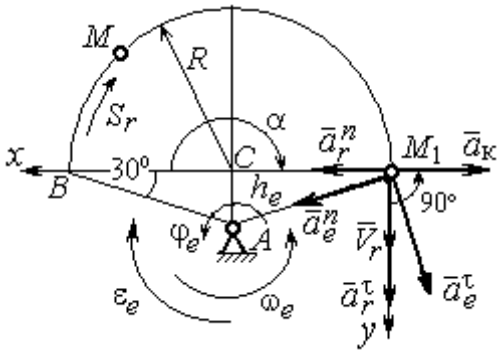



Рис. 3.9. Расчетная схема для определения абсолютного ускорения точки

Переносное ускорение точки представляется в виде суммы: $\vec{a}_e = \vec{a}_e^{\,\tau} + \vec{a}_e^{\,n}$, где $\vec{a}_e^{\,\tau}$ и $\vec{a}_e^{\,n}$ – переносные касательное и нормальное ускорения. В относительном движении точки (по дуге окружности) ускорение также может быть разложено на две составляющие – относительные касательное и нормальное ускорения: $\vec{a}_r = \vec{a}_r^{\,\tau} + \vec{a}_r^{\,n}$. В результате теорема о сложении ускорений приобретает вид: $\vec{a} = \vec{a}_r^{\,\tau} + \vec{a}_r^{\,n} + \vec{a}_e^{\,\tau} + \vec{a}_e^{\,n} + \vec{a}_к$.

Вычислим модули и направления векторов ускорений в расчётном положении точки $M_1$.

Относительное касательное ускорение $a_r^\tau$ вычисляется по формуле: $a_r^\tau = \left|\ddot{S}_r\right|$, где $\ddot{S}_r = 18\pi = 56{,}5$ см/с$^2$. Так как значение второй производной $\ddot{S}_r$ положительно, вектор ускорения $\vec{a}_r^{\,\tau}$ направлен по касательной в сторону положительного отсчёта траектории относительного движения. Относительное

нормальное ускорение точки $a_r^n$ вычисляется по формуле: $a_r^n = \frac{V_r^2}{R}$ и в момент $t_1$ = 1 с равно 355,3 см/с$^2$. Вектор ускорения $\vec{a}_r^n$ направлен по радиусу диска к центру $C$ (рис. 3.9).

Угловое ускорение фигуры в момент времени $t_1$ = 1 с, $\varepsilon_e = |\ddot{\varphi}_e|$ = 4 рад/с$^2$. Поскольку значение второй производной угла поворота отрицательное ($\ddot{\varphi}_e = -4$ рад/с$^2$), то угловое ускорение направлено в сторону, противоположную положительному направлению отсчёта угла поворота фигуры, как показано на рис. 3.9 дуговой стрелкой $\varepsilon_e$. Модуль переносного касательного ускорения $a_e^\tau$ определяется по формуле $a_e^\tau = \varepsilon_e h_e = \varepsilon_e \cdot AM_1$ и в момент времени $t_1$ = 1 с равен 41,6 см/с$^2$. Вектор переносного касательного ускорения точки $\vec{a}_e^\tau$ перпендикулярен $AM_1$ и направлен в сторону углового ускорения фигуры $\varepsilon_e$ (см. рис. 3.9). Переносное нормальное ускорение вычисляется по формуле $a_e^n = \omega_e^2 h_e = \omega_e^2 \cdot AM_1$ и на момент времени $t_1$ = 1 с: $a_e^n$ = 10,4 см/с$^2$. Вектор переносного нормального ускорения $\vec{a}_e^n$ направлен вдоль отрезка $M_1A$ к оси вращения тела (см. рис. 3.9).

Модуль ускорения Кориолиса в момент времени $t_1$ = 1 с $a_к = 2\omega V_r$ = =113,1 см/с$^2$. По условию задачи вектор $\vec{V}_r$ скорости относительного движения точки перпендикулярен вектору $\vec{\omega}_e$ угловой скорости переносного движения. В этом случае для определения направления ускорения Кориолиса достаточно повернуть вектор относительной скорости $\vec{V}_r$ на 90° в сторону переносного движения (см. рис. 3.9).

Для определения абсолютного ускорения точки выберем оси $M_1x$ и $M_1y$, как показано на рис. 3.9, и спроектируем обе части векторного равенства теоремы сложения ускорений на эти оси. Получим:

$$a_x = -a_e^\tau \cos 60^\circ + a_e^n \cos 30^\circ + a_r^n - a_к = 230{,}4 \text{ см/с}^2;$$

$$a_y = a_e^{\tau}\cos 30^\circ + a_e^{n}\cos 60^\circ + a_r^{\tau} = 97{,}9 \text{ см/с}^2.$$

Модуль абсолютного ускорения

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = 250{,}3 \text{ см/с}^2.$$

**Задача 40.** Диск (рис. 3.10) вращается вокруг оси $O_1O_2$, проходящей вдоль вертикального диаметра, с угловой скоростью $\omega = 2t^2 + 4\cos\pi t$ рад/с. Положительное направление отсчёта угла поворота диска отмечено на схеме дуговой стрелкой $\varphi$. Вдоль другого диаметра диска, наклоненного под углом 30º к вертикальному, движется точка $M$ по закону $CM = S_r = (4t-1)^2 - 1$ см. Расстояние отсчитывается от точки $C$ на краю диска. Положительное направление движения точки $M$ показано стрелкой $S_r$. Радиус диска $R$ = 4 см. Найти абсолютную скорость и абсолютное ускорение точки $M$ в момент времени $t_1$ = 1 с.

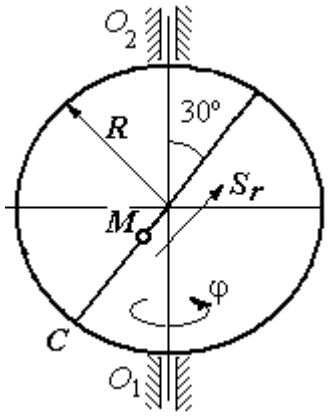


Рис. 3.10. Схема сложного движения точки

*Решение*

Переносным движением точки $M$ является вращение диска вокруг вертикального диаметра, относительным – её прямолинейное движение вдоль наклонного диаметра диска.

Расстояние $S_r$, пройденное точкой, к моменту времени $t_1$ = 1 с равно 8 см. При радиусе диска $R$ = 4 см точка $M$ в данный момент времени находится на противоположном от точки $C$ конце диаметра. На рис. 3.11 это положение обозначено буквой $M_1$.

Угловая скорость диска равна модулю производной: $\omega = |\dot{\varphi}| = |2 + 4\cos\pi|$ и при $t_1$ = 1 с $\omega$ = 2 рад/с. Направление угловой скорости определяется по знаку производной $\dot{\varphi}$. В данном случае производная имеет отрицательное значение ($\dot{\varphi}$ = – 2 рад/с). Это означает, что вращение диска происходит в сторону,

противоположную положительному направлению отсчёта угла поворота. Направление угловой скорости диска в данный момент времени отмечено на рис. 3.11 дуговой стрелкой $\omega$.

Переносная скорость точки $V_e$ – это скорость точки $M_1$ на вращающемся диске: $V_e = \omega h_e = \omega \cdot KM_1$, где $KM_1 = h_e$ – расстояние от оси вращения диска до точки $M_1$. Очевидно, $KM_1 = 0{,}5R = 2$ см. При $t_1 = 1$ с величина переносной скорости $V_e = 4$ см/с. Вектор переносной скорости $\vec{V}_e$ перпендикулярен плоскости диска $O_1M_1O_2$ и направлен в сторону вращения диска (рис. 3.11, *a*).

(На рис. 3.11, *a* символ $\odot$ рядом с вектором означает, что данный вектор направлен перпендикулярно плоскости рисунка «к нам», символ $\oplus$ – «от нас».)

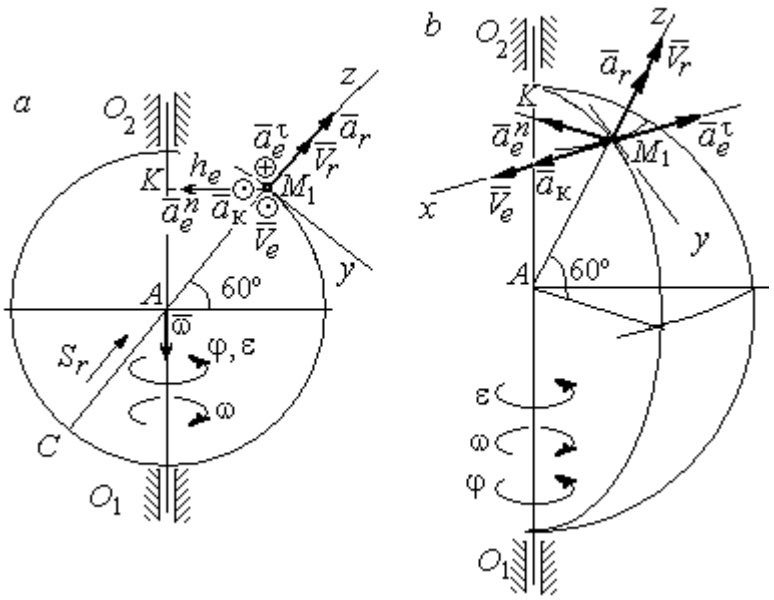



Рис. 3.11. Расчётная схема определения абсолютной скорости и ускорения точки:
*a* – плоская модель движения;
*b* – пространственная модель движения

Относительная скорость точки равна модулю производной: $V_r = \left|\dot{S}_r\right| = = \left|8(4t-1)\right|$. При $t_1 = 1$ с $V_r = 24$ см/с. Положительное значение самой производной $\dot{S}_r$ указывает, что относительное движение точки в данный момент времени происходит в положительном направлении. Вектор $\vec{V}_r$ относительной скорости точки в положении $M_1$ направлен вдоль диаметра диска $CM_1$ в сторону движения.

Абсолютная скорость точки равна сумме векторов переносной и относительной скоростей: $\vec{V} = \vec{V}_e + \vec{V}_r$. Так как векторы $\vec{V}_e$ и $\vec{V}_r$ взаимно

перпендикулярны, модуль абсолютной скорости $V = \sqrt{V_e^2 + V_r^2} =$ 24,33 см/с. Вектор абсолютной скорости на рис. 3.11 не показан.

Абсолютное ускорение точки определяется векторной суммой, которая при прямолинейном относительном и вращательном переносном движениях представляется в виде: $\vec{a} = \vec{a}_r + \vec{a}_e^{\tau} + \vec{a}_e^{n} + \vec{a}_{\text{к}}$.

Относительное ускорение точки $a_r = \left|\ddot{S}_r\right|$ = 32 см/с$^2$. Так как значение второй производной $\ddot{S}_r$ положительно, вектор ускорения $\vec{a}_r$ в точке $M_1$ направлен по линии движения точки в сторону положительного направления (см. рис. 3.11).

Угловое ускорение диска $\varepsilon = \left|\dot{\omega}\right| = \left|4t - 4\pi\sin\pi t\right|$. В момент времени $t_1$ = 1 с $\varepsilon$ = 4 рад/с$^2$. Положительное значение производной в данный момент времени ($\dot{\omega}$ = 4 рад/с$^2$) означает, что угловое ускорение $\varepsilon$ направлено в сторону положительного направления отсчёта угла поворота диска. Направление углового ускорения показано на рис. 3.11 дуговой стрелкой $\varepsilon$. Модуль переносного касательного ускорения $a_e^{\tau}$ определяется по формуле $a_e^{\tau} = \varepsilon h_e$, и при $t_1$ = 1 с $a_e^{\tau}$ = 8 см/с$^2$. Вектор ускорения $\vec{a}_e^{\tau}$ перпендикулярен плоскости диска $O_1M_1O_2$ в точке $M_1$ и направлен в сторону углового ускорения (противоположно вектору скорости).

Переносное нормальное ускорение $a_e^{n}$ рассчитывается по формуле $a_e^{n} = \omega^2 h_e = \omega^2 \cdot KM_1$, и при $t_1$ = 1 с $a_e^{n}$ = 8 см/с$^2$. Вектор переносного нормального ускорения $\vec{a}_e^{n}$ направлен вдоль отрезка $M_1K$ к оси вращения диска (см. рис. 3.11).

Вектор скорости относительного движения точки $\vec{V}_r$ составляет с вектором угловой скорости переносного движения $\vec{\omega}$ угол 150º. Модуль ускорения Кориолиса на момент времени $t_1$ = 1 с $a_{\text{к}} = 2\left|\omega\right|\left|V_r\right|\sin 150^\circ =$ 48 см/с$^2$.

Направление вектора ускорения Кориолиса определяем по правилу Жуковского. Так, вектор относительной скорости точки $\vec{V}_r$ проектируем на плоскость, перпендикулярную вектору $\vec{\omega}$ (т. е. на плоскость, перпендикулярную оси вращения тела). На рис 3.11, *а* это будет проекция на линию $KM_1$. Далее следует повернуть вектор проекции относительной скорости вокруг оси вращения на 90° в сторону угловой скорости вращения диска. На рис 1.11, *а* вектор ускорения Кориолиса перпендикулярен плоскости рисунка в точке $M_1$ и направлен «на нас».

Для определения абсолютного ускорения точки выберем оси координат $M_1x$, $M_1y$ и $M_1z$, как показано на рис. 3.11 (на рис. 3.11, *а* ось $M_1x$ направлена перпендикулярно рисунку «к нам» и на рисунке не показана). Спроектируем обе части векторного равенства теоремы сложения ускорений на оси

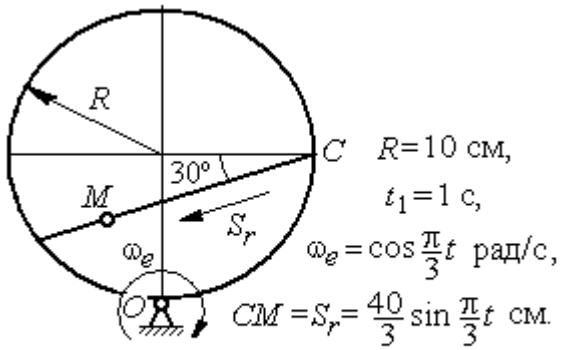
$$a_x = -a_e^{\tau} + a_{\text{к}} = 40 \text{ см/с}^2; \quad a_y = -a_e^{n}\cos 30^\circ = 6{,}93 \text{ см/с}^2;$$

$$a_z = a_r - a_e^{n}\cos 60^\circ = 28 \text{ см/с}^2.$$

Модуль абсолютного ускорения $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} = 49{,}32$ см/с$^2$.

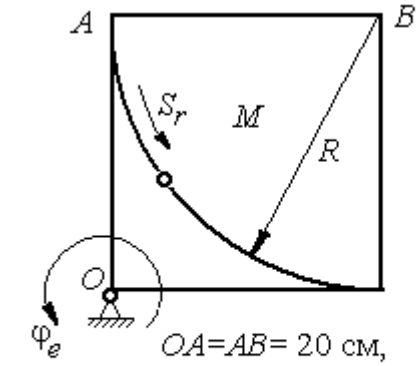
## Упражнения

Упражнение 3.1




Найти скорость и ускорение точки $M$ в момент $t = t_1$

Упражнение 3.2




$\overset{\smile}{AM} = S_r = 5\pi t^2$ см, $\varphi_e = t^2 - 5t$ рад.

Найти скорость и ускорение точки $M$ в момент $t = t_1 = 1$ с

Рис. 3.12. Задания для самостоятельного решения. Упражнения 3.1, 3.2

# 4. ДИНАМИКА ТОЧКИ

## 4.1. Дифференциальные уравнения движения точки

Движение материальной точки под действием системы сил $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$,…, $\vec{F}_K$ в прямоугольной декартовой системе координат *Oxyz* описывается **дифференциальными уравнениями:**

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = \sum F_{kx}, \; m\frac{d^2y}{dt^2} = \sum F_{ky}, \; m\frac{d^2z}{dt^2} = \sum F_{kz}.$$

Обозначая вторые производные от координат по времени двумя точками, уравнения движения можно записать в виде:

$$m\ddot{x} = \sum F_{kx}; \; m\ddot{y} = \sum F_{ky}; \; m\ddot{z} = \sum F_{kz},$$

где $m$ – масса точки; $x$, $y$, $z$ – текущие координаты точки; $\ddot{x}$, $\ddot{y}$, $\ddot{z}$ – проекции вектора ускорения точки на оси координат; $\sum F_{kx}$, $\sum F_{ky}$, $\sum F_{kz}$ – алгебраические суммы проекций всех сил на оси координат.

Для удобства интегрирования дифференциальные уравнения движения иногда представляют в виде:

$$m\frac{dV_x}{dt} = \sum F_{kx}; \; m\frac{dV_y}{dt} = \sum F_{ky}; \; m\frac{dV_z}{dt} = \sum F_{kz},$$

где $V_x = \dot{x}$, $V_y = \dot{y}$, $V_z = \dot{z}$ – проекции вектора скорости точки на оси координат.

В естественной системе координат движение материальной точки описывается уравнениями в естественной форме:

$$m\frac{dV}{dt} = \sum F_{k\tau}; \; m\frac{V^2}{\rho} = \sum F_{kn}; \; 0 = \sum F_{kb},$$

где $\rho$ – радиус кривизны траектории; $\tau$, $n$, $b$ – оси естественного трехгранника – касательная, нормаль и бинормаль.

В общем случае правые части дифференциальных уравнений зависят от времени, положения и скорости точки. Интегрирование дифференциальных уравнений производится в зависимости от их вида методами, известными из курса математики.

## Примеры решения задач на интегрирование уравнений движения

**Задача 41.** При обогащении по трению разделение частиц производится следующим образом. Барабанный питатель (рис. 4.1) сообщает частице в точке $A$ сортировочного стола $AB$ начальную скорость $V_0$, направленную вдоль поверхности стола, наклоненного под углом $\alpha$ к горизонту. Нижний край стола в точке $B$ поднят на высоту $h$ над уровнем пола. Частица скользит по столу, испытывая силу трения скольжения с коэффициентом трения $f$. Дойдя до края стола в точке $B$, частица отрывается от него и совершает свободное падение с высоты $h$. На каком расстоянии $CK = \ell$ на полу нужно установить стенку приёмного устройства, чтобы частицы с коэффициентом трения меньше заданного $f < f_1$ перелетали за точку $C$ и попадали в приёмник, а с большим коэффициентом $f > f_1$ – не долетали до него.

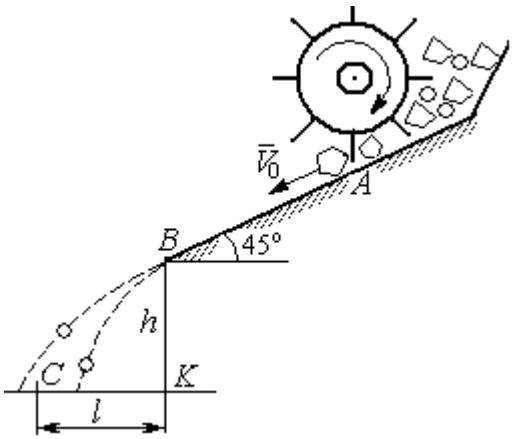


Рис. 4.1. Разделение частиц по трению

Начальная скорость частицы $V_0 = 1$ м/с, длина сортировочного стола $AB = S = 1{,}2$ м, угол наклона $\alpha = 45°$, высота точки отрыва $BK = h = 1{,}5$ м, заданный коэффициент трения для разделения частиц $f_1 = 0{,}4$.

*Решение*

Из условия задачи следует, что частица с коэффициентом трения, равным заданному, $f = f_1$ в конце своего движения (скольжение по столу + свободное падение) должна попасть ровно в точку $C$ (см. рис. 4.1).

Рассмотрим первый участок движения такой частицы – прямолинейное движение по шероховатой поверхности наклонного стола. На частицу действуют сила тяжести $\vec{P}$, реакция опоры $\vec{N}$ и сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$. Выберем систему

координат *xAy*, направив ось *x* вдоль линии движения, а ось *y* – перпендикулярно ей (рис. 4.2). Движение частицы описывается уравнениями:

$$m\ddot{x} = \sum F_{kx} = P\cos 45^\circ - F_{\text{тр}};\ m\ddot{y} = \sum F_{ky} = -P\cos 45^\circ + N.$$

Поскольку вдоль оси *y* частица не перемещается, то $\ddot{y} = 0$. Тогда второе уравнение движения представляется в виде: $-P\cos 45^\circ + N = 0$, откуда реакция опоры частицы $N = mg\cos 45^\circ$. Сила трения, которую испытывает частица, двигаясь по сортировочному столу: $F_{\text{тр}} = fN = fmg\cos 45^\circ$, где $f$ – коэффициент трения.

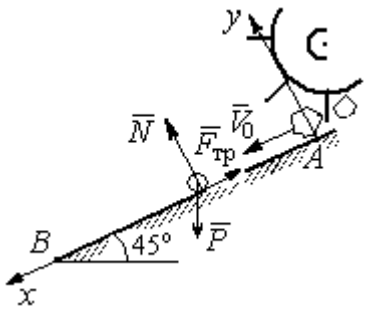


Рис. 4.2. Движение частицы по наклонной плоскости

Подставляя в уравнение движения частицы, выражение силы трения и полагая ускорение $\ddot{x} = \dfrac{dV_x}{dt}$, получим дифференциальное уравнение

$$\frac{dV_x}{dt} = g(1 - f)\cos 45^\circ \text{ или при } f = f_1 = 0{,}4:\ \frac{dV_x}{dt} = 4{,}18.$$

После интегрирования найдём скорость и закон движения частицы как функции времени: $V_x = 4{,}18t + C_1;\ x = 2{,}09t^2 + C_1 t + C_2$.

Константы интегрирования $C_1$, $C_2$ находятся из начальных условий движения. Подставляя начальные условия $x(0) = 0$, $\dot{x}(0) = V_x(0) = V_0$ в уравнение движения частицы, найдём $C_2 = 0$, $C_1 = V_0$.

Окончательно движение частицы на прямолинейном участке *AB* сортировочного стола описывается системой уравнений: $V_x = 4{,}18t + 1$; $x = 2{,}09t^2 + t$.

Допустим частица достигает края стола *B* в момент времени $t = t_B$. Её координата равна длине сортировочного стола: $x(t_B) = S$, а скорость равна скорости отрыва её от стола: $V_x(t_B) = V_B$. Подставим эти условия в уравнения

движения, получим систему: $V_B = 4{,}18t_B + 1$, $S = 2{,}09t_B^2 + t_B$, откуда скорость частицы в точке отрыва её от стола $V_B = \sqrt{1 + 8{,}36S}$. При длине стола $S$ = 1,2 м скорость отрыва $V_B$ = 3,32 м/с.

Рассмотрим участок $BC$ свободного падения частицы, брошенной с высоты $h$ с начальной скоростью $V_B$, направленной под углом 45° к горизонту (рис. 4.3). В полёте на частицу действует только сила тяжести $\vec{P}$. Выберем прямоугольную систему координат $xKy$ с началом координат в точке $K$ (см. рис. 4.3). Дифференциальные уравнения движения точки

$$m\ddot{x} = 0;\ m\ddot{y} = -P = -mg \text{ или } \ddot{x} = 0,\ \ddot{y} = -g.$$

Интегрируя первое уравнение, получим, что движение частицы вдоль оси $x$ описывается уравнениями $\dot{x} = C_3$; $x = C_3 t + C_4$. Константы интегрирования $C_3$ и $C_4$. определяются из начальных условий движения: при $t$ = 0, $x(0) = 0$, $\dot{x}(0) = V_{Bx}$, где $V_{Bx}$ – проекция вектора скорости $\overline{V}_B$ на ось $x$, $V_{Bx}$ = $V_B \cos 45^\circ$ = 2,35 м/с. После подстановки начальных условий в уравнение движения частицы получим: $C_4$ = 0, $C_3$ = 2,35. В результате, движение частицы вдоль оси $x$ при её свободном падении описывается уравнением $x = 2{,}35t$.

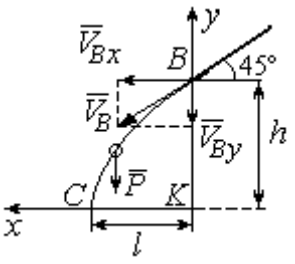


Рис. 4.3. Свободное падение частицы

Проинтегрируем уравнение движения частицы в направлении оси $y$. Получим: $\dot{y} = -gt + C_5$ и $y = -g\dfrac{t^2}{2} + C_5 t + C_6$. Начальные условия движения частицы вдоль оси $y$: при $t$ = 0, $y(0) = h$ = 1,5 м, $\dot{y}(0) = V_{By} = -V_B \cos 45^\circ = -2{,}35$ м/с, где $V_{By}$ – проекция вектора скорости $\overline{V}_B$ на ось $y$. Подставляя начальные условия в уравнение движения, найдём: $C_6 = h$; $C_5 = V_{By} = -2{,}35$. Таким образом, движение частицы вдоль оси $y$ при её свободном падении описывается уравнением $y = -4{,}91t^2 - 2{,}35t + 1{,}5$.

В момент $t = t_{\text{п}}$ падения частицы на пол её вертикальная координата обращается в нуль: $y = 0$, а горизонтальная – равна дальности полёта: $x = \ell$. Подставляя эти условия в уравнения движения частицы, получим систему:

$$\ell = 2{,}35t_{\text{п}},\ 0 = -4{,}91t_{\text{п}}^2 - 2{,}35t_{\text{п}} + 1{,}5.$$

Исключая в системе время $t_{\text{п}}$, выразим уравнение для определения дальности горизонтального полёта: $\ell^2 + 1{,}12\ell - 1{,}68 = 0$. Отсюда находим: $\ell = 0{,}85$ м.

Таким образом, частицы с коэффициентом трения $f = 0{,}4$ в конце своего движения падают на горизонтальную поверхность на расстоянии 0,85 м от края стола. Очевидно, именно здесь необходимо установить разделительную стенку приёмного устройства. Частицы с меньшим коэффициентом трения ($f < 0{,}4$) будут улетать за стенку, а при большем ($f > 0{,}4$) – недолетать. К примеру, длина горизонтального полёта частицы с коэффициентом трения $f = 0{,}3$ составляет 0,89 м, а при $f = 0{,}5$ равна 0,61 м.

**Задача 42.** Материальная точка массой $m = 1$ кг движется прямолинейно по горизонтальной поверхности под действием силы $F = 10 - kt$ Н, где $k$ – коэффициент пропорциональности; $k = \text{const}$; $t$ – время в секундах. Определить величину коэффициента $k$, при котором скорость точки за первую секунду от начала движения увеличится от начального значения $V_0 = 2$ м/с до величины $V_1 = 10$ м/с, а также путь, пройденный точкой до остановки.

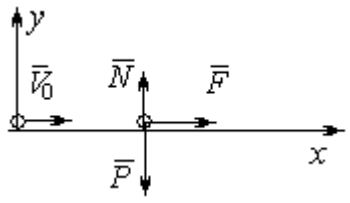


Рис. 4.4. Прямолинейное движение точки

*Решение*

Для описания движения точки выберем прямоугольную систему координат $x$, $y$ с началом в том месте, откуда точка начала движение (рис. 4.4).

На точку действуют сила тяжести $\vec{P}$, реакция опоры $\vec{N}$ и заданная сила $\vec{F}$. Направление силы $\vec{F}$ на рис. 4.4 соответствует начальному этапу движения,

когда проекция силы на ось $x$ положительная. Движение точки описывается уравнением $m\ddot{x} = F_x = 10 - kt$.

Положим $\ddot{x} = \frac{dV}{dt}$. Здесь в силу того, что движение происходит только вдоль одной координаты, индекс $x$ у скорости опущен. Учитывая массу точки, получим уравнение $\frac{dV}{dt} = 10 - kt$. Разделив переменные и проинтегрировав полученное уравнение, найдём закон изменения скорости точки $V = 10t - k\frac{t^2}{2} + C_1$. Выражая скорость через производную от координаты $V = \frac{dx}{dt}$, получим дифференциальное уравнение $\frac{dx}{dt} = 10t - k\frac{t^2}{2} + C_1$, интегрируя которое, найдём уравнение движения точки $x = 5t^2 - k\frac{t^3}{6} + C_1 t + C_2$.

Подставляя начальные условия (при $t$ = 0, $V = V_0$ = 2 м/с, $x = 0$) в уравнения, получим: $C_1$ = 2, $C_2$ = 0. Окончательно движение точки описывается системой уравнений: $V = 10t - k\frac{t^2}{2} + 2$; $x = 5t^2 - k\frac{t^3}{6} + 2t$.

Известно, что через 1 с от начала движения точка приобрела скорость $V_1$ = 10 м/с. Подставляя это условие в первое уравнение, найдём $k$ = 4.

В момент $t_1$ точка остановилась и её скорость обращается в нуль: $V(t_1)$ = 0, а координата равна пройденному пути: $x(t_1) = S$. Подставляя эти условия в уравнения движения с учетом вычисленного значения коэффициента $k$, получим систему: $0 = 10t_1 - 2t_1^2 + 2$; $S = 5t_1^2 - \frac{2}{3}t_1^3 + 2t_1$, откуда находим путь, пройденный точкой до остановки: $S$ = 51,86 м .

**Задача 43.** Материальная точка массой $m$ = 1 кг, находясь на высоте $h_1$ = 2 м над уровнем Земли, подброшена вертикально вверх (ось $x$) с начальной скоростью $V_0$ = 4 м/с (рис. 4.5, *а*). При движении на точку действует сила

сопротивления, пропорциональная квадрату скорости, так, что проекция её на вертикаль направлена в сторону, противоположную движению, $R_x = -0{,}5mV^2$ Н, где $V$ – скорость точки. Определить, на какой высоте $h_2$ от уровня Земли скорость падающей обратно точки достигнет значения начальной стартовой скорости.

*Решение*

Решение задачи осуществляется в два этапа. На первом этапе рассматривается движение точки вверх с высоты $h_1$ с начальной скоростью $V_0$ и определение максимальной высоты полёта $H$, на втором этапе – падение точки вниз с высоты $H$ без начальной скорости (рис. 4.5, *b*).

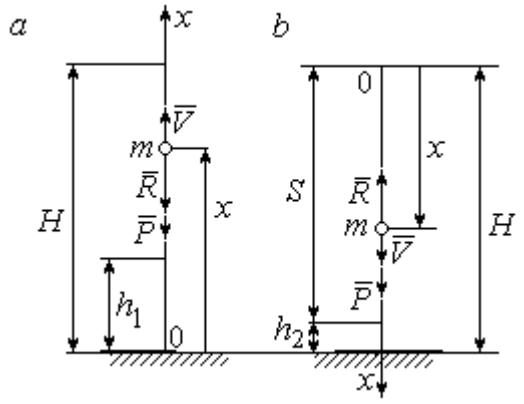



Рис. 4.5. Силы, действующие на точку в полёте:
*a* – движение точки вверх;
*b* – движение точки вниз

Рассмотрим первый этап движения и найдём максимальную высоту подъёма точки. На рис. 4.5, *a* показаны силы, действующие на точку в полёте: сила тяжести $\vec{P}$ и сила сопротивления $\vec{R}$. Ось *x*, вдоль которой происходит движение точки, выбрана по направлению движения, начало координат – на уровне Земли (см. рис. 4.5, *a*).

Дифференциальное уравнение движения точки в проекции на ось *x*: $m\ddot{x} = \sum F_x = P_x + R_x$, где проекции сил тяжести и сопротивления на ось *x*: $P_x = -P = -mg$; $R_x = -0{,}5mV^2$. Полагая $\ddot{x} = \dfrac{dV}{dt}$, получим уравнение движения точки в виде: $\dfrac{dV}{dt} = -(g + 0{,}5V^2)$.

Учитывая, что $\frac{dV}{dt}=\frac{dV}{dx}\frac{dx}{dt}=V\frac{dV}{dx}=\frac{dV^2}{2dx}$, исходное уравнение движения представляется в виде, удобном для интегрирования: $\frac{dV^2}{g+0{,}5V^2}=-2dx$.

Проинтегрировав это уравнение, находим: $\ln(g+0{,}5V^2)=-x+C$.

В начальном положении, т. е. при $t = 0$, точка находилась на высоте $x = h_1$, а скорость её $V = V_0$. Подставив эти значения в проинтегрированное уравнение, получим: $C=h_1+\ln(g+0{,}5V_0^2)$. Окончательно положение точки в полёте определяется выражением $x=h_1+\ln\left(\frac{g+0{,}5V_0^2}{g+0{,}5V^2}\right)$.

При максимальном подъёме точки, т. е. при $x=H$, её скорость обращается в нуль: $V = 0$. Подставляя $H$, получим: $H=h_1+\ln\left(1+\frac{V_0^2}{2g}\right)$. При начальной скорости $V_0 = 4$ м/с, с учётом высоты точки старта $h_1 = 2$ м, высота подъёма точки относительно уровня Земли $H = 2{,}6$ м.

Рассмотрим второй этап решения задачи – движение точки вниз с максимальной высоты $H$ без начальной скорости. Выберем ось $x$ по направлению движения и поместим начало координат в точке, откуда началось движение вниз (рис. 4.5, *b*). Дифференциальное уравнение движения падающей точки: $m\frac{dV}{dt}=P_x+R_x=mg-0{,}5mV^2$, которое, как и в предыдущем случае, приводится к виду: $\frac{dV^2}{g-0{,}5V^2}=2dx$.

Проинтегрировав это уравнение, находим: $\ln(g-0{,}5V^2)=-x+C_1$.

В начальном положении, т. е. при $t = 0$, координата точки и скорость равны нулю: $x = 0$, $V = 0$. Подставив эти значения, находим: $C_1=\ln g$.

Окончательно положение падающей точки определяется выражением $x = \ln\left(\frac{g}{g - 0{,}5V^2}\right)$.

Расстояние $S$, которое пролетела точка с высоты $H$, приобретя скорость, $V_0$: $S = \ln\left(\frac{g}{g - 0{,}5V_0^2}\right)$. Высота $h_2$ этого положения от уровня Земли: $h_2 = H - S$ (см. рис. 4.5, *b*). С учётом величины начальной скорости $V_0$ = 4 м/с, максимальной высоты подъёма точки $H$ = 2,6 м высота $h_2$ = 0,91 м.

**Задача 44**. Точка 1 движется горизонтально с постоянной скоростью $V_1$ на высоте $h$. Точка 2 массой $m_2$ находится в начале координат (рис. 4.6).

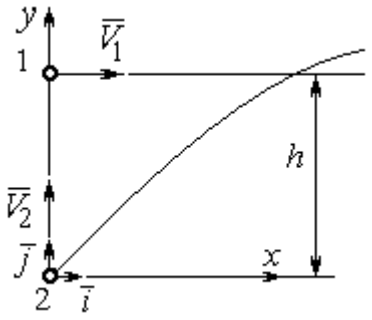


Рис. 4.6. Схема встречного движения точек

В момент, когда обе точки находились на одной вертикали $y$, точка 2 стартовала вертикально вверх со скоростью $V_2$. В полёте на точку 2 действует отклоняющая сила $\vec{F}_2$, которая представлена в виде разложения по единичным векторам $\vec{i}$, $\vec{j}$ системы координат $xy$: $\vec{F}_2 = p\vec{i} + q\vec{j}$, где $p$, $q$ – const. С какой скоростью $V_2$ должна стартовать точка 2, чтобы обе точки встретились.

*Решение*

Рассмотрим движение точки 2. На точку действует сила тяжести $\vec{P}_2$ и сила $\vec{F}_2$, проекции которой на оси $x$, $y$: $F_{2x} = p$, $F_{2y} = q$ (рис. 4.7).

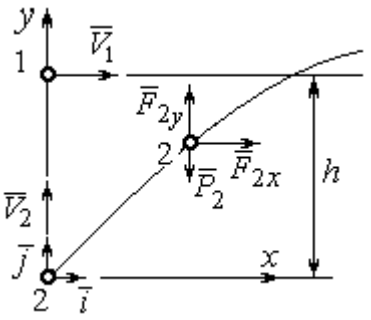


Рис. 4.7. Расчётная схема встречи точек

Уравнения движения точки в проекциях на оси $xy$ имеют вид:

$$m_2\ddot{x} = p,\ m_2\ddot{y} = q - m_2 g.$$

Дважды интегрируя первое уравнение, получим: $\dot{x} = \frac{p}{m_2}t + C_1$; $x = \frac{p}{2m_2}t^2 + C_1 t + C_2$.

Константы интегрирования найдём из условия, что в начальный момент вторая точка стартовала из начала координат вертикально, то есть при $t = 0$ $x = 0$ и $\dot{x} = V_{2x} = 0$ . Подставляя начальные условия в уравнения движения, получим: $C_1 = 0$, $C_2 = 0$. Таким образом, движение точки 2 вдоль оси $x$ описывается уравнением $x = \frac{p}{2m_2}t^2$.

Аналогично, дважды интегрируя второе уравнение движения, получим зависимость скорости движения точки 2 от времени и закон её движения вдоль оси $y$: $\dot{y} = \left(\frac{q}{m_2} - g\right)t + C_3$; $y = \left(\frac{q}{m_2} - g\right)\frac{t^2}{2} + C_3 t + C_4$. Из начальных условий: при $t = 0$ $y = 0$, $\dot{y} = V_{2y} = V_2$ следует: $C_3 = V_2$, $C_4 = 0$.

В результате закон движения точки 2 вдоль оси $y$: $y = \left(\frac{q}{m_2} - g\right)\frac{t^2}{2} + V_2 t$.

Обозначим $t_1$ – время движения точек до встречи. В момент встречи высота точки 2 $y(t_1) = h$, а расстояние по горизонтали, которое прошла точка 2 до встречи, должно быть равно расстоянию, пройденному точкой 1 за это же время. Подставляя условия встречи в уравнения движения, получим систему:

$$V_1 t_1 = \frac{p}{2m_2}t_1^2; \quad h = \left(\frac{q}{m_2} - g\right)\frac{t_1^2}{2} + V_2 t_1,$$

откуда найдём: $V_2 = \frac{h}{t_1} - \left(\frac{q}{m_2} - g\right)\frac{t_1}{2}$, где $t_1 = \frac{2V_1 m_2}{p}$.

## Упражнения

Упражнение 4.1. Тело массы $m$ = 2 кг поднимается по прямой по шероховатой поверхности, составляющей угол 30° с горизонтом. Коэффициент трения $f$ = 0,4. На тело действует сила $F = kt + 0{,}5P$, направленная в сторону движения, параллельно плоскости. Определить величину коэффициента $k$ и начальную скорость тела, направленную вверх по наклонной плоскости, если за первую секунду тело прошло путь $S$ = 2 м, а скорость увеличилась вдвое относительно начальной.

Упражнение 4.2. Материальную точку массы $m$ = 1 кг, находящуюся на высоте $H$ = 10 м над уровнем Земли, бросили под углом φ = 30° к горизонту с начальной

скоростью $V_0$. Свободное движение точки происходит в вертикальной плоскости. Определить начальную скорость $V_0$ и горизонтальную дальность полета $l$ при падении точки на Землю, если высоту $h$ =7 м она пересекла через 1 с от начала движения.

## 4.2. Колебания материальной точки

Если материальная точка массой $m$ движется вдоль оси О$x$ под действием линейной восстанавливающей силы, равной $F = cx$, где $c$ – постоянный коэффициент, $x$ – отклонение точки от положения равновесия, куда поместили начало координат, то дифференциальное уравнение свободных прямолинейных колебаний имеет вид:

$$m\ddot{x} + cx = 0, \text{ или } \ddot{x} + \omega^2 x = 0,\ \omega^2 = \frac{c}{m},$$

где $\omega$ – угловая частота колебаний.

Решение дифференциального уравнения свободных колебаний представляется в виде $x = C_1\cos\omega t + C_2\sin\omega t$. Постоянные интегрирования $C_1$ и $C_2$ находятся из начальных условий.

Если кроме восстанавливающей силы на материальную точку действует переменная возмущающая сила, колебания точки называются **вынужденными.** В случае гармонического возмущения $Q = H\sin pt$, где $H$, $p$ – амплитуда и угловая частота возмущающей силы, дифференциальное уравнение вынужденных колебаний материальной точки относительно положения равновесия

$$m\ddot{x} + cx = H\sin pt, \text{ или } \ddot{x} + \omega^2 x = h\sin pt,\ \omega^2 = \frac{c}{m},\ h = \frac{H}{m}$$

где $\omega$ – угловая частота собственных колебаний; $h$ – относительная амплитуда возмущающей силы.

Общее решение неоднородного дифференциального уравнения вынужденных колебаний при отсутствии резонанса (частота собственных колебаний точки не совпадает с частотой возмущающей силы $p \neq \omega$) имеет вид:

$x = C_1 \cos\omega t + C_2 \sin\omega t + \dfrac{h}{\omega^2 - p^2} \sin pt$, а в случае возникновения резонанса ($p$ = $\omega$) определяется формулой: $x = C_1 \cos\omega t + C_2 \sin\omega t - \dfrac{ht}{2p} \cos pt$. Значения произвольных постоянных $C_1$ и $C_2$ находятся с учётом начальных условий движения.

Колебания груза на двух параллельных пружинах с жесткостью $c_1$ и $c_2$ можно рассматривать как колебания груза на одной пружине с эквивалентной жесткостью $c_{экв} = c_1 + c_2$, где $c_{экв}$ – жесткость эквивалентной пружины. При последовательном соединении пружин коэффициент жесткости эквивалентной пружины $c_{экв} = \dfrac{c_1 c_2}{c_1 + c_2}$.

## Примеры решения задач на колебания точки

**Задача 45.** Подъёмное устройство (рис. 4.8) опускает груз $Q$ массой $m$ = 400 кг в шахту при помощи упругого троса с коэффициентом жесткости $c = 8 \cdot 10^4$ Н/м с постоянной скоростью $V$ = 10 м/с. В некоторый момент во время спуска трос защемило в блоке. Пренебрегая массой троса, определить дальнейшее движение груза и найти максимальную силу натяжения троса.

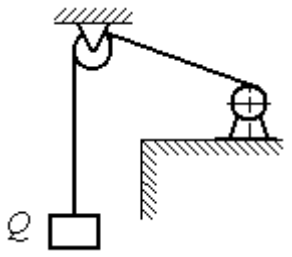


Рис. 4.8. Подъёмное устройство

*Решение*

После того как произошло защемление троса в обойме блока, вертикальную часть троса длиной $\ell_0$ можно рассматривать как пружину с закреплённым верхним концом, а груз – материальной точкой.

Расчетная схема колебаний груза $Q$ на пружине показана на рис. 4.9.

Ось *Ox*, вдоль которой происходят колебания груза, направлена вертикально вниз. Начало отсчёта координаты *x* (точка *O*) выбрано в положении нерастянутой пружины.

На рис. 4.9, *a* положение нерастянутой пружины соответствует положению груза на тросе в момент его защемления. В произвольном положении груза (рис. 4.9, *b*), обозначенном координатой *x*, к нему приложены две силы: сила тяжести $\vec{Q}$ и сила упругости пружины $\vec{F}_{\text{упр}}$. Проекция силы упругости пружины на ось *Ox*: $F_{\text{упр}x} = -c\Delta\ell = -cx$, где $\Delta\ell$ – удлинение пружины. Дифференциальное уравнение движения груза в проекции на ось *Ox* имеет вид: $m\ddot{x} = Q - cx$. В результате получаем

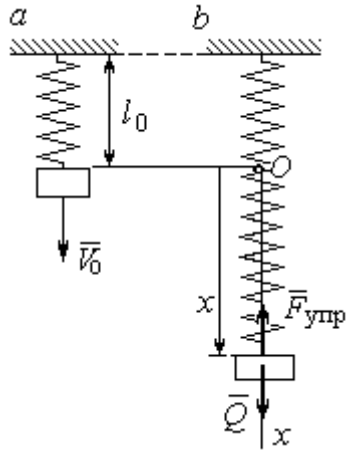



Рис. 4.9. Расчётная схема колебаний груза:
*a* – положение груза на начало колебаний; *b* – положение груза в произвольный момент времени

неоднородное дифференциальное уравнение колебаний:

$$m\ddot{x} + cx = mg \text{ или } \ddot{x} + \omega^2 x = g,$$

где $\omega$ – угловая частота собственных колебаний, $\omega = \sqrt{\dfrac{c}{m}}$ = 14,14 рад/с.

Решение неоднородного дифференциального уравнения представляется в виде $x = C_1\cos\omega t + C_2\sin\omega t + \dfrac{g}{\omega^2}$, где первые два слагаемых представляют общее решения однородного уравнения, последнее – частное решение неоднородного

Для определения произвольных постоянных $C_1$ и $C_2$ используем начальные условия движения: при $t$ = 0 груз находился в положении $x$ = 0, а его скорость равнялась скорости груза $\dot{x} = V_0 =$ 10 м/с. Подставляя значение координаты начального положения груза в общее решение уравнения колебаний, получим: $C_1 = -\dfrac{g}{\omega^2} = -$ 0,69 м. Для определения второй константы вычислим скорость

груза: $\dot{x} = -C_1\omega\sin\omega t + C_2\omega\cos\omega t$. Подставив начальное значение скорости груза при $t$ = 0, получим: $C_2 = \frac{V_0}{\omega} =$ 0,71 м. Окончательно, движение груза после защемления троса в обойме блока описывается уравнением

$$x = -0{,}69\cos 14{,}14t + 0{,}71\sin 14{,}14t + 0{,}69.$$

Представим уравнение колебаний в виде $x = A\sin(\omega t + \alpha) + \frac{g}{\omega^2}$, где $A$ – амплитуда собственных колебаний груза $A = \sqrt{C_1^2 + C_2^2}$, $\alpha$ – фаза колебаний; $\operatorname{tg}\alpha = \frac{C_1}{C_2}$. Максимальное растяжение троса равно максимальному значению координаты груза: $x_{\max} = \max[A\sin(\omega t + \alpha) + \frac{g}{\omega^2}] = A + \frac{g}{\omega^2} =$ 1,68 м. Соответственно, максимальное усилие в тросе равно значению силы упругости при максимальном растяжении: $F_{\text{упр max}} = cx_{\max} =$ 134,4 кН.

**Задача 46.** Рабочий орган вибрационной машины представляет собой массивное тело, расположенное на гладкой наклонной плоскости между двумя пружинами (см. рис. 4.10). Угол наклона плоскости к горизонту 60º. Масса груза $m$ = 9 кг. Пружины, зажимающие груз, имеют коэффициенты жесткости $c_1$ = 300 Н/м и $c_2$ = 600 Н/м.

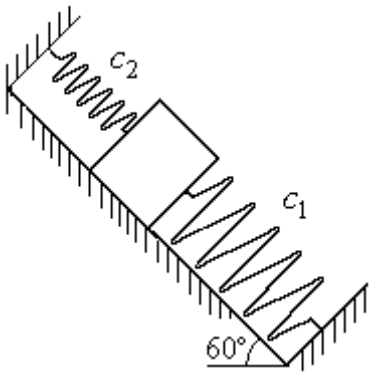


Рис. 4.10. Колебания груза на наклонной плоскости

В начальный момент груз, когда пружины не деформированы, груз оттягивают вниз по наклонной плоскости на расстояние $\Delta\ell$ = 0,12 м и отпускают без начальной скорости.

Найти период колебаний, амплитуду и уравнение движения груза.

*Решение*

Колебания груза, зажатого между двумя пружинами, представим как колебания груза, прикреплённого к одной пружине эквивалентной жёсткости: $c_э = c_1 + c_2$ = 900 Н/м (рис. 4.11). Ось, вдоль которой происходят колебания, направим вниз по наклонной плоскости. Начало отсчёта координаты груза *x* выберем в положении его статического равновесия (точка *O*) (см. рис. 4.11).

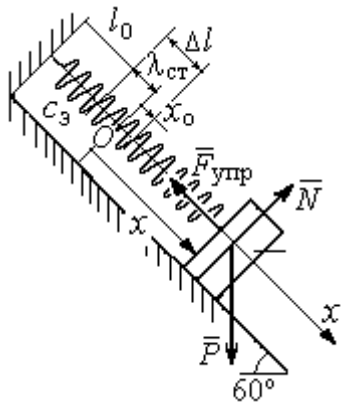


Рис. 4.11. Схема колебаний груза на эквивалентной пружине

Дифференциальное уравнение движения груза в проекции на ось *Ox*: $m\ddot{x} = P_x - F_{упр\,x}$. Проекция силы упругости пружины на ось *Ox*: $F_{упр\,x} = -c_э \Delta\ell$, где $\Delta\ell = (x + \lambda_{ст})$ – удлинение пружины, включающее её растяжение $\lambda_{ст}$ относительно положения нерастянутой пружины и растяжение *x* относительно начала координат.

Удлинение пружины $\lambda_{ст}$ определяется из условия равновесия груза на наклонной плоскости в положении статического равновесия:

$$P\cos 30^\circ - F_{упр} = 0{,}87mg - c_э\lambda_{ст} = 0.$$

Находим $\lambda_{ст} = \dfrac{0{,}87mg}{c_э}$ = 0,085 м.

Подставляя выражение силы упругости, с учётом условия статического равновесия груза ($0{,}87mg = c_э\lambda_{ст}$), получим дифференциальное уравнение колебаний: $m\ddot{x} = -c_э x$ или $\ddot{x} + \omega^2 x = 0$, где $\omega$ – угловая частота собственных колебаний груза, $\omega = \sqrt{\dfrac{c_э}{m}}$ = 10 рад/с.

Общее решение уравнения колебаний $x = C_1\cos\omega t + C_2\sin\omega t$.

Для определения произвольных постоянных $C_1$ и $C_2$ вычислим начальные условия движения груза.

Координата начального положения груза на оси $Ox$ (см. рис. 4.11) $x_0 = \Delta\ell - \lambda_{ст}$ = 0,035 м. Подставляя значение координаты начального положения груза в общее решение уравнения колебаний при $t$ = 0, получим: $C_1 = x_0$ = 0,035 м. Для определения второй константы вычислим скорость груза: $\dot{x} = -C_1\omega_2 \sin\omega_2 t + C_2\omega_2 \cos\omega_2 t$. Подставив начальное значение скорости груза: при $t = 0$ $\dot{x} = V_0 = 0$, получим $C_2 = 0$. Окончательно уравнение движения груза относительно его положения статического равновесия $x(t) = 0{,}035\cos 10t$ м. Амплитуда колебаний $A$ = 0,035 м. Период колебаний $T = \dfrac{2\pi}{\omega} = 0{,}63$ с.

**Задача 47.** Пружинный амортизатор состоит из двух одинаковых вертикально стоящих пружин, к верхним концам которых прикреплена невесомая горизонтальная площадка (рис. 4.12). Жёсткость каждой пружины $c$ = 350 Н/м. Груз массой $m$ = 5 кг падает с высоты $h$ = 0,3 м.

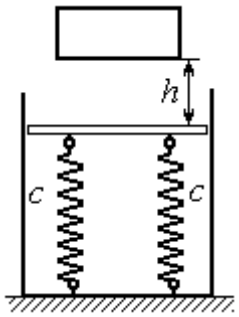


Рис. 4.12. Пружинный амортизатор

Коснувшись площадки, груз начинает двигаться вместе с ней. Определить максимальную осадку амортизатора и уравнение движения груза.

*Решение*

Заменим две пружины амортизатора одной с жесткостью, эквивалентной двум пружинам: $c_э = 2c$ = 700 Н/м. Расчётная схема колебаний груза показана на рис. 4.13. Начало координат оси $x$ (точка $O$), вдоль которой происходят колебания, выбрано на уровне статического равновесия груза.

При движении (на рис. 4.13, *с* предполагается движение груза вниз) на груз действуют сила упругости $\vec{F}_{упр}$ и сила тяжести $\vec{P}$. Уравнение движения груза в проекции на ось $x$: $m\ddot{x} = P - F_{упр} = P - c_э\Delta\ell$, где $\Delta\ell$ – удлинение (или сжатие) пружины относительно недеформированного состояния.

В произвольном положении груза, обозначенном координатой $x$ (см. рис. 4.13, *c*), сжатие пружины относительно её недеформированного состояния (см. рис. 4.13, *a*) составляет величину: $\Delta\ell = x + \lambda_{ст}$. Величина $\lambda_{ст}$ находится из условия статического равновесия груза, которое выражается равенством (рис. 4.13, *b*): $P - F_{упр\ ст} = P - c_э\lambda_{ст} = 0$.

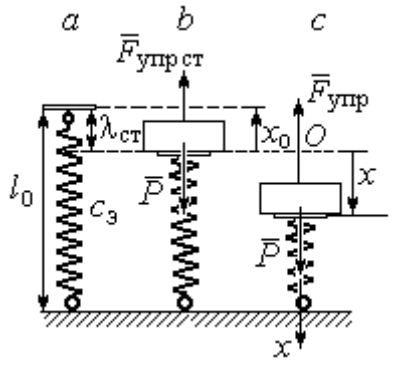



Рис. 4.13. Расчётная схема колебаний на эквивалентной пружине:
*a* – недеформированная пружина;
*b* – положение статического равновесия груза; *c* – произвольное положение

Подставляя это условие в уравнение движения груза, получим дифференциальное уравнение колебаний: $m\ddot{x} + c_э x = 0$ или $m\ddot{x} + \omega^2 x = 0$, где $\omega = \sqrt{\dfrac{c_э}{m}}$ = 11,83 рад/с – угловая частота колебаний.

Общее решение однородного уравнения колебаний представляется в виде $x = C_1\cos\omega t + C_2\sin\omega t$, где $C_1$ и $C_2$ – произвольные постоянные, вычисляемые по начальным условиям движения груза.

По условию задачи груз падает на площадку, установленную на недеформированных пружинах. Это означает, что начальная координата груза при его движении на пружинах соответствует положению недеформированной пружины: $x_0 = -\lambda_{ст} = -\dfrac{mg}{c_э}$ = – 0,07 м.

Начальная скорость колебаний груза равна скорости груза при падении его с высоты 1 м. Интегрируя уравнение движения груза во время падения $m\ddot{s} = mg$, где $s$ – путь, пройденный телом, получим зависимость скорости от пройденного пути: $V^2 = 2gs$. Полагая $s$ = 0,3, найдём скорость груза при его встрече с площадкой: $V$ = 2,43 м/с. Проекция начальной скорости колебаний груза на ось $x$ положительна: $V_{0x} = V$ = 2,43 м/с.

Подставив начальные условия в общее решение уравнения колебаний, получим: $C_1 = x_0 = -\ 0{,}07$ м; $C_2 = \frac{V_{0x}}{\omega} =\ 0{,}2$ м. Окончательно уравнение колебаний груза на амортизаторе $x = -0{,}07\cos 11{,}83t + 0{,}2\sin 11{,}83t$. Амплитуда колебаний $A = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} = 0{,}21$ м. Проседание амортизатора $H$ отсчитывается от положения нерастянутых пружин: $H = A + \lambda_{ст} = 0{,}28$ м.

**Задача 48.** Для регистрации (записи) вертикальных колебаний тяжёлых платформ используется пружинный виброграф (рис. 4.14). Схема действия прибора состоит в следующем. Массивная платформа $A$ совершает вертикальные гармонические колебания по закону $\xi = \xi(t)$. На платформе установлена вертикальная стойка с горизонтальной перекладиной, к которой прикреплена пружина жесткостью $c$. К нижнему концу пружины подвешен груз $P$ массой $m$ с индикаторной стрелкой $B$ (см. рис. 4.14). Вертикальная шкала индикаторной стрелки закреплена на платформе $A$. В начальный момент груз на пружине находился в покое в положении статического равновесия. Определить закон колебаний стрелки $B$ вдоль шкалы, если масса груза $m$ = 1 кг, жесткость пружины $c$ = 10 Н/м, платформа совершает вертикальные колебания по закону $\xi = a\sin pt$ см, где амплитуда $a$ = 0,02 м, частота колебаний платформы $p$ = 7 рад/с.

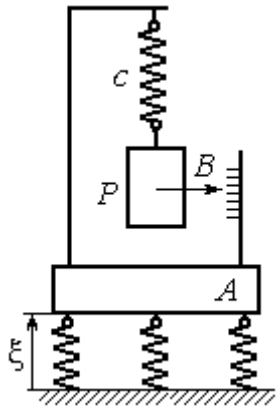


Рис.4.14. Регистратор вертикальных колебаний

*Решение*

Выберем неподвижную ось $x$, связанную, например, с неподвижной поверхностью, на которой стоит платформа. Начало координат – точку $O$ выберем на уровне статического равновесия груза на пружине при неподвижной платформе. Произвольное положение груза отмечено координатой $x$ (рис. 4.15).

Растяжение пружины при неподвижной платформе составляет величину $x+\lambda_{ст}$, где $\lambda_{ст}$ – удлинение пружины в положении статического равновесия груза, определяемое из условия $P-c\lambda_{ст}=0$. Вместе с тем колебание платформы вызывает аналогичное смещение точки подвеса пружины. В результате растяжение пружины при произвольном положении груза равно сумме: $\Delta\ell=(x+\lambda_{ст}+\xi)$.

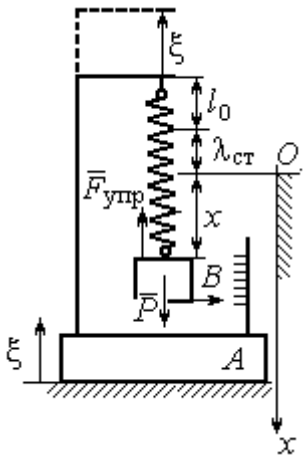


Рис. 4.15. Расчётная схема колебаний груза

На груз действуют сила тяжести $\vec{P}$ и сила упругости пружины $\vec{F}_{упр}$. Дифференциальное уравнение движения груза в проекции на ось *Ox*: $m\ddot{x}=P_x+F_{упр\,x}$, где проекции $P_x=P$, $F_{упр\,x}=-c\Delta\ell=-c(x+\lambda_{ст}+\xi)$. Расчётная схема колебаний груза показана на рис. 4.15.

С учётом условия статического равновесия груза $P-c\lambda_{ст}=0$ получим дифференциальное уравнение вынужденных колебаний груза в виде:

$$\ddot{x}+\omega^2x=-h\sin pt,$$

где $\omega$ – угловая частота собственных колебаний груза, $\omega=\sqrt{\dfrac{c}{m}}=3{,}16$ рад/с; $h$ – относительная амплитуда вынужденных колебаний, $h=\dfrac{ca}{m}=0{,}2$ м/с$^2$; $p$ – угловая частота вынужденных колебаний, $p=7$ рад/с.

Решение уравнения вынужденных колебаний представляется суммой $x=x_1+x_2$, где $x_1$ является общим решением однородного уравнения $\ddot{x}_1+\omega^2x_1=0$, а $x_2$ – частное решение уравнения вынужденных колебаний: $\ddot{x}_2+\omega^2x_2=-h\sin pt$.

Решив однородное уравнение, находим: $x_1=C_1\cos\omega t+C_2\sin\omega t$.

При отсутствии резонанса (а в данном случае частота вынужденных колебаний груза не совпадает с частотой собственных $\omega \neq p$) частное решение уравнения вынужденных колебаний ищем в виде $x_2 = b\sin pt$. Подставляя частное решение в уравнение вынужденных колебаний, получим уравнение $-bp^2\sin pt + \omega^2 b\sin pt = -h\sin pt$, откуда находим коэффициент: $b = \dfrac{h}{p^2 - \omega^2}$.

В результате общее решение уравнения колебаний принимает вид:

$$x = x_1 + x_2 = C_1\cos\omega t + C_2\sin\omega t + \frac{h}{p^2 - \omega^2}\sin pt,$$

где константы $C_1$ и $C_2$ подлежат определению.

В начальный момент груз находился на пружине в положении статического равновесия, и потому его начальная координата и скорость равны нулю Подставляя значение координаты начального положения груза в общее решение уравнения вынужденных колебаний при $t$ = 0, получим $C_1$= 0. Для определения второй константы вычислим скорость груза в произвольный момент времени: $\dot{x} = -C_1\omega\sin\omega t + C_2\omega\cos\omega t + \dfrac{hp}{p^2 - \omega^2}\cos pt$. Подставив начальное значение скорости груза, найдём $C_2 = -\dfrac{hp}{\omega(p^2 - \omega^2)} = -0{,}01$ м.

Таким образом, колебания груза относительно неподвижной системы координат описываются уравнением $x = -0{,}01\sin 3{,}16t + 0{,}05\sin 7t$ и представляют абсолютное движение груза. Для того чтобы найти закон движения груза относительно платформы – относительное движение, нужно из его абсолютного движения исключить переносное – колебания платформы. Поскольку стрелка прибора закреплена на грузе, а шкала – на платформе, то закон движения стрелки относительно шкалы:

$$x_r = x - \xi = -0{,}01\sin 3{,}16t + 0{,}05\sin 7t - 0{,}02\sin 7t = -0{,}01\sin 3{,}16t + 0{,}03\sin 7t.$$

**Упражнения**

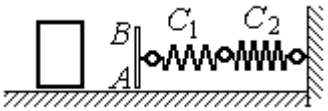



Рис. 4.16. Схема движения груза

Упражнение 4.3. Груз массы $m$ = 0,5 кг, получив начальную скорость $V_0$ = 6 м/с, движется по горизонтальной поверхности, испытывая силу сопротивления, равную по величине $F = kV$ и направленную в сторону, противоположную движению. Через 1 с груз соединяется с невесомой вертикальной площадкой $AB$ и продолжает движение вместе с ней, уже без сопротивления. К площадке прикреплены две горизонтальные последовательно соединённые пружины жёсткостью $C_1$ = 120 и $C_2$ = 40 Н/м (рис. 4.16).

Найти величину максимального сжатия пружины, если $k$ = 0,5 Н/м/с. Определить закон движения груза.

Упражнение 4.4. Груз массы $m$ =1 кг прикреплен к конструкции, состоящей из трёх вертикальных пружин одинаковой жёсткости $C$ = 160 Н/м (рис. 4.17), и находится в равновесии. В некоторый момент времени грузу сообщают скорость $V$ = 4 м/с, направленную вверх.

Найти амплитуду и частоту колебаний груза.

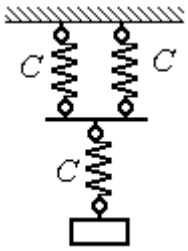



Рис. 4.17. Схема крепления груза на пружинах

## 4.3. Теорема об изменении кинетической энергии точки

**Работой постоянной по величине и направлению силы** $\vec{F}$ на прямолинейном перемещении точки приложения силы $M$ (рис. 4.18) называется скалярная величина $A(\vec{F}) = FS\cos\alpha$, где $F$ – модуль силы; $S$ – конечное перемещение точки приложения силы; $\alpha$ – угол между направлением вектора силы и направлением перемещения точки приложения силы.

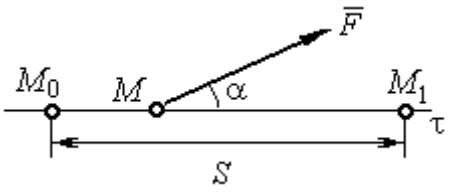



Рис. 4.18. Работа постоянной силы на прямолинейном участке

**Работа силы тяжести** материальной точки при перемещении её из положения $M_0$ в положение $M_1$ равна произведению $A_{(M_0M_1)} = \pm Ph$, где $P$ – величина силы тяжести точки; $h$ – вертикальное перемещение точки (рис. 4.19).

Работа силы тяжести положительна, если начальная точка движения выше конечной (см. рис. 4.19, *a*), и отрицательна, если начальная точка ниже конечной (см. рис. 4.19, *b*).

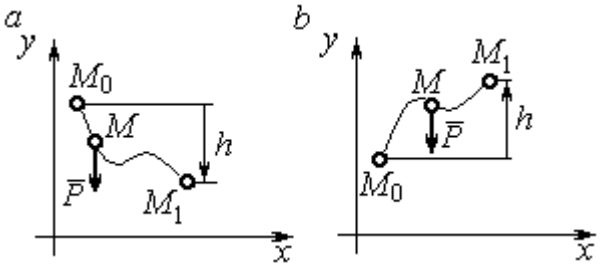



Рис. 4.19. Работа силы тяжести:
*a* – перемещение точки сверху вниз;
*b* – перемещение точки снизу вверх

**Работа силы упругости пружины** при перемещении вдоль линии действия силы из положения недеформированной пружины на расстояние $h$ определяется формулой $A(\vec{F}_{\text{упр}}) = -\frac{ch^2}{2}$, где $c$ – коэффициент жесткости (или жёсткость) пружины.

**Кинетической энергией материальной точки** называется скалярная величина $T = \frac{1}{2}mV^2$, где $m$ – масса точки; $V$ – её скорость.

**Теорема об изменении кинетической энергии точки**. Изменение кинетической энергии материальной точки при переходе её из начального положения в текущее равно алгебраической сумме работ всех действующих на неё сил: $\frac{mV_1^2}{2} - \frac{mV_0^2}{2} = \sum A_{(M_0M_1)}$, где $V_0$, $V_1$ – скорость точки в начальном положении $M_0$ и в положении $M_1$; $\sum A_{(M_0M_1)}$ – сумма работ всех сил, действующих на точку, при перемещении её из положения $M_0$ в положение $M_1$. При несвободном движении точки в сумму работ сил войдёт и работа реакций связи.

Для определения реакций связи при несвободном движении точки используются уравнения движения в проекциях на оси естественной системы координат – касательную и нормальную: $m\frac{dV}{dt} = \sum F_\tau$, $m\frac{V^2}{\rho} = \sum F_n$, где $\sum F_\tau$, $\sum F_n$ – суммы проекций сил на касательную и нормальную оси естественной системы координат, $\rho$ – радиус кривизны траектории точки.

## Примеры решения задач с использованием теоремы об изменении кинетической энергии точки

**Задача 49.** Подъёмное устройство в шахте опускает груз массой 500 кг с постоянной скоростью $V_0$ = 6 м/с. После обрыва каната подъёмника срабатывает предохранительное устройство, которое создаёт силу трения между лифтом подъёмного устройства и стенками шахты. Какую силу трения, считая её постоянной, должно создать предохранительное устройство, чтобы остановить лифт на протяжении пути 10 м.

*Решение*

Рассмотрим падение груза после обрыва каната подъёмника. На груз действуют сила тяжести $\vec{P}$ и сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$, направленная в сторону, противоположную движению. Считая груз материальной точкой, составим уравнение теоремы об изменении кинетической энергии точки. Получим выражение $\frac{mV^2}{2} - \frac{mV_0^2}{2} = Ps - F_{\text{тр}}s$, где $V_0$, $V$ – скорость груза в начале движения (сразу после обрыва каната) и в конце; $s$ – путь, проходимый грузом за время движения. В конце движения груз должен остановиться, то есть $V$ = 0. Тогда уравнение теоремы об изменении кинетической энергии точки принимает вид: $-\frac{mV_0^2}{2} = \left(P - F_{\text{тр}}\right)s$, откуда находим требуемую для остановки груза силу трения: $F_{\text{тр}} = P + \frac{mV_0^2}{2s}$. Подставляя условия задачи, получим: $F_{\text{тр}}$ = 5,81 кН

**Задача 50.** Тонкий стержень, расположенный в вертикальной плоскости, состоит из двух дуг сопряженных окружностей радиусов $R$ = 1 м и $r$ = 0,5 м (рис. 4.20). Линия $OO_1$, соединяющая центры окружностей, составляет с горизонтом угол 30°. На стержень надет шарик весом $P$ = 10 Н. В точке $A$, положение которой на дуге радиуса $R$ определяется углом $\alpha$ = 60°, шарику сообщают начальную скорость $V_0$, после чего он скользит по стержню без трения. Определить значение начальной скорости, при которой шарик достигнет

наивысшей точки *B* со скоростью, равной половине начальной. При найденном значении начальной скорости рассчитать давление шарика на стержень в точке *C*, положение которой на дуге радиуса *r* определяется углом $\beta = 90°$ относительно линии центров.

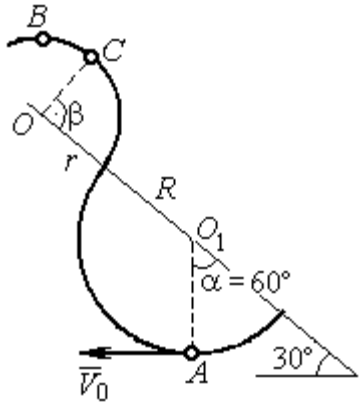


Рис. 4.20. Движение шарика по изогнутому стержню

*Решение*

При движении шарика по стержню без трения на него действуют сила тяжести $\vec{P}$ и реакция опоры $\vec{N}$. При этом работу совершает только сила тяжести шарика. Реакция гладкой поверхности стержня в любой момент времени перпендикулярна поверхности стержня и потому её работа равна нулю.

По теореме об изменении кинетической энергии точки при движении её из начального положения *A* в положение *B* имеем равенство:

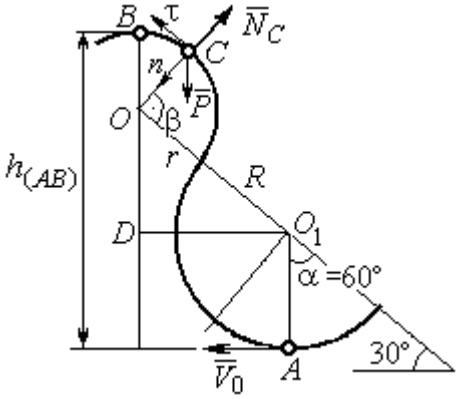


Рис. 4.21. Расчётная схема движения шарика

$$\frac{mV_B^2}{2} - \frac{mV_A^2}{2} = A(P) = -Ph_{(AB)},$$

где $h_{(AB)}$ – перепад высот точек *B* и *A*, $h_{(AB)} = R + DO + r = \frac{3}{2}(R + r)$ (см. рис. 4.21); $V_A$, $V_B$ – скорость шарика в точках *A* и *B*, причём $V_A = V_0$, $V_B = 0{,}5V_0$.

В результате уравнение, составленное на основании теоремы об изменении кинетической энергии, принимает вид: $\frac{3V_0^2}{8} = g\frac{3}{2}(R + r)$, откуда $V_0 = 2\sqrt{(R + r)g} = 7{,}67$ м/с.

На рис. 4.21 показаны силы, приложенные к шарику, в момент, когда он находится в точке *C*. Проведём в точке *C* оси естественной системы координат –

касательную $C\tau$ и нормаль $Cn$. Уравнение движения шарика в проекции на нормальную ось имеет вид: $m\frac{V_C^2}{r} = P\cos 30^\circ - N_C$, откуда найдём реакцию $N_C$.

Для определения скорости шарика в точке *C* воспользуемся теоремой об изменении кинетической энергии точки при движении шарика из положения *C* в положение *B*. Получим равенство $\frac{mV_B^2}{2} - \frac{mV_C^2}{2} = -Ph_{(CB)}$, где $h_{(CB)}$ – перепад высот при движении шарика из начального положения *C* в положение *B*. С учётом известных значений $V_B = 0{,}5V_0 =$ 3,84 м/с и $h_{(CB)} = r\cos 30^\circ =$ 0,43 м получим: $V_C = \sqrt{V_B^2 + 2gh_{(CB)}}$ = 4,82 м/с.

Из уравнения движения шарика находим реакцию опоры $N_C = P\cos 30^\circ - m\frac{V_C^2}{r}$ = – 38,7 Н.

Отрицательное значение реакции опоры шарика показывает, что фактическое направление реакции противоположно тому, как показано на рис. 4.21. Искомое давление шарика на трубку равно модулю реакции опоры.

**Задача 51.** Желоб состоит из шероховатой наклонной прямой *AB* и гладкой дуги окружности радиуса $r$ = 0,8 м, сопряжённых в точке *B* так, что прямая *AB* является касательной к окружности в точке *B* (рис. 4.22). Положение точки *B* на дуге задаётся углом 30º относительно вертикального диаметра окружности. Тяжёлый шарик массой $m$ = 0,5 кг начинает движение из точки *A* со скоростью $V_0$ = 0,2 м/с.

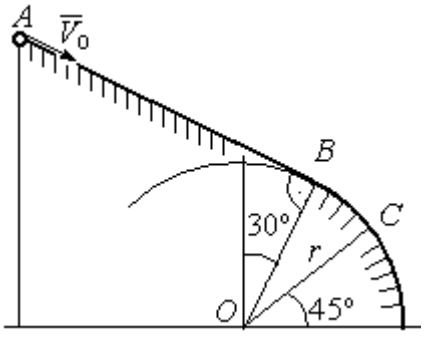


Рис. 4.22. Движение точки по составному желобу

Какой длины *S* должен быть желоб *AB*, чтобы шарик оторвался от окружности в точке *C*, определяемой углом 45º относительно горизонтального диаметра, если при движении по прямой *AB* шарик испытывает сопротивление скольжения с коэффициентом трения $f$ = 0,4.

*Решение*

Рассмотрим движение шарика по дуге окружности. Проведём в точке $C$ оси естественной системы координат – касательную $C\tau$ и нормаль $Cn$ (рис. 4.23). На шарик действуют сила тяжести $\vec{P}$, реакция $\vec{N}_C$ опоры в точке $C$. Уравнение движения шарика в проекции на ось $Cn$ имеет вид: $m\dfrac{V_C^2}{r} = P\cos 45^\circ - N_C$, где $V_C$ – скорость шарика в точке $C$. Реакция опоры $N_C = P\cos 45^\circ - m\dfrac{V_C^2}{r}$.

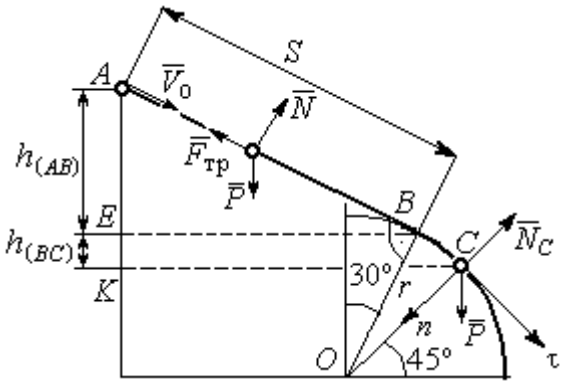


Рис. 4.23. Расчётная схема движения точки

В момент отрыва шарика в точке $C$ реакция опоры обращается в ноль: $N_C = 0$. В результате получаем уравнение $V_C^2 = rg\cos 45^\circ$, из которого находим скорость шарика в момент его отрыва от опоры: $V_C = 2{,}36$ м/с.

Рассмотрим движение шарика из начального положения $A$ в положение $C$. На шарик действуют сила тяжести $\vec{P}$, нормальная реакция опоры $\vec{N}$ и, при движении по наклонной прямой $AB$, сила трения $\vec{F}_{тр}$ (см. рис. 4.23). Работу совершают сила тяжести шарика и сила трения. Реакция опоры $\vec{N}$ и в том и другом случае перпендикулярна траектории движения, и её работа равна нулю.

Составим уравнение теоремы об изменении кинетической энергии точки $\dfrac{mV_C^2}{2} - \dfrac{mV_A^2}{2} = Ph_{(AC)} - F_{тр}S$, где $S$ – длина участка $AB$; $h_{(AC)}$ – перепад высот на участке $AC$ (см. рис. 4.23); $h_{(AC)} = h_{(AB)} + h_{(BC)} = S\sin 30^\circ + r\left(\cos 30^\circ - \cos 45^\circ\right)$.

Модуль силы трения: $F_{тр} = fN$. Для того чтобы найти реакцию $N$ опоры шарика на наклонную поверхность желоба $AB$, составим проекцию уравнения движения шарика на ось $y$, перпендикулярную $AB$ (на рис. 4.23 не показана).

Получим: $m\ddot{y} = N - P\cos 30^\circ = 0$. Отсюда $N = P\cos 30^\circ$ и сила трения $F_{\text{тр}} = fP\cos 30^\circ$.

Из уравнения теоремы об изменении кинетической энергии точки найдём выражение для определения длины $S$ участка $AB$:

$$\frac{V_C^2 - V_A^2}{2g} = S\sin 30^\circ + r\left(\cos 30^\circ - \cos 45^\circ\right) - fPS\cos 30^\circ,$$

откуда получим $S = 1$ м.

**Задача 52.** Груз подвешен на нити длиной $l = 1$ м, закреплённой в неподвижной точке $O$ (рис. 4.24). В начальный момент груз находился в положении $A$, при котором линия $OA$ составляет с вертикалью угол $60°$. В этом положении грузу сообщают начальную скорость $\vec{V}_0$, перпендикулярно нити. Достигнув горизонтального положения, нить, натянутая грузом, встречает препятствие в виде тонкой проволоки в точке $O_1$, расположенной на середине длины нити, и дальше навивается на неё.

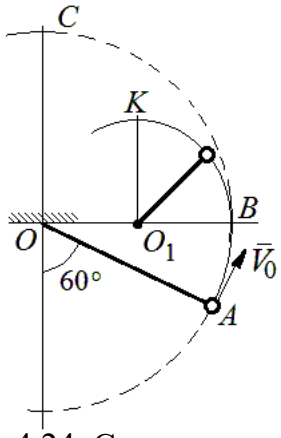


Рис. 4.24. Схема движения груза на нити

Какую минимальную начальную скорость нужно сообщить грузу в точке $A$, чтобы после встречи нити с проволокой в $O_1$ груз проскочил верхнюю точку траектории $K$. На какую максимальную высоту (относительно горизонтального диаметра $OB$) поднимется груз, двигаясь из той же точки $A$ и с той же начальной скоростью, если нить будет двигаться беспрепятственно. Определить скачок натяжения нити в точке $B$ при переходе груза с одной траектории на другую.

*Решение*

Построим оси естественной системы координат $n K \tau$ в точке $K$ траектории – окружности радиуса $0{,}5l$ с центром $O_1$ (рис. 4.25, *a*). Во время движения на груз действуют сила тяжести и реакция нити. Уравнение движения груза в проекции на ось $Kn$ имеет вид: $m\dfrac{V_K^2}{r} = P + N_K$, где $V_K$ – скорость груза в точке $K$; $N_K$ – реакция нити; $r$ – радиус окружности движения груза; $r = 0{,}5l$. Из уравнения движения находим реакцию нити: $N_K = m\dfrac{2V_K^2}{l} - P$.

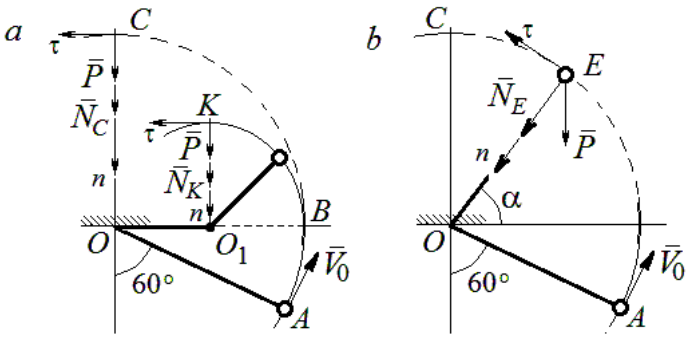


Рис. 4.25. Расчётная схема движения груза:
*a* – нить навивается на препятствие;
*b* – свободное движение

Так как нить представляет собой гибкую связь, то условием достижимости грузом точки $K$ является требование, что при движении нить должна быть натянута, иначе говоря, всюду во время движения должно выполняться неравенство $N_K \geq 0$. С учётом уравнения движения груза это приводит к неравенству, выражающему требование к скорости в конечной точке: $V_K^2 \geq \dfrac{1}{2}gl$.

Скорость груза в точке $K$ найдём на основании теоремы об изменении кинетической энергии точки при движении груза из положения $A$ в положение $K$. Имеем равенство $\dfrac{mV_K^2}{2} - \dfrac{mV_0^2}{2} = -Ph_{(AK)}$, где $h_{(AK)}$ – перепад высот точек $A$ и $K$; $h_{(AK)} = l$ (см. рис. 4.25, *a*). Решая полученное уравнение, найдём зависимость скорости груза в точке $K$ от начальной: $V_K^2 = V_0^2 - 2gl$. С учётом выполнения неравенства натяжения нити получим: $V_0 \geq \sqrt{\dfrac{5}{2}gl}$.

При минимальной начальной скорости $V_0 = \sqrt{\frac{5}{2}gl}$ груз достигает верхней точки *K*. Однако, натяжение нити в точке *K* обращается в нуль: $N_K = 0$ и нить в этом месте перестаёт быть натянутой. Груз продолжает движение, но уже в виде свободного падения с начальной скоростью $V_K = \sqrt{\frac{1}{2}gl}$.

Определим, на какую высоту поднимется груз из положения *A* с минимальной начальной скоростью $V_0 = \sqrt{\frac{5}{2}gl}$, если нить движется беспрепятственно (см. рис. 4.25, *b*). Построим в точке *E* оси естественной системы координат $nE\tau$ аналогично тому, как это было сделано в точке *K*. Уравнение движения груза в проекции на ось *En* имеет вид: $m\frac{V_E^2}{l} = P\sin\alpha + N_E$, где $V_E$ – скорость груза в точке *E*; $N_E$ – проекция реакции нити на нормальную ось.

Для определения скорости груза в точке *E* составим уравнение теоремы об изменении кинетической энергии точки при движении груза из начального положения *A* в положение *E*. Получим: $\frac{mV_E^2}{2} - \frac{mV_0^2}{2} = -Ph_{(AE)}$, где $h_{(AE)}$ – перепад высот точек *A* и *E*; $h_{(AE)} = \frac{l}{2} + l\sin\alpha$ (см. рис. 4.25, *b*). Решая полученное уравнение относительно скорости $V_E$ при заданной начальной скорости $V_0 = \sqrt{\frac{5}{2}gl}$, найдём: $mV_E^2 = \frac{3}{2}mgl - 2mgl\sin\alpha$. С другой стороны, из уравнения движения груза (учитывая, что в точке *E* натяжение нити равно нулю: $N_E = 0$) получим: $mV_E^2 = Pl\sin\alpha$. Приравнивая выражения, получим $\sin\alpha = \frac{1}{2}$. Высота подъёма относительно горизонтального радиуса составляет $\frac{1}{2}l$.

Для определения скачка натяжения нити при переходе груза в точке $B$ с окружности радиуса $l$ на окружность радиуса $\frac{1}{2}l$, т. е. в момент, когда нить начинает навиваться на проволоку, напишем проекции уравнения движения груза на нормальную ось в точке $B$. Получим для малой окружности $\frac{2mV_B^2}{l} = N_B$ и для большой $\frac{mV_B^2}{l} = N'_B$, где $N_B$ и $N'_B$ – проекции реакции нити в точке $B$ при движении груза по окружности радиусов $\frac{1}{2}l$ и $l$. Из уравнений видно, что переход груза с большой окружности на малую вызывает двукратное увеличение натяжения нити: $N'_B = \frac{3}{2}mg$, $N_B = 3mg$.

**Задача 53.** Шарик массой $m$ = 0,5 кг движется в вертикальной плоскости из положения $A$ внутри трубки, которая состоит из полуокружности $AB$ радиуса $R$ = 0,6 м и прямолинейного участка $BD$, сопряжённого в точке $B$ с окружностью (рис. 4.26). Диаметр полуокружности $AB$ составляет с горизонталью угол 60°. Начальная скорость шарика $V_0$ = 5 м/с. В конце кругового участка в точке $B$ шарик упирается в недеформированную пружину жесткостью $c$ = 100 Н/м. Найти величину $S$ максимального сжатия пружины.

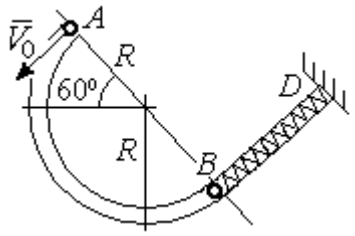


Рис. 4.26. Схема движения шарика

*Решение*

Найдём скорость шарика в точке $B$. Для этого составим уравнение теоремы об изменении кинетической энергии точки при движении шарика из начального положения $A$ в положение $B$. Получим: $\frac{mV_B^2}{2} - \frac{mV_A^2}{2} = A(P) = Ph_{(AB)}$, где $h_{(AB)}$ – перепад высот точек $A$ и $B$, $h_{(AB)} = 2R\sin 60^\circ = 1{,}04$ м (рис. 4.27).

Решая уравнение, найдём скорость шарика в точке $B$: $V_B = \sqrt{V_A^2 + 2gh_{(AB)}}$ = 6,74 м/с.

Для того, чтобы найти величину максимального сжатия пружины, рассмотрим движение шарика на прямолинейном отрезке трубки $BD$. На этом отрезке работу совершают сила тяжести шарика и сила упругости пружины, приложенные к шарику (см. рис. 4.27).

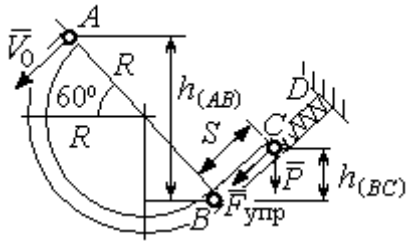


Рис. 4.27. Расчетная схема движения шарика

Обозначим $S$ – максимальное сжатие пружины, равное $BC$. На основании теоремы об изменении кинетической энергии точки, применённой к движению шарика на отрезке $BC$, имеем уравнение $\frac{mV_C^2}{2} - \frac{mV_B^2}{2} = A(P) + A(F_{упр}) = -Ph_{(BC)} - \frac{cS^2}{2}$,

где $h_{(BC)}$ – перепад высот точек $B$ и $C$; $h_{(BC)} = S\sin 30^\circ = 0{,}5S$ (см. рис. 4.27).

В точке $C$ максимального сжатия пружины скорость шарика обращается в нуль: $V_C = 0$. Подставляя это условие, с учётом $V_B = 6{,}74$ м/с, получим уравнение для определения величины максимального сжатия пружины: $S^2 + 0{,}05S - 0{,}23 = 0$.

Выбирая положительный корень уравнения, находим: $S$ = 0,45 м.

## Упражнения

Упражнение 4.5. Лётчик в самолёте пикирует из точки $A$ по прямой, составляющей с горизонтом угол φ, с начальной скоростью $V_0$. Пройдя расстояние $AB = l$, самолёт продолжает движение по дуге окружности радиуса $R$, сопряженной с прямой $AB$ в точке $B$ (рис. 4.28).

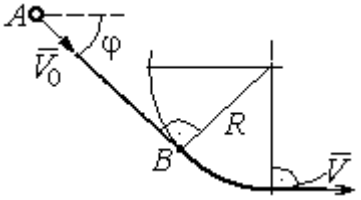


Рис. 4.28. Схема движения самолёта

Каким должен быть радиус окружности, чтобы в точке $C$ – выхода самолёта на горизонтальный полёт - сила давления человека на корпус самолёта не превосходила его тройной вес.

Упражнение 4.6. Пружина жесткостью $C$ = 100 Н/м, сжатая из недеформированного состояния на расстояние $KA = a$ = 0,3 м, выталкивает шарик массой $m$ = 0,5 кг, который отделяется от неё в точке $K$ и продолжает движение в трубке по дуге $KCB$, окружности радиуса $R$ = 1 м, затем – по горизонтальному участку $BD$. Определить давление шарика на трубку в точке $C$. Какой путь пройдёт шарик до остановки по прямой $BD$, если здесь на него действует сила трения с коэффициентом $f$ = 0,4.

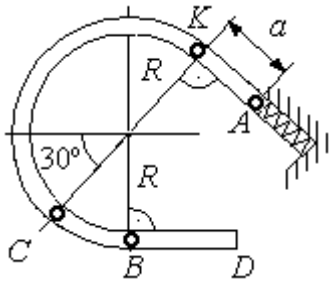


Рис. 4.29. Схема движения шарика в трубке

# 5. ОБЩИЕ ТЕОРЕМЫ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ

## 5.1. Теорема о движении центра масс системы

**Центром масс** системы материальных точек называют точку $C$, координаты которой $x_C$, $y_C$, $z_C$ удовлетворяют равенствам:

$$mx_C = \sum m_k x_k \ , \quad my_C = \sum m_k y_k \ , \ mz_C = \sum m_k z_k \ ,$$

где $m$ – масса системы: $m = \sum m_k$ ; $m_k$, $x_k$, $y_k$, $z_k$ – массы и координаты материальных точек системы.

**Теорема о движении центра масс системы**. Центр масс механической системы движется как материальная точка с массой, равной массе системы, и к которой приложены внешние силы, действующие на систему: $m\vec{a}_C = \sum \vec{F}_k^e$ , где $\vec{a}_C$ – вектор ускорения центра масс системы; $\sum \vec{F}_k^e$ – сумма всех внешних сил, действующих на систему.

**Пример решения задач на применение теоремы о движении центра масс**

**Задача 54.** Груз 1, находящийся на верхнем основании прямоугольной пирамиды *ABCD*, соединен с грузом 2 нерастяжимой нитью, перекинутой через блок $C$ (рис. 5.1). Определить перемещение пирамиды, если груз 2 опустился на высоту 1 м. Масса груза 1 $m_1$ = 15 кг, груза 2 $m_2$ = 20 кг, пирамиды $m$ = 50 кг. Трение при движении груза 1 по пирамиде и пирамиды по горизонтальной поверхности не учитывать.

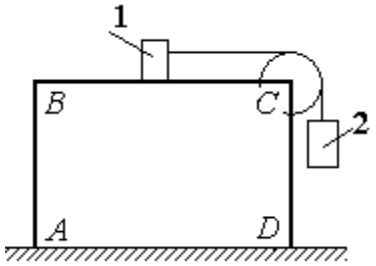


Рис. 5.1. Пирамида с системой подвижных грузов

*Решение*

Рассматриваем механическую систему, состоящую из двух грузов, соединённых нерастяжимой нитью, блока $C$ и пирамиды *ABCD*.

Внешние силы, приложенные к системе: силы тяжести грузов и пирамиды – $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}$ и нормальная реакция $\vec{N}$ опоры поверхности, на которой стоит пирамида. Направления векторов внешних сил показаны на рис. 5.2.

Выберем неподвижную систему координат *Axy*, как показано на рис. 5.2. Все внешние силы, действующие на механическую систему, вертикальны, поэтому дифференциальное уравнение, составленное на основании теоремы о движении центра масс механической системы в проекции на ось *Ax,* имеет вид:

$$(m + m_1 + m_2)\ddot{x}_C = P_{1x} + P_{2x} + P_x + N_x = 0$$

$$\text{или} \quad \ddot{x}_C = 0,$$

где $x_C$ – координата центра масс системы.

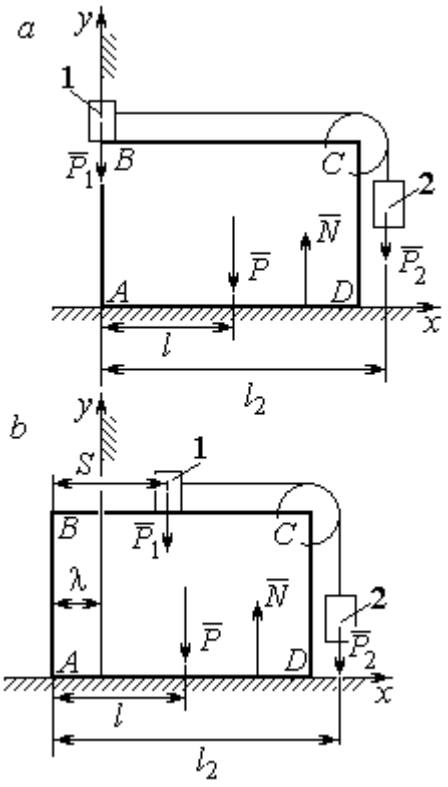



Рис. 5.2. Расчётная схема перемещения пирамиды: *a* – начальное положение; *b* – положение пирамиды при перемещении грузов на расстояние *S*

Проинтегрировав его дважды, получим закон движения центра масс системы: $x_C = C_1 t + C_2$, где константы интегрирования $C_1$ и $C_2$ находятся из начальных условий. Предположим, в начальный момент движение в механической системе отсутствовало и координата центра масс системы была равна $x_{C0}$ (на рис. 5.2, *a* не показана), то есть при $t = 0$ $x_C(0) = x_{C0}$ и $\dot{x}_C(0) = 0$. Подставляя начальные условия, получим: $C_1 = 0$, $C_2 = x_{C0}$. В результате закон движения центра масс системы имеет вид: $x_C = x_{C0}$. Последнее означает, что при любом перемещении тел в системе координата центра масс системы на оси *Ax* остаётся постоянной, равной своему начальному значению.

Предположим, в начальный момент времени груз 1 находился у левого края призмы, как показано на рис. 5.2, *a*.

Начальная координата $x_{C0}$ центра масс системы находится из равенства $(m_1 + m_2 + m)x_{C0} = \sum m_k x_k = m_1 \cdot 0 + m_2 l_2 + ml$, где $l_2$ – расстояние от начала координат до линии действия силы тяжести груза 2 (координата центра масс груза 2 на оси *Ax*); $l$ – аналогичное расстояние до линии действия силы тяжести

пирамиды (см. рис. 5.2, *a*). Тогда начальная координата центра масс системы: $x_{C0} = \dfrac{m_2 l_2 + ml}{(m_1 + m_2 + m)}$.

Положение грузов в системе, после того как груз 1 переместился на расстояние *S*, и положение призмы показано на рис. 5.2, *b*. На рисунке отмечено, что при перемещении груза 1 вправо на расстояние *S* призма *ABCD* сместилась влево на расстояние $\lambda$. Координата $x_{C1}$ центра масс для нового положения системы определяется из равенства:

$$(m_1 + m_2 + m)x_{C1} = m_1(S - \lambda) + m_2(l_2 - \lambda) + m(l - \lambda).$$

Выражая отсюда координату $x_{C1}$ и приравнивая её начальному значению координаты центра масс $x_{C0} = x_{C1}$, найдём перемещение пирамиды $\lambda = \dfrac{m_1 S}{(m_1 + m_2 + m)}$. Подставляя данные задачи, получим $\lambda = 0{,}18$ м.

## 5.2. Теорема об изменении кинетического момента системы относительно оси

**Момент инерции однородного диска** радиусом *R*, массой *m* относительно оси *z*, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости диска: $J_z = \dfrac{1}{2}mR^2$. **Для неоднородных тел момент инерции** относительно оси *z* вычисляется по формуле: $J_z = mi_z^2$, где $i_z$ – радиус инерции тела.

**Кинетическим моментом (моментом количества движения) системы относительно неподвижной оси *z*** называется величина, равная сумме моментов количеств движения точек относительно этой оси $\vec{L}_z = \sum M_z(m_k \vec{V}_k)$.

**Для твёрдого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси** *z*, **кинетический момент**: $L_z = J_z\omega$, где $J_z$ и $\omega$ – момент инерции и угловая скорость тела. **Теорема об изменении кинетического момента системы относительно оси**. Производная по времени от кинетического момента системы

относительно неподвижной оси $z$ равна сумме моментов внешних сил относительно той же оси: $\frac{dL_z}{dt} = \sum M_z(\vec{F}_k^e)$.

## Примеры решения задач на применение теоремы об изменении кинетического момента системы

**Задача 55.** Для подъёма груза используется лебёдка со ступенчатым барабаном и противовесом. Груз 1 массой $m_1$ поднимается на канате, навитом на барабан 2 массой $m_2$ радиуса $R$. Противовес 3 массой $m_3$ прикреплён к канату, который навит на малую ступень барабана радиуса r (рис. 5.3). Радиус инерции барабана относительно оси вращения $i_z$. На барабан действует постоянный момент сил сопротивления $M_c = 60$ Н·м. В начале движения к барабану лебёдки прикладывается вращающий момент, пропорциональный времени: $M_{вр} = 620 + 30t$ Н·м, который через 2 с отключается. Определить, на какую высоту поднимется груз, если движение началось из состояния покоя. Массы грузов и барабана: $m_1 = 100$ кг, $m_2 = 50$ кг, $m_3 = 20$ кг. Радиусы ступеней барабана и радиус инерции: $R = 0{,}6$ м; $r = 0{,}4$ м; $i_z = 0{,}5$ м.

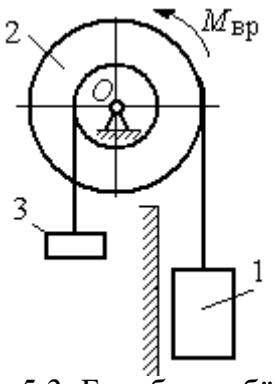


Рис. 5.3. Барабан лебёдки с грузом и противовесом

*Решение*

Решение следует рассматривать на двух этапах. На первом груз поднимается под действием вращающего момента, на втором – по инерции.

Рассмотрим механическую систему, состоящую из груза 1, барабана 2 и противовеса 3. На систему действуют силы тяжести груза $\vec{P}_1$, барабана $\vec{P}_2$, противовеса $\vec{P}_3$, реакция шарнира $\vec{R}$, пара сил с моментом, равным моменту вращения $M_{вр}$, и пара сил с моментом сопротивления $M_c$. Направления векторов сил и моментов показаны на рис. 5.4. Выберем начало оси $y$, вдоль

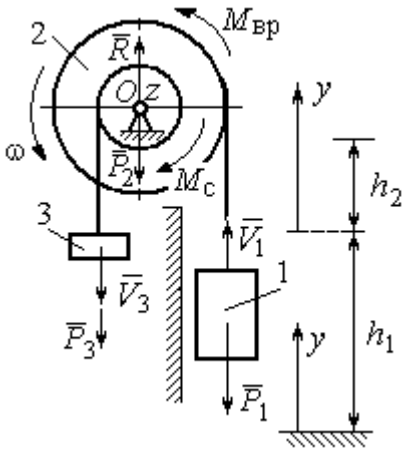



Рис. 5.4. Силы, действующие на систему во время движения

которой поднимается груз на первом участке движения, в точке начала движения (см. рис. 5.4).

Воспользуемся теоремой об изменении кинетического момента системы относительно оси z, проходящей через центр $O$: $\frac{dL_z}{dt} = \sum M_z(\vec{F}_k^e)$. Кинетический момент системы относительно оси $z$ равен сумме кинетических моментов барабана, груза и противовеса: $L_z = L_z^{бар} + L_z^{гр} + L_z^{пр}$. Кинетический момент барабана, вращающегося вокруг неподвижной оси $z$: $L_z^{бар} = J_z\omega$, где $J_z$ – момент инерции барабана относительно оси $z$, $J_z = m_2 i_z^2$; $\omega$ – угловая скорость барабана. Рассматривая груз и противовес как материальные точки, найдём их кинетические моменты относительно оси $z$: $L_z^{гр} = M_z(m_1\vec{V}_1) = m_1V_1R$; $L_z^{пр} = M_z(m_3\vec{V}_3) = m_3V_3r$.

Суммарный кинетический момент системы:

$$L_z = L_z^{бар} + L_z^{гр} + L_z^{пр} = m_2 i_z^2\omega + m_1V_1R + m_3V_3r.$$

Выразим скорости груза 1 и противовеса 3 через угловую скорость барабана: $V_1 = \omega R$, $V_3 = \omega r$ - и подставим их в выражение кинетического момента. Получим $L_z = (m_2 i_z^2 + m_1R^2 + m_3r^2)\omega = (m_2 i_z^2 + m_1R^2 + m_3r^2)\frac{V_1}{R}$.

Суммарный момент внешних сил относительно оси $z$

$$\sum M_z(\vec{F}_k^e) = M_{вр} - M_c - P_1R + P_3r.$$

Дифференциальное уравнение движения груза:

$$(m_2 i_z^2 + m_1R^2 + m_3r^2)\frac{dV_1}{dt} = (M_{вр} - M_c - P_1R + P_3r)R,$$

или с учётом данных задачи $\frac{dV_1}{dt} = 0{,}58 + 0{,}35t$.

Дважды интегрируя это уравнение с нулевыми начальными условиями, найдём скорость груза $V_1$ и проходимый им путь $y$ как функции времени:

$$V_1(t) = 0{,}58t + 0{,}175t^2; \quad y(t) = 0{,}29t^2 + 0{,}058t^3.$$

Из уравнений движения найдём: при $t = 2$ с (конец первого участка) груз поднялся на высоту $h_1 = y(2) = 1{,}62$ м и имел скорость $V_1 = V_1(2) = 1{,}86$ м/с.

На втором участке движения груз продолжает подниматься вверх. Уравнение движения груза здесь аналогично первому участку, за исключением вращающего момента (см. рис. 5.4):

$$(m_2 i_z^2 + m_1 R^2 + m_3 r^2)\frac{dV_1}{dt} = (-M_c - P_1 R + P_3 r)R, \text{ или } \frac{dV_1}{dt} = -6{,}61.$$

Представим ускорение груза в виде: $\frac{dV_1}{dt} = \frac{dV_1 dy}{dy dt} = V_1 \frac{dV_1}{dy}$. Теперь уравнение движения груза на втором участке имеет вид: $V_1 \frac{dV_1}{dy} = -6{,}61$. Интегрируя его, получим зависимость скорости груза от пройденного пути $\frac{V_1^2}{2} = -6{,}61y + C_3$. Выберем начало второго участка на высоте $h_1$. Из начальных условий движения груза: при $t = 0$, $y = 0$, $V_1 = 1{,}86$ м/с, получим: $C_3 = 1{,}73$.

Максимальную высоту $h_2$, на которую поднялся груз на втором участке, определим из условия, что в этой точке скорость груза обращается в нуль. Имеем $0 = -6{,}61h_2 + 1{,}73$, откуда $h_2 = 0{,}26$ м. Максимальная высота подъёма груза $H = h_1 + h_2 = 1{,}88$ м.

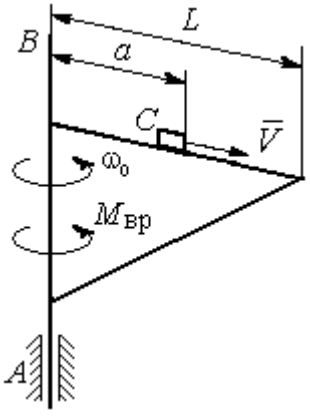


Рис. 5.5. Поворотный кран

**Задача 56.** Тележка $C$ поворотного подъёмного крана (рис. 5.5) движется с постоянной относительно стрелы скоростью $V = 0{,}5$ м/с. Длина стрелы $L = 10$ м, масса тележки с грузом $m_1 = 100$ кг, момент инерции крана относительно оси вращения $AB$ без учёта тележки и груза $J = 1800$ кг·м$^2$. Двигатель крана создаёт

постоянный вращающий момент $M_{вр}$ = 400 Н·м. Определить угловую скорость крана в момент, когда тележка достигнет края стрелы, если в начальный момент конструкция вращалась с угловой скоростью $\omega_0$ = 2 рад/с, а тележка находилась на расстоянии $a$ = 1 м от оси вращения.

*Решение*

На систему действуют внешние силы: $\vec{P}_1$ – сила тяжести тележки с грузом, $\vec{P}_2$ – сила тяжести поворотного крана (на рис. 5.6 показана в условном центре тяжести крана); $\vec{R}_x$, $\vec{R}_y$ – составляющие реакции подшипника $A$ и пара сил с моментом, равным вращающему моменту $M_{вр}$ (см. рис. 5.6). Применим к описанию движения системы теорему об изменении кинетического момента системы относительно оси вращения $z$, направленной вдоль линии $AB$.

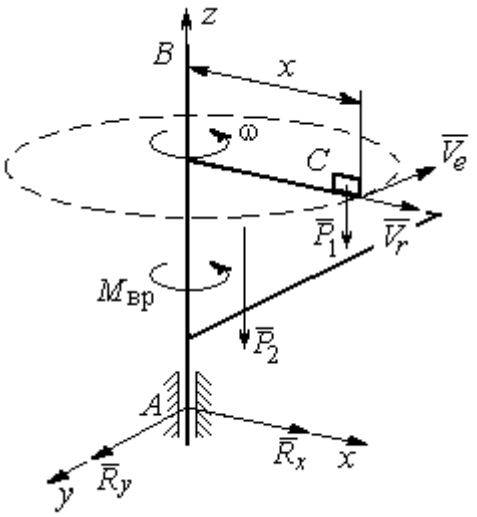


Рис. 5.6. Внешние силы, действующие на кран при его движении

Поскольку силы тяжести параллельны оси вращения крана, а составляющие реакции шарнира $A$ пересекают её, то моменты этих сил относительно оси $z$ равны нулю и теорема об изменении кинетического момента системы принимает вид: $\frac{dL_z}{dt} = M_{вр}$. Интегрируя это уравнение при постоянном вращающем моменте, получим равенство: $L_z - L_{z0} = M_{вр}t$, где $L_z, L_{z0}$ – кинетический момент системы в текущий и начальный моменты времени.

Кинетический момент системы $L_z$ равен сумме: $L_z = L_z^{кран} + L_z^{груз}$. Кинетический момент крана как твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси: $L_z^{кран} = J\omega$. Полагая тележку с грузом материальной точкой, определим её кинетический момент $L_z^{груз}$, как момент вектора количества

движения тележки относительно оси $z$. Тележка с грузом участвует в сложном движении. Вектор абсолютной скорости тележки $\vec{V}_{\text{абс}}$ равен сумме $\vec{V}_{\text{абс}} = \vec{V}_r + \vec{V}_e$, где $\vec{V}_r$ относительная скорость тележки (перемещение по стреле крана); $\vec{V}_e$ – переносная скорость (движение вместе с краном). Воспользовавшись теоремой Вариньона при вычислении момента количества движения тележки с грузом, получим:

$$L_z^{\text{груз}} = M_z(m_1\vec{V}_{\text{абс}}) = M_z(m_1\vec{V}_e + m_1\vec{V}_r) = M_z(m_1\vec{V}_e) = m_1 V_e x = m_1\omega x^2.$$

В результате суммарный кинетический момент системы в текущий момент времени $L_z = L_z^{\text{кран}} + L_z^{\text{груз}} = \left(J + m_1x^2\right)\omega$. Тогда начальный кинетический момент систем: $L_{z0} = \left(J + m_1a^2\right)\omega_0$.

Подставляя выражения начального и текущего кинетического моментов в уравнение движения, получим: $\left(J + m_1x^2\right)\omega - \left(J + m_1a^2\right)\omega_0 = M_{\text{вр}}t$, откуда закон изменения угловой скорости крана $\omega = \dfrac{M_{\text{вр}}t + \left(J + m_1a^2\right)\omega_0}{\left(J + m_1x^2\right)}$. Момент времени $t_{\text{к}}$, когда тележка достигнет края стрелы ($x = L$), найдём из условия движения тележки по стреле с постоянной скоростью: $Vt_{\text{к}} = L - a$. С учётом данных задачи угловая скорость крана в этот момент $\omega(t_{\text{к}}) = 0{,}93$ рад/с.

### 5.3. Теорема об изменении кинетической энергии системы

**Кинетическая энергия тела при поступательном движении** $T = \dfrac{1}{2}mV_C^2$, где $m$ – масса тела; $V_C$ – скорость центра масс тела; **при вращательном движении** вокруг неподвижной оси $z$: $T = \dfrac{1}{2}J_z\omega^2$, где $J_z$ – момент инерции тела относительно оси $z$; $\omega$ – угловая скорость тела; **при плоскопараллельном движении**: $T = \dfrac{1}{2}mV_C^2 + \dfrac{1}{2}J_{zC}\omega^2$, где $m$ – масса тела; $V_C$, $\omega$ – скорость центра

масс и угловая скорость тела; $J_{zC}$ – момент инерции тела относительно оси $z$, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения.

**Работа постоянной силы** $F$ при прямолинейном перемещении точки приложения силы $A = FS\cos\alpha$, где $S$ – перемещение точки; $\alpha$ – постоянный угол между перемещением и направлением силы. **Работа пары сил с постоянным моментом** $M$ при повороте тела на конечный угол $\varphi$ вычисляется по формуле: $A = \pm M\varphi$, где $\varphi$ – угол поворота тела. Работа считается положительной, если пара сил стремится повернуть тело в направлении его вращения, и отрицательной – в противном случае.

**Мощностью силы** $F$ называют величину, равную скалярному произведению силы на скорость точки её приложения: $N = \vec{F} \cdot \vec{V}$, где $V$ – скорость точки приложения силы. При плоском движении тела мощность силы равна сумме скалярных произведений: $N = \vec{F} \cdot \vec{V}_O + \vec{M}_O \cdot \vec{\omega}$, где $V_O$ – скорость точки, выбранной полюсом; $\omega$ – угловая скорость тела; $\vec{M}_O = M_O(\vec{F})$ – момент силы относительно полюса. Если в качестве полюса выбрать точку $K$ – мгновенный центр скоростей, то мощность силы $N(\vec{F}) = \vec{M}_K(\vec{F}) \cdot \vec{\omega}$, где $M_K(\vec{F})$ – момент силы относительно мгновенного центра скоростей.

**Теорема об изменении кинетической энергии системы в дифференциальной форме.** Производная по времени от кинетической энергии системы равна сумме мощностей внешних и внутренних сил $\frac{dT}{dt} = \sum N(\vec{F}_k^e) + \sum N(\vec{F}_k^i)$.

**Теорема об изменении кинетической энергии системы на конечном перемещении**. Изменение кинетической энергии системы при перемещении её из начального состояния в текущее равно сумме работ внешних и внутренних сил, действующих на систему: $T - T_0 = \sum A(\vec{F}_k^e) + \sum A(\vec{F}_k^i)$.

Механические системы, состоящие из абсолютно твердых тел, соединенных гибкими нерастяжимыми нитями, называются **неизменяемыми**. В

неизменяемых системах сумма работ и сумма мощностей внутренних сил равны нулю: $\sum A(\vec{F}_k^i) = 0$.

## Примеры решения задач на применение теоремы об изменении кинетической энергии системы

**Задача 57.** Планетарный механизм, позволяющий получать повышенные передаточные отношения угловых скоростей, состоит из трех одинаковых колёс, соединённых кривошипом *OA* (рис. 5.7). Колесо 1 неподвижно, кривошип *OA* вращается с угловой скоростью $\omega_{OA}$ и приводит в движение колёса 2 и 3. Полагая массы колёс и их радиусы одинаковыми, равными $m$ и $r$, и пренебрегая массой кривошипа, найти кинетическую энергию механизма.

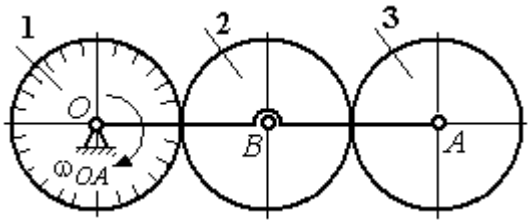


Рис. 5.7. Планетарный механизм

*Решение*

Кинетическая энергия механизма $T$ равна сумме энергий колёс 2 и 3: $T = T_2 + T_3$. Энергия колеса 1 равна нулю потому, что оно неподвижно, а энергия кривошипа равна нулю, так как массой кривошипа пренебрегаем. При движении механизма колесо 2, увлекаемое кривошипом, катится по неподвижной поверхности первого колеса. Энергия колеса 2: $T_2 = \dfrac{mV_B^2}{2} + \dfrac{J_{2B}\omega_2^2}{2}$, где $V_B$ – скорость центра масс колеса 2, $J_{2B}$ – момент инерции колеса 2 относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости колеса, $J_{2B} = \dfrac{mr^2}{2}$.

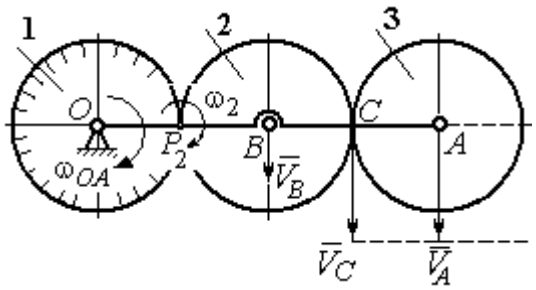


Рис. 5.8. Расчётная схема вычисления энергии механизма

Выразим кинетическую энергию колеса 2 через угловую скорость $\omega_{OA}$ кривошипа $OA$.

Скорость точки $B$, лежащей на кривошипе $OA$: $V_B = \omega_{OA} \cdot OB = \omega_{OA} 2r$.

Так как точка $P_2$ касания колёс 1 и 2 является мгновенным центром скоростей колеса 2 (рис. 5.8), угловая скорость колеса 2 $\omega_2 = \dfrac{V_B}{BP_2}$. В результате получим: $\omega_2 = 2\omega_{OA}$. Подставив зависимости $V_B$ и $\omega_2$ в выражение кинетической энергии колеса 2, найдём:

$$T_2 = \frac{m(\omega_{OA} 2r)^2}{2} + \frac{mr^2}{2} \cdot \frac{(2\omega_{OA})^2}{2} = 3m\omega_{OA}^2 r^2.$$

Вычислим кинетическую энергию колеса 3. Найдём скорость точки $C$, считая, что она принадлежит колесу 2: $V_C = \omega_2 \cdot P_2C = 4\omega_{OA} r$. Скорость точки $A$ – центра колеса 3 определим, полагая, что точка $A$ лежит и на кривошипе: $V_A = \omega_{OA} \cdot OA = 4\omega_{OA} r$. Скорости двух точек $A$ и $C$ колеса 3 равны и параллельны, причём линия $AC$ перпендикулярна векторам скоростей $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_C$ (см. рис. 5.8). В этом случае мгновенный центр скоростей отсутствует и колесо 3 совершает мгновенно-поступательное движение. Энергия поступательного движения колеса 3: $T_3 = \dfrac{mV_A^2}{2} = \dfrac{m(4\omega_{OA} r)^2}{2} = 8m\omega_{OA}^2 r^2$.

Окончательно, энергия механизма: $T = T_2 + T_3 = 11m\omega_{OA}^2 r^2$.

**Задача 58.** Горизонтальный желоб $DE$ опирается на блок 1 и на каток 3 одинакового радиуса $r$ (рис. 5.9). Блок 1 весом $P_1$ вращается вокруг неподвижной оси $O_1$. Каток 3 катится по горизонтальному рельсу без проскальзывания. На одной оси с катком 3 жестко связано колесо 2 радиуса $R$. Их общий вес равен $Q$, а общий радиус инерции относительно оси $z$, проходящей через центр масс $C$ перпендикулярно плоскости катка, равен $i_z$. Система движется в вертикальной плоскости под действием сил тяжести, силы $\vec{F}$ и пары сил с моментом $M$. Массой желоба пренебрегаем. Скольжение между желобом и блоком 1, а также

катком 3 отсутствует. Определить ускорение центра масс колеса 2 и катка 3 и угловое ускорение блока 1, если: $P_1$ = 40 Н, $Q$ = 60 Н, $F$ = 50 Н, $M$ = 45 Н·м, $R$ = 0,8 м, $r$ = 0,6 м, $i_z$ = 0,4 м.

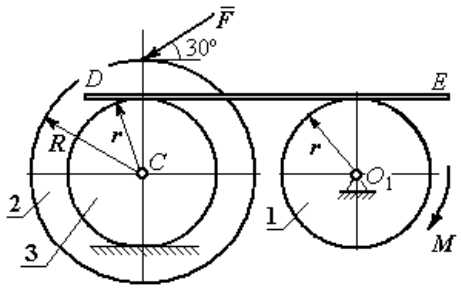


Рис. 5.9. Схема движения механической системы

*Решение*

Для решения задачи воспользуемся теоремой об изменении кинетической энергии для неизменяемых механических систем: $\frac{dT}{dt} = \sum N(\vec{F}_k^e)$, где $T$ – энергия системы в её текущем положении; $\sum N(\vec{F}_k^e)$ – суммарная мощность внешних сил.

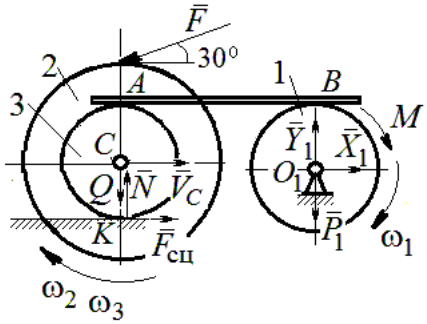


Рис. 5.10. Расчетная схема для исследования движения системы

Предположим, во время движения системы блок 1 вращается по ходу часовой стрелки.

Угловые скорости $\omega_1$, $\omega_2$ блока 1, катка 3 и скорость $\vec{V}_C$ центра масс катка 3 показаны на рис. 5.10. Угловая скорость колеса 2 и катка 3 равны: $\omega_3 = \omega_2$.

Кинетическая энергия вращательного движения блока 1 $T_1 = \frac{1}{2} J_{zO_1} \omega_1^2$, где $J_{zO_1}$ – осевой момент инерции блока, $J_{zO_1} = \frac{m_1 r^2}{2}$.

Фигура, состоящая из катка 3 и колеса 2, двигается плоскопараллельно. Кинетическая энергия фигуры определяется по формуле: $T_2 = \frac{1}{2} m V_C^2 + \frac{1}{2} J_{zC} \omega_2^2$, где $m$ – общая масса катка и колеса, $m = \frac{Q}{g}$, $J_{zC}$ – момент инерции фигуры относительно оси $z$, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости диска, $J_{zC} = m i_z^2$,

У катка 3 мгновенный центр скоростей находится в точке касания его с неподвижной поверхностью (точка $K$ на рис. 5.10). Тогда $\omega_3 = \dfrac{V_C}{r}$. Скорость точки $A$ катка $V_A = \omega_3 2r = 2V_C$. Приравнивая скорость точки $A$ на катке 2 к скорости точки $B$ на блоке 1, получим $\omega_1 = \dfrac{2V_C}{r}$.

Найдём кинетическую энергию системы, выраженную через скорость центра масс катка 3:

$$T = T_1 + T_2 = \frac{P_1}{g} V_C^2 + \frac{Q}{2g}\left(1 + \frac{i_z^2}{r^2}\right) V_C^2 = \frac{V_C^2}{2g}\left[2P_1 + Q\left(1 + \frac{i_z^2}{r^2}\right)\right].$$

Найдем сумму мощностей внешних сил.

На блок 1 действуют: сила тяжести $\vec{P}_1$, пара сил с моментом $M$ и реакция шарнира $O_1$, разложенная на составляющие $\vec{X}_1$, $\vec{Y}_1$ (рис. 5.10). Мощности силы тяжести $\vec{P}_1$ и сил реакции $\vec{X}_1$, $\vec{Y}_1$ подшипника $O_1$ равны нулю, так как нет перемещения точек приложения этих сил. Момент $M$ направлен в сторону вращения блока 1, его мощность $N(M) = M\omega_1 = M\dfrac{2V_C}{r}$.

На каток 3 (вместе с жестко связанным с ним колесом 2) действуют: сила $\vec{F}$, сила тяжести $\vec{Q}$ катка и колеса, нормальная реакция опоры $\vec{N}$ и сила сцепления $\vec{F}_{\text{сц}}$ катка 3 с поверхностью.

Мощности сил $\vec{N}$ и $\vec{F}_{\text{сц}}$ равны нулю, так как точкой приложения этих сил является мгновенный центр скоростей катка 3, скорость которого равна нулю. Мощность силы тяжести $\vec{Q}$ равна нулю, так как угол между вектором силы и вектором скорости точки $C$ равен 90°.

Для определения мощности силы $\vec{F}$, приложенной к колесу, выберем в качестве полюса точку $K$ – мгновенный центр скоростей диска 2. С учётом того, что скорость $V_K = 0$, получим:

$$N(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{V}_K + \vec{M}_K(\vec{F}) \cdot \vec{\omega}_2 = \vec{M}_K(\vec{F})\vec{\omega}_2 =$$

$$= - F(r + R)\omega_2 \cos 30° = - FV_C\left(1 + \frac{R}{r}\right)\cos 30°.$$

Поскольку вращение, создаваемое моментом силы $\vec{F}$ относительно центра *K*, противоположно выбранному направлению угловой скорости катка, мощность силы $\vec{F}$ отрицательная.

Суммарная мощность внешних сил:

$$\sum N(F^e) = - FV_C\left(1 + \frac{R}{r}\right)\cos 30° + M\frac{2V_C}{r}.$$

Составляем уравнение теоремы об изменении кинетической энергии системы. Находим производную по времени от кинетической энергии системы $\frac{dT}{dt} = \frac{V_C}{g}a_C\left[2P_1 + Q\left(1 + \frac{i_z^2}{r^2}\right)\right]$ и приравниваем суммарной мощности внешних сил. Получим:

$$\frac{1}{g}a_C\left[2P_1 + Q\left(1 + \frac{i_z^2}{r^2}\right)\right] = - F\left(1 + \frac{R}{r}\right)\cos 30° + \frac{2M}{r},$$

откуда с учётом исходных данных задачи ускорение центра масс диска 2 $a_C$ = 2,88 м/с$^2$. Для определения углового ускорения блока 1 продифференцируем по времени равенство $\omega_1 = \frac{2V_C}{r}$. Получим: $\varepsilon_1 = \frac{2a_C}{r}$ = 9,6 рад/с$^2$.

**Задача 59.** Каток радиуса *r*, весом *P* закатывают вверх по наклонной плоскости приложив в центре катка силу $\vec{F}$ под углом 30° к наклонной плоскости (рис. 5.11). Сама плоскость наклонена под углом 30° к горизонту. Величина силы *F* = 2*P*. В начальном положении центр катка имел скорость $V_0$.

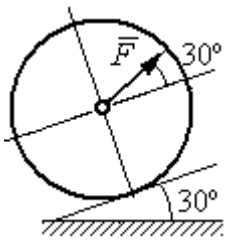


Рис. 5.11. Движение катка на наклонной плоскости

На какое расстояние $S$ переместился центр катка, если в конце перемещения его скорость удвоилась.

*Решение*

Применим теорему об изменении кинетической энергии на конечном перемещении системы: $T - T_0 = \sum A(F_k)$. На каток действует сила тяжести $\vec{P}$, сила $\vec{F}$, нормальная реакция опоры $\vec{N}$ и сила $\vec{F}_{\text{сц}}$ сцепления диска с наклонной плоскостью (рис. 5.12). При перемещении центра катка на расстояние $S$ вдоль наклонной плоскости работу совершают только сила $\vec{F}$: $A(\vec{F}) = F\cos 30° S$ и сила тяжести: $A(\vec{P}) = -Ph$, где $h$ – перепад высот при перемещении центра масс катка. Работа реакции опоры и силы сцепления равна нулю.

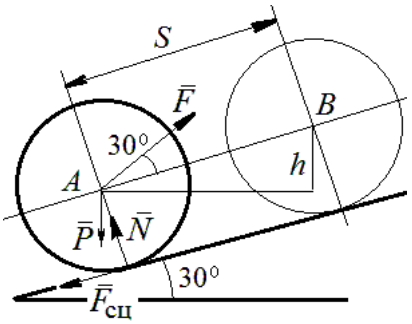


Рис. 5.12. Расчётная схема движения катка

Кинетическая энергия катка $T = \frac{1}{2} m V_A^2 + \frac{1}{2} J_{zA} \omega^2$, где $J_{zA}$ – момент инерции фигуры относительно оси $z$, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости диска, $J_{zA} = \frac{mr^2}{2}$. Выражая угловую скорость катка через скорость центра масс $\omega = \frac{V_A}{r}$, с учётом выражения момента инерции катка, получим энергию катка в виде: $T = \frac{3}{4} m V_A^2$.

Составим уравнение теоремы об изменении кинетической энергии при перемещении центра катка на расстояние $S$: $\frac{3}{4} m V_B^2 - \frac{3}{4} m V_A^2 = F\cos 30° S - Ph$, где $V_A = V_0$ $V_B = 2V_0$, $F = 2P$, $h = S\sin 30°$.

Найдём искомое перемещение: $S = \frac{9V_0^2}{4g(2\cos 30° - \sin 30°)}$.

## Упражнения

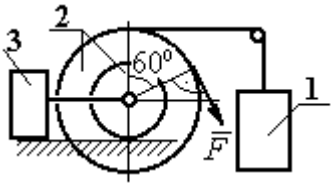


Рис. 5.16. Схема механизма катка

Упражнение 5.1. Крановая тележка массы $m_1$ может перемещаться по горизонтальной балке без трения (рис. 5.13). В центре масс тележки закреплён трос длиной $l$, на другом конце которого привязан груз массы $m_2$. Трос может совершать колебательные движения в вертикальной плоскости. В начальный момент трос был в вертикальном положении. Определить горизонтальное перемещение тележки в зависимости от угла наклона троса. Весом троса пренебречь.

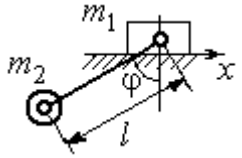


Рис. 5.13. Движение крановой тележки

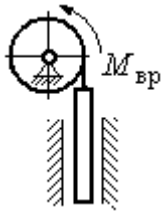


Рис. 5.14. Схема механизма лебёдки

Упражнение 5.2. К барабану лебёдки, поднимающей штангу, приложен вращающий момент, пропорциональный времени $M_{ВР} = kt$ (рис. 5.14). Штанга массы $m_1$ поднимается посредством каната, навитого на барабан массы $m_2$ и радиуса $r$. В начальный момент система находилась в покое. Определить угловую скорость барабана, считая его однородным диском.

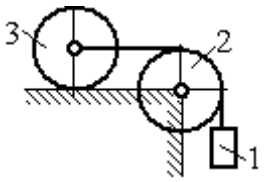


Рис. 5.15. Схема движения системы

Упражнение 5.3. Груз 1 массы $m_1$ подвешен на нерастяжимом тросе, другой конец которого переброшен через блок 2 и закреплён в центре масс катка 3 (рис. 5.15). Каток 3 катится по горизонтальной поверхности без проскальзывания. Блок 2 и каток 3 – однородные диски массы $m_2$ и $m_3$, радиуса $r$. В начальный момент система находилась в покое. Определить скорость груза, когда он опустится на высоту $h$, если к катку 3 приложен момент $M$.

Упражнение 5.4. Механическая система включает два груза 1 и 3 одинакового веса $P$ и каток 2 весом $2P$, радиусом $R = 2r$ с цилиндрическим выступом радиусом $r$ (рис. 5.16). Каток катится выступом по неподвижной поверхности без проскальзывания. К катку по касательной к окружности приложена сила $F = 2P$ . Найти ускорение центра масс катка, если его радиус инерции относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения: $i_{zC} = r\sqrt{2}$.

## 5.4. Применение общих теорем динамики системы к описанию движений твёрдого тела

**Поступательное движение твердого тела** описывается дифференциальными уравнениями: $m\ddot{x} = \sum F_{kx}^e$, $m\ddot{y} = \sum F_{ky}^e$, $m\ddot{z} = \sum F_{kz}^e$ - или в алгебраической форме $ma_{Cx} = \sum F_{kx}^e$, $ma_{Cy} = \sum F_{ky}^e$, $ma_{Cz} = \sum F_{kz}^e$, где $m$ – масса тела; $\ddot{x} = a_{Cx}$, $\ddot{y} = a_{Cy}$, $\ddot{z} = a_{Cz}$ – проекции ускорения центра масс тела на координатные оси; $F_{kx}^e$, $F_{ky}^e$, $F_{kz}^e$ – проекции внешних сил.

**Вращательное движение твердого тела** относительно неподвижной оси $z$ описывается дифференциальным уравнением: $J_z \frac{d\omega}{dt} = \sum M_z(\vec{F}_k^e)$ или алгебраическим уравнением: $J_z\varepsilon = \sum M_z(\vec{F}_k^e)$, где $\omega$, $\varepsilon$ – угловая скорость и угловое ускорение тела; $\sum M_z(\vec{F}_k^e)$ – сумма моментов внешних сил относительно оси $z$; $J_z$ – момент инерции тела относительно оси $z$.

**Плоскопараллельное движение твердого тела** описывается уравнениями движения центра масс и вращательного движения тела относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения.

В проекции на координатные оси уравнения плоскопараллельного движения тела имеют вид:

$$ma_{Cx} = \sum F_{kx}^e;\ ma_{Cy} = \sum F_{ky}^e;\ J_{zC}\varepsilon = \sum M_{zC}(\vec{F}_k^e),$$

где $a_{Cx}$, $a_{Cy}$– проекции ускорения центра масс тела; $F_{kx}^e$, $F_{ky}^e$ – проекции на оси координат внешних сил, действующих на тело; $J_{zC}$ – момент инерции тела относительно оси $z$, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения; $\varepsilon$ – угловое ускорение тела; $M_{zC}(\vec{F}_k^e)$ – моменты внешних сил относительно оси, проходящей через центр масс.

Проводя динамический расчет механической системы, следует рассматривать движение каждого тела системы в отдельности, предварительно освободив его от связей и заменив их действие реакциями.

**Примеры решения задач на составление уравнений движения твердых тел**

**Задача 59.** Лебёдка поднимает груз 1 массы $m_1 = 50$ кг посредством троса,

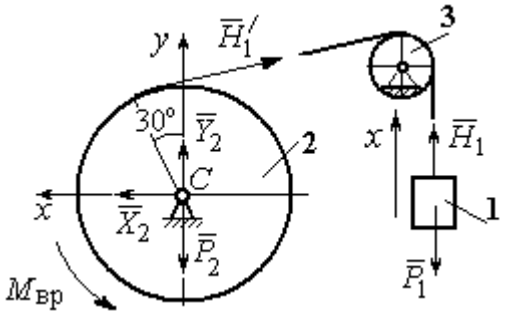



Рис. 5.18. Внешние силы и реакции, действующие на груз и барабан при движении системы

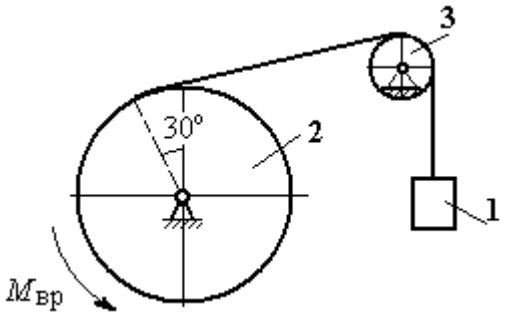



Рис. 5.17. Механизм лебёдки

переброшенного через блок 3 и навитого на барабан 2 массы $m_2 = 20$ кг, радиуса $r = 0{,}8$ м (рис. 5.17). К барабану приложен постоянный вращающий момент $M_{вр} = 480$ Н·м. Определить ускорение груза, натяжение троса и реакцию шарнира барабана 2. Весом троса и массой блока 3 пренебречь, барабан считать сплошным цилиндром.

*Решение*

Составим уравнение движения груза 1. Для этого освобождаем груз от связей, заменив действие троса реакцией. На груз действует сила тяжести $\vec{P}_1$ и реакция троса $\vec{H}_1$ (рис. 5.18). Выберем ось $x$ по направлению движения груза. Уравнение движения груза в проекции на ось $x$: $m_1 a_1 = H_1 - P_1$.

Рассмотрим движение барабана 2. Освободим барабан от связей и заменим их действие реакциями.

На барабан действует сила тяжести $\vec{P}_2$, пара сил с моментом вращения $M_{вр}$, реакция троса $\vec{H}_1'$ и реакция шарнира (на рис. 5.18 разложена на составляющие $\vec{X}_2$, $\vec{Y}_2$). Так как массой блока 3 пренебрегаем, то модули сил $\vec{H}_1$ и $\vec{H}_1'$ равны. Направления действия сил и момента показаны на рис. 5.18.

Уравнение вращательного движения барабана относительно оси $z$: $J_z\varepsilon_2 = \sum M_z(F_k) = M_{вр} - H_1'r$, где момент инерции барабана $J_z = \dfrac{m_2 r^2}{2}$.

Продифференцируем по времени равенство $V_1 = \omega_2 r$ и выразим угловое ускорение барабана через ускорение груза 1. Получим $\varepsilon_2 = \dfrac{a_1}{r}$. Подставляя выражение углового ускорения в уравнение вращательного движения барабана с учётом равенства модулей сил $\vec{H}_1$ и $\vec{H}_1'$, напишем уравнения движения барабана и груза в виде системы уравнений:

$$m_1 a_1 = H_1 - P_1, \quad m_2 a_1 = \frac{2M_{вр}}{r} - 2H_1,$$

откуда находим $a_1$= 1,82 м/с$^2$, $H_1$ = 581,8 Н. Натяжение троса численно равно реакции.

Для определения реакции шарнира составим (формально) уравнение движения центра масс блока 2 в проекциях на оси $x$, $y$ (см. рис. 5.18):

$$m_2 a_{Cx} = X_2 - H_1'\cos 30^\circ = 0, \; m_2 a_{Cy} = Y_2 + H_1'\cos 60^\circ - P_2 = 0.$$

Отсюда $X_2$ = 503,84 Н, $Y_2$ = – 94,7 Н, $R_2 = \sqrt{X_2^2 + Y_2^2}$ = 512,66 Н.

**Задача 60.** Барабан весом $G$, радиусом $R$ имеет цилиндрический выступ радиусом $r$ (рис. 5.19). Барабан скатывается по наклонной плоскости с углом наклона 30°, опираясь на неё поверхностью выступа. К барабану приложены постоянные силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$. Сила $\vec{F}_1$ направлена по касательной к поверхности барабана. Сила $\vec{F}_2$ действует под углом 30° к диаметру барабана, перпендикулярному наклонной плоскости. В начальный момент времени барабан приведён в равновесие парой сил с моментом $M$.

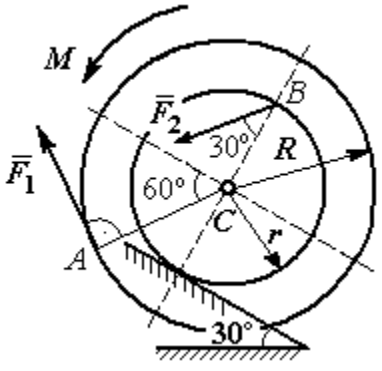


Рис. 5.19. Схема движения барабана по наклонной плоскости

Определить угловое ускорение барабана и закон движения центра масс, если в положении равновесия величину уравновешивающего момента увеличить в 1,2 раза. Исходные данные для решения задачи: $R$ = 0,6 м, $r$ = 0,2 м, $G$ = 100 Н, $F_1$ = 60 Н, $F_2$ = 25 Н, радиус инерции барабана $i_z$ = 0,4 м.

*Решение*

На барабан действуют силы $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, сила тяжести $\vec{G}$, пара сил с неизвестным моментом $M$, нормальная реакция опоры $\vec{N}$ и сила $\vec{F}_{\text{сц}}$ сцепления барабана с поверхностью. Сила сцепления приложена в точке $K$ касания выступа барабана с наклонной плоскостью и направлена вдоль неё (рис. 5.20).

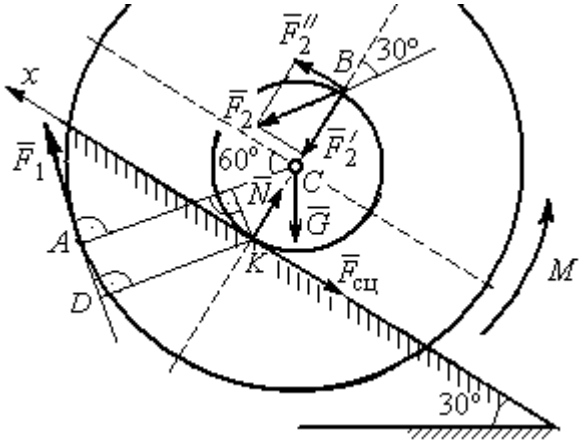



Рис. 5.20. Силы, действующие на барабан, во время движения

Для определения момента $M$, приводящего барабан в равновесие, запишем уравнение равновесия в виде равенства нулю моментов сил $\sum M_K(\vec{F}_k^e) = 0$ относительно точки $K$. Точка $K$ выбрана с той целью, что в уравнение не будет входить момент неизвестной силы сцепления.

На рис. 5.20 показано разложение силы $\vec{F}_2$: $\vec{F}_2 = \vec{F}_2' + \vec{F}_2''$. Значения составляющих определяются как проекции: $F_2' = F_2\cos 30°$, $F_2'' = F_2\sin 30°$.

Применяя теорему Вариньона, вычислим момент силы $\vec{F}_2$ относительно точки $K$: $M_K(\vec{F}_2) = M_K(\vec{F}_2') + M_K(\vec{F}_2'') = F_2\sin 30° \cdot 2r$.

Момент силы $\vec{F}_1$ относительно точки $K$:

$$M_K(\vec{F}_1) = -F_1 \cdot KD = -F_1(R - r\cos 30°).$$

В результате уравнение моментов сил при равновесии барабана принимает вид

$$\sum M_K(\vec{F}_k^e) = -F_1(R - r\cos 30°) + F_2\sin 30° \cdot 2r - Gr\sin 30° + M = 0.$$

Подставляя сюда исходные данные задачи, находим величину уравновешивающего момента $M = 30{,}61$ Н·м. Направление момента показано дуговой стрелкой на рис. 5.20.

Увеличим значение момента $M$, удерживающего барабан в равновесии, в 1,2 раза: $M_1 = 1{,}2M$. Возникшее после этого качение барабана вверх по наклонной плоскости представляет собой плоскопараллельное движение, которое описывается с применением теорем о движении центра масс и об изменении кинетического момента.

Уравнение движения центра масс барабана в проекции на ось $x$, направленную вверх по наклонной плоскости, имеет вид:

$$m\ddot{x}_C = F_1\cos 30° + F_2\cos 60° - G\cos 60° - F_{\text{сц}},$$

где $x_C$ – координата центра масс барабана.

Применив теорему об изменении кинетического момента барабана относительно оси $z$, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения и считая моменты сил положительными, если они создают вращение в сторону движущегося вверх барабана, выразим уравнение вращательного движения барабана вокруг оси $z$ в виде:

$$J_{zC}\ddot{\varphi} = -F_1R + F_2r\cos 60° + F_{\text{сц}}r + M_1,$$

где $\varphi$ – угол поворота барабана; $J_{zC}$ – момент инерции барабана, $J_{zC} = mi_z^2$; $i_z$ – радиус инерции. С учётом соотношения $\ddot{\varphi} = \dfrac{\ddot{x}_C}{r}$ получим уравнение:

$$m\ddot{x}_C\left(1 + \frac{i_z^2}{r^2}\right) = -F_1\left(\frac{R}{r} - \cos 30°\right) + 2F_2\cos 60° - G\cos 60° + \frac{M_1}{r}.$$

После подстановки данных задачи находим дифференциальное уравнение движения центра масс: $\ddot{x}_C = 0{,}6$. Дважды интегрируя его с нулевыми начальными условиями (так как движение началось из состояния покоя), находим закон движения центра масс: $x_C = 0{,}3t^2$ м. Из уравнения следует, что барабан движется в сторону положительного направления оси $x$.

Угловое ускорение барабана $\varepsilon = \ddot{\varphi} = \dfrac{\ddot{x}_C}{r}$ = 3 рад/с$^2$.

**Задача 61.** Механизм (рис. 5.21) включает в себя груз 1, каток 2 и ступенчатый барабан 3, соединённых нерастяжимыми нитями. Движение механизма происходит из состояния покоя в вертикальной плоскости под действием сил тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$, силы $\vec{F}$, приложенной в центре масс катка 2, и пары сил с моментом $M$, приложенной к барабану 3. Качение катка 2 по наклонной плоскости с углом наклона к горизонту 30º происходит без проскальзывания.

Каток 2 считать однородным диском радиуса $R_2$. Радиусы ступеней барабана 3: $R_3$, $r_3$, радиус инерции барабана $i_3$.

Найти ускорение груза 1, силы натяжения нитей и динамическую реакцию шарнира барабана 3, если $P_1 = P_2 = 2P$; $P_3 = 3P$, $F = 3P$; $M = Pr$, $R_2 = 2r$; $R_3 = 3r$; $r_3 = r$; $i_3 = r\sqrt{3}$.

*Решение*

Рассмотрим движение каждого тела системы отдельно, предварительно освободив тела от связей и заменив их действие реакциями. На рис. 5.22 изображены силы, действующие на тела системы, после освобождения их от

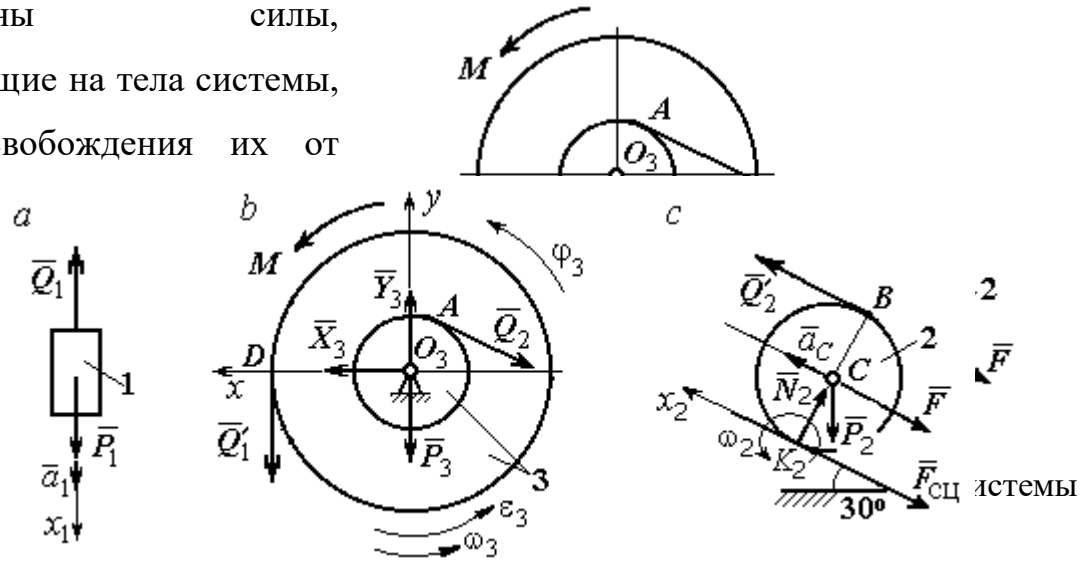



Рис. 5.22. Расчетные схемы для описания движения тел, входящих в систему

связей и направление движения каждого тела.

Допустим, груз движется вниз со скоростью $V_1$, ускорением $a_1$. К нему приложена сила тяжести $\vec{P}_1$ и реакция нити $\vec{Q}_1$ (рис. 5.22, *a*). Направим ось $x_1$ в сторону движения груза. Уравнение движения груза вдоль оси $x_1$ имеет вид:

$$m_1 a_1 = \sum F_{kx} = P_1 - Q_1 = 2P - Q_1 .$$

Барабан 3 вращается вокруг неподвижной оси $z$ , проходящей через центр масс $O_3$. На диск 3 действует сила тяжести $\vec{P}_3$, реакция подшипника $\vec{R}_3$ (на рис. 5.22, *b* показано разложение реакции на составляющие $\vec{X}_3$, $\vec{Y}_3$), пара сил с моментом $M$ и реакции нитей $\vec{Q}_1'$ и $\vec{Q}_2$ .

При составлении уравнения вращательного движения барабана моменты сил относительно оси считаем положительными, если они создают поворот в сторону вращения барабана. Уравнение вращения барабана 3 имеет вид:

$$J_{zO_3}\varepsilon_3 = \sum M_{zO_3}(F_k) = Q_1' R_3 + M - Q_2 r_3 = Q_1' 3r + Pr - Q_2 r ,$$

Момент инерции барабана относительно оси $z$: $J_{zO_3} = m_3 i_3^2 = \dfrac{9Pr^2}{g}$;

Каток 2 совершает плоскопараллельное движение. К нему приложена сила тяжести $\vec{P}_2$, сила $\vec{F}$, реакция нити $\vec{Q}_2'$, нормальная реакция $\vec{N}_2$ наклонной плоскости и сила $\vec{F}_{\text{сц}}$ сцепления диска с поверхностью (рис. 5.22, *c*).

Выберем ось $x_2$ по направлению движения центра масс катка 2. Плоскопараллельное движение катка описывается уравнениями движения его центра масс в проекции на ось $x_2$ и вращения вокруг оси, походящей через центр масс перпендикулярно плоскости диска:

$$m_2 a_C = Q_2' - F - F_{\text{сц}} - P_2 \cos 60^\circ = Q_2' - 3P - F_{\text{сц}} - P ;$$

$$J_C \varepsilon_2 = Q_2' R_2 + F_{\text{сц}} R_2 = Q_2' 2r + F_{\text{сц}} 2r , \quad J_C = \frac{m_2 R_2^2}{2} .$$

При составлении второго уравнения момент силы считается положительным, если он создаёт поворот в сторону вращения катка.

К системе четырех уравнений, описывающих движения тел в системе, необходимо добавить уравнения связей между ускорениями точек и угловыми ускорениями тел. Предположим, скорость центра масс катка 2 равна $V_C$ (см. рис. 5.22, *c*). Угловая скорость катка $\omega_2 = \dfrac{V_C}{CK_2} = \dfrac{V_C}{R_2}$, где $CK_2$ – расстояние от центра масс катка 2 до его мгновенного центра скоростей. Продифференцировав по времени последнее равенство, получим: $\varepsilon_2 = \dot{\omega}_2 = \dfrac{\dot{V}_C}{R_2} = \dfrac{a_C}{2r}$.

Скорость точки *B* катка 2 $V_B = \omega_2 \cdot BK_2 = 2V_C$. Приравняв скорость точки *A* к скорости точки *B* (см. рис. 5.21), получим: $2V_C = V_B = V_A = \omega_3 r_3 = \omega_3 r$, откуда $\omega_3 = \dfrac{2V_C}{r}$. После дифференцирования найдём: $\varepsilon_3 = \dfrac{2a_C}{r}$.

Скорость груза 1 связана со скоростью центра масс катка 2 следующим образом: $V_1 = V_D = \omega_3 R_3 = \dfrac{2V_C}{r} 3r = 6V_C$. Тогда ускорение груза 1 $a_1 = 6a_C$.

После подстановки уравнений связи в уравнения движения с учётом равенства модулей сил $\vec{Q}_1'$ и $\vec{Q}_1$, а также $\vec{Q}_2$ и $\vec{Q}_2'$ получим систему:

$$\frac{12P}{g} a_C = 2P - Q_1; \quad \frac{18P}{g} a_C = 3Q_1 + P - Q_2,$$

$$\frac{2P}{g} a_C = Q_2 - 4P - F_{\text{сц}}; \quad \frac{P}{g} a_C = Q_2 + F_{\text{сц}},$$

откуда находим: $a_C = 0{,}09g$, $Q_1 = 0{,}92P$, $Q_2 = 2{,}14P$.

Динамические реакции $\vec{X}_3$, $\vec{Y}_3$, действующие на ось вращающегося барабана 3 (рис. 5.22, *b*), определяются из уравнений, которые можно получить, формально применив к барабану теорему о движении центра масс. Так как центр масс барабана 3 неподвижен, его ускорение равно нулю, $a_{O_3} = 0$. Тогда уравнения движения его центра масс в проекциях на оси *x*, *y* имеют вид:

$$m_3 a_{O_3 x} = X_3 - Q_2 \cos 30^\circ = 0;$$

$$m_3 a_{O_3 y} = Y_3 - Q_1 - P_3 - Q_2 \cos 60^\circ = 0.$$

Подставляя значения $Q_1 = 0{,}92P$ и $Q_2 = 2{,}14P$, находим составляющие реакции оси барабана 3: $X_3 = Q_2 \cos 30^\circ = 1{,}85P$, $Y_3 = Q_1 + P_3 + Q_2 \cos 60^\circ = 4{,}98P$.

Полная величина реакции оси барабана 3: $R_3 = \sqrt{X_3^2 + Y_3^2} = 5{,}31P$.

**Задача 62.** Подъёмное устройство (рис. 5.23) состоит из однородного диска 1 массой $m_1$, радиусом $r_1$, ступенчатого диска 2 массой $m_2 = 3m_1$, радиусом $R_2 = 4r_1$ и радиусом ступеньки $r_2 = r_1$ и груза 3 массой $m_3 = 2m_1$. Система движется из состояния покоя в вертикальной плоскости под действием сил тяжести и пары сил с моментом $M = m_1 g r_1$, приложенной к диску 1. Определить ускорение груза 3 и натяжение нити груза 3, если радиус инерции ступенчатого диска относительно оси, походящей через центр масс, перпендикулярно плоскости диска 2, $i_{2C} = 2r_1$.

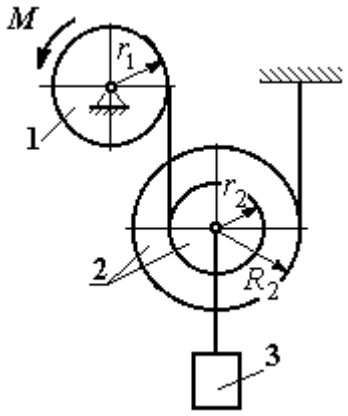


Рис. 5.23. Конструкция подъёмного устройства

Решение задачи осуществить с применением теоремы об изменении кинетической энергии системы и проверить его методом динамического расчёта, составляя уравнения движения тел, входящих в систему.

*Решение*

**1**. Для неизменяемой системы (состоящей из абсолютно твёрдых тел, соединённых нерастяжимыми нитями), движущейся из состояния покоя, теорема об изменении кинетической энергии на конечном перемещении имеет вид $T = \sum A(\vec{F}_k^e)$. Схема движения механизма в предположении, что груз 3 опускается, показана на рис. 5.24.

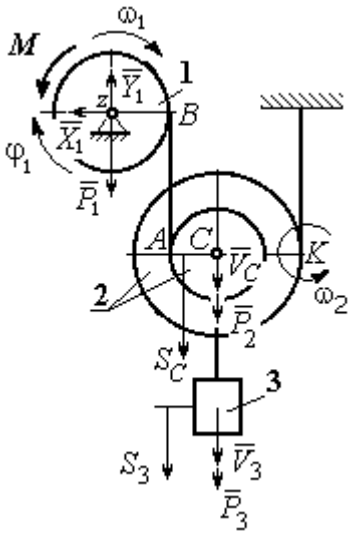


Рис. 5.24. Схема движения механизма

Диск 1 вращается вокруг неподвижной оси *z*. Кинетическая энергия диска 1: $T_1 = \frac{J_{1z}\omega_1^2}{2}$, где момент инерции диска $J_{1z} = \frac{m_1 r_1^2}{2}$.

У диска 2 плоскопараллельное движение. Кинетическая энергия диска 2: $T_2 = \frac{m_2 V_C^2}{2} + \frac{J_{2C}\omega_2^2}{2}$, где $V_C$ – скорость центра масс диска 2. Момент инерции диска 2 относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно движению диска, $J_{2C} = m_2 i_{2C}^2$.

Кинетическая энергия груза 3: $T_3 = \frac{m_3 V_3^2}{2}$.

Энергия механизма равна сумме энергий тел, входящих в систему:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 = \frac{J_{1z}\omega_1^2}{2} + \frac{m_2 V_C^2}{2} + \frac{J_{2C}\omega_2^2}{2} + \frac{m_3 V_3^2}{2}.$$

Выразим угловые скорости дисков 1 и 2 и скорость центра масс диска 2 через скорость груза 3.

Скорость центра масс диска 2 равна скорости груза 3, $V_C = V_3$. Угловая скорость диска 2 $\omega_2 = \frac{V_C}{CK} = \frac{V_3}{R_2}$, где *CK* – расстояние от центра диска 2 до его мгновенного центра скоростей.

Скорость точки $B$ нити равна скорости точки $A$. Из равенства $\omega_1 r_1 = \omega_2 (R_2 + r_2)$ найдём: $\omega_1 = \dfrac{(r_2 + R_2)}{r_1}\omega_2 = \dfrac{(r_2 + R_2)}{r_1}\dfrac{V_3}{R_2}$.

Подставляя найденные зависимости в выражение энергии системы, получим кинетическую энергию механизма:

$$T = \frac{V_3^2}{2}\left[\frac{m_1}{2}\left(1+\frac{r_2}{R_2}\right)^2 + m_2\left(1+\frac{i_{2C}^2}{R_2^2}\right) + m_3\right] = \frac{209}{64}m_1 V_3^2.$$

Во время движения механизма работу совершают силы тяжести $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$ и пара сил с моментом $M$. Перемещения $S_C$ и $S_3$ точек приложения сил $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$ и угол $\varphi_1$ поворота диска 1 показаны на рис. 5.24.

Сумма работ сил $\sum A(\vec{F}_k^e) = P_3 S_3 + P_2 S_C - M\varphi_1$. Работа момента отрицательная, так как заданное направление момента противоположно выбранному направлению вращения колеса 1.

Выразим перемещение центра масс диска 2 и угол поворота диска 1 через перемещение груза 3. Проинтегрировав равенство скоростей $V_3 = V_C$, получим равенство перемещений: $S_3 = S_C$. Аналогично, из равенства $\omega_1 = \dfrac{(r_2 + R_2)}{r_1}\dfrac{V_3}{R_2}$ следует соотношение $\varphi_1 = \dfrac{(r_2 + R_2)}{r_1}\dfrac{S_3}{R_2}$.

В итоге суммарная работа внешних сил в механизме:

$$\sum A(\vec{F}_k^e) = \left[P_3 + P_2 - M\frac{(r_2 + R_2)}{r_1 R_2}\right]S_3 = \frac{15}{4}m_1 g S_3.$$

Составляя уравнение теоремы об изменении кинетической энергии системы, получим равенство:

$$\frac{209}{64}m_1 V_3^2 = \frac{15}{4}m_1 g S_3 \text{ или } V_3^2 = \frac{240}{209}g S_3.$$

Продифференцируем последнее равенство. Получим: $2V_3\dfrac{dV_3}{dt}=\dfrac{240}{209}g\dfrac{dS_3}{dt}$. Так как $\dfrac{dS_3}{dt}=V_3$, а $\dfrac{dV_3}{dt}=a_3$, находим ускорение груза 3: $a_3=\dfrac{120}{209}g$ м/с$^2$.

Для того чтобы найти натяжение нити груза 3, необходимо написать уравнение его движения. Выделим груз 3 из системы, заменив действие нити её реакцией $H_3$. Выберем ось $x$ по направлению движения груза. Применим к описанию движения груза теорему о движении центра масс, написав её проекцию на ось $x$: $m_3a_3=P_3-H_3$, где $H_3$ –реакция нити. При известном ускорении $a_3$ находим реакцию нити $H_3=\dfrac{178}{209}m_1g$. Натяжение нити численно равно реакции, но направлено в противоположную сторону.

**2**. Для решения задачи вторым способом – путём составления уравнений движения тел, входящих в состав механизма, освободим тела от связей и заменим их реакциями. На рис. 5.25 изображены силы и реакции, действующие на каждое тело, после освобождения его от связей, а также направления угловых ускорений тел и ускорения центров масс.

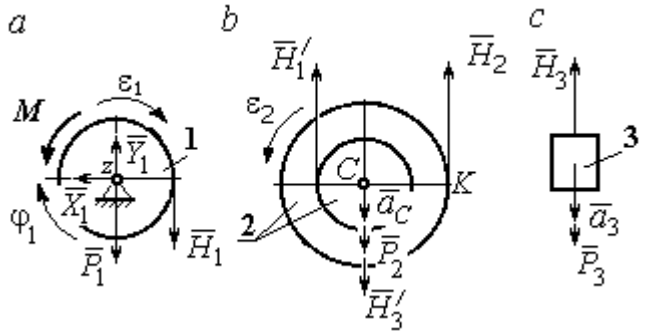


Рис. 5.25. Внешние силы и реакции связей, действующие на тела системы

Диск 1 вращается вокруг неподвижной оси $z$. На диск действует сила тяжести $\vec{P}_1$, реакция подшипника $\vec{X}_1$, $\vec{Y}_1$, пара сил с моментом $M$ и реакция нити $\vec{H}_1$. Вращение диска описывается уравнением: $J_{1z}\varepsilon_1=\sum M_z(F_k)=H_1r_1-M$. Момент инерции диска 1 относительно оси $z$, $J_{1z}=\dfrac{m_1r_1^2}{2}$.

Диск 2 (рис. 5.25, *b*) совершает плоскопараллельное движение. К нему приложена сила тяжести $\vec{P}_2$ и реакции нитей $\vec{H}_1'$, $\vec{H}_2$ и $\vec{H}_3'$. Плоскопараллельное движение диска 2 описывается уравнением движения его центра масс в проекции

на вертикальную ось и уравнением вращения диска вокруг оси, походящей через центр масс перпендикулярно плоскости диска:

$$m_2 a_C = P_2 - H_1' - H_2 + H_3'; \;\; J_{2C}\varepsilon_2 = H_2 R_2 - H_1' r_2 .$$

Момент инерции диска 2 $J_{2C} = m_2 i_{2C}^2$. При составлении уравнения вращательного движения диска 2 момент силы считается положительным, если он создаёт поворот в сторону вращения диска.

Груз 3 совершает поступательное движение. К нему приложены сила тяжести $\vec{P}_3$ и реакция нити $\vec{H}_3$ (рис. 5.25, *c*). Уравнение движения груза 3 в проекции на вертикальную ось, направленную в сторону его движения, имеет вид:

$$m_3 a_3 = P_3 - H_3 ,$$

Выразим угловые ускорения дисков 1 и 2 и ускорение центра масс диска 2 через ускорение груза 3. Для этого нужно продифференцировать соответствующие кинематические соотношения между скоростями. Так, из найденных ранее выражений: $V_3 = V_C$, $\omega_2 = \dfrac{V_3}{R_2}$, $\omega_1 = \dfrac{(r_2 + R_2)}{r_1}\dfrac{V_3}{R_2}$ следует:

$a_3 = a_C$, $\varepsilon_2 = \dfrac{a_3}{R_2}$, $\varepsilon_1 = \dfrac{(r_2 + R_2)}{r_1}\dfrac{a_3}{R_2}$.

Подставляя кинематические соотношения между ускорениями в уравнения движения тел с учётом равенства модулей сил $\vec{H}_1$ и $\vec{H}_1'$, а также $\vec{H}_3$ и $\vec{H}_3'$, получим систему уравнений, описывающих движение звеньев механизма:

$$\frac{5}{8} m_1 a_3 = H_1 - m_1 g ; \;\; 3m_1 a_3 = 3m_1 g - H_1 - H_2 + H_3 ;$$

$$3m_1 a_3 = 4H_2 - H_1 ; \;\; 2m_1 a_3 = 2m_1 g - H_3 .$$

Решая систему, найдём $a_3 = \dfrac{120}{209} g$ м/с$^2$, $H_3 = \dfrac{178}{209} m_1 g$. Выражения ускорения $a_3$ груза 3 и натяжения нити $H_3$ совпадают с аналогичными

выражениями, полученными в пункте 1 при решении данной задачи с применением теоремы об изменении кинетической энергии.

## Упражнения

Упражнение 5.5. Система состоит из двух катков 1 и 2, соединённых невесомым стержнем (рис. 5.26). Каток 1 весом $P$, радиуса $r$. Каток 2 весом $2P$, радиуса $3r$ имеет цилиндрический выступ радиуса $r$. Невесомый стержень, параллельный плоскости качения катков, закреплён в центре катка 1 и передаёт движение катка 1 катку 2 в верхней точке вертикального диаметра цилиндрического выступа без проскальзывания. Качение катков без скольжения. К катку 1 приложена пара сил с моментом $M = 4Pr$. В центре масс катка 2 приложена сила $F = 2P$. Радиус инерции катка 2 относительно оси, проходящей через центр катка перпендикулярно плоскости движения, $i_2 = r\sqrt{2}$. Найти ускорение центра масс катка 1 и реакцию стержня.

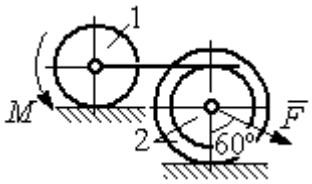


Рис. 5.26. Система катков

Упражнение 5.6. С помощью подъёмного устройства (рис. 5.27) производится подъём груза 1. Нить, закреплённая одним концом на неподвижной поверхности, спускается, охватывает снизу блок 2 массы $m_2 = m$, радиуса $r$, затем поднимается и проходит параллельно горизонтальной плоскости, где к концу её привязан груз 3 массы $m_3 = m$, передвигающийся по плоскости под действием силы $F = 2{,}5mg$. Нити, удерживающие блок 2, вертикальны. Груз 1 массы $m_1 = 3m$ прикреплён к оси блока 2. Найти ускорение груза 1 и натяжения нитей, удерживающих блок 2.

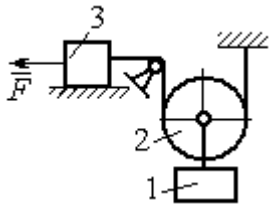


Рис. 5.27. Подъёмное устройство

Упражнение 5.7. Груз 1 массы $m_1 = m$, спускается вниз по наклонной плоскости без трения (рис. 5.28). Нить, прикреплённая к грузу 1, другим своим концом намотана на барабан катка 2 радиуса $R = 2r$ и при движении груза заставляет барабан катиться по горизонтальной поверхности цилиндрическим выступом радиуса $r$. Качение происходит без проскальзывания. К центру катка привязана другая нить, посредством которой каток тащит за собой груз 3 массы $m_3 = 2m$, скользящий по горизонтальной поверхности без трения. Масса катка $m_2 = 3m$, радиус инерции катка относительно оси, проходящей через его центр масс перпендикулярно плоскости движения $i_2 = r\sqrt{3}$. По касательной к ободу катка 2 приложена сила $F = mg$ (точка приложения силы см. рис. 5.28). Определить ускорение груза 1 и натяжения нитей.

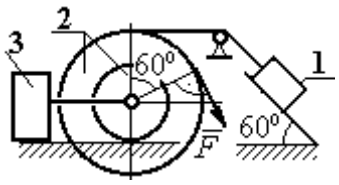


Рис. 5.28. Схема движения механической системы

# 6. ПРИНЦИПЫ МЕХАНИКИ

## 6.1. Принцип Даламбера для системы

**Силой инерции** материальной точки называют векторную величину, модуль которой равен произведению массы точки на модуль её ускорения. Направлен вектор силы инерции точки в сторону, противоположную ускорению $\vec{R}^{\text{и}} = -m\vec{a}$, где $m$ – масса точки; $\vec{a}$ – вектор ускорения точки.

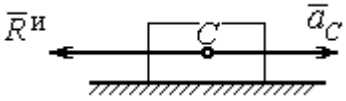


Рис. 6.1. Главный вектор сил инерции при поступательном движении твердого тела

При поступательном движении тела с ускорением центра масс $\vec{a}_C$ главный вектор сил инерции $\vec{R}^{\text{и}}$ по модулю $R^{\text{и}} = ma_C$, приложен в центре масс тела и направлен в сторону, противоположную ускорению $\vec{a}_C$ (рис. 6.1).

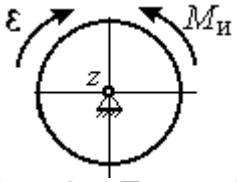


Рис. 6.2. Главный момент сил инерции при вращении тела вокруг оси, проходящей через центр масс

При вращении тела вокруг неподвижной оси $z$, проходящей через центр масс, главный вектор сил инерции обращается в нуль. Главный момент $\vec{M}^{\text{и}}$, сил инерции относительно оси вращения равен по величине $M^{\text{и}} = J_z\varepsilon$, где $J_z$ – момент инерции тела относительно оси $z$; $\varepsilon$ – угловое ускорение тела. Направлен главный момент сил инерции в сторону, противоположную угловому ускорению (рис. 6.2).

При плоскопараллельном движении тела с ускорением центра масс $\vec{a}_C$ и угловым ускорением $\varepsilon$ главный вектор сил инерции $\vec{R}^{\text{и}}$ равен по модулю $R^{\text{и}} = ma_C$, приложен в центре масс тела и направлен в сторону, противоположную ускорению центра масс $\vec{a}_C$ (рис. 6.3).

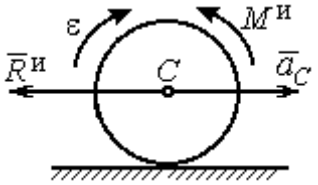


Рис. 6.3. Главный вектор и главный момент сил инерции при плоскопараллельном движении твердого тела

Главный момент сил инерции $\vec{M}^{\text{и}}$ относительно оси, проходящей через центр масс тела перпендикулярно плоскости движения: $M^{\text{и}} = J_C\varepsilon$, где $J_C$ – момент инерции тела относительно оси вращения, и направлен в сторону, противоположную угловому ускорению.

Если в любой момент времени к каждой из точек системы кроме действующих на нее внешних сил присоединить соответствующие силы инерции, то полученная система сил будет уравновешенной.

**Принцип Даламбера** даёт возможность составлять уравнения движения механической системы в виде уравнений равновесия (метод кинетостатики):

$$\sum \vec{F}_k^e + \vec{R}^{\text{и}} = 0,\ \sum \vec{M}_O(\vec{F}_k^e) + \vec{M}_O^{\text{и}} = 0,$$

где $\vec{F}_k^e$ –внешние силы, действующие на систему; $\vec{R}^{\text{и}}$ – главный вектор сил инерции; $\vec{M}_O(\vec{F}_k^e)$, $\vec{M}_O^{\text{и}}$ – моменты внешних сил и главный момент сил инерции относительно произвольного центра *O*.

## Примеры решения задач на применение принципа Даламбера

**Задача 63**. Груз 1 массы $m_1$ = 10 кг спускается вниз по наклонной грани клина, образующей угол 60º с горизонтом, и посредством нити, переброшенной через блок 2, укреплённый в верхней точке клина, приводит в движение груз 3 массы $m_3$ = 5 кг (рис. 6.4). Клин *ABC* массы $m_4$ = 15 кг стоит гранью *AC* на горизонтальной гладкой поверхности и упирается в выступ *E*.

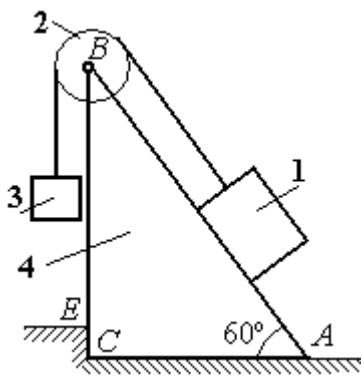


Рис. 6.4. Клин с грузами

Найти давление клина на выступ. Массой блока 2 и нити пренебречь.

*Решение*

Выберем систему, состоящую из клина *ABC*, блока 2, грузов 1 и 3 и нити, соединяющей грузы. Внешние силы, действующие на систему, – силы тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_3$ и $\vec{P}_4$ грузов 1, 3 и клина 4, горизонтальная реакция $\vec{R}_x$ упора клина в

выступ и вертикальная реакция $\vec{R}_y$ опоры на горизонтальную поверхность. Реакция нити, реакция опоры груза 1 на наклонную поверхность клина и реакция шарнира *B* блока 2 для данной системы являются внутренними.

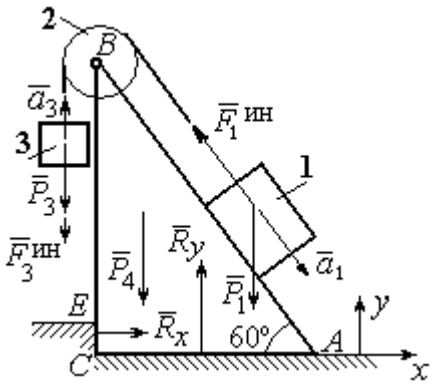


Рис. 6.5. Внешние силы и силы инерции, действующие на систему

Допустим, груз 1 движется вниз, груз 3 – вверх. Приложим силы инерции. Направления ускорений грузов и сил инерции показаны на рис. 6.5.

В соответствии с принципом Даламбера, полученная система сил находится в равновесии. Условие равновесия: $\sum \vec{F}_k^e + \vec{F}_1^{ин} + \vec{F}_3^{ин} = 0$.

Выберем оси *xy*, как показано на рис. 6.5, и спроектируем векторное равенство на ось *x*. Получим: $R_x - F_1^{ин}\cos 60^\circ = 0$, где модуль силы инерции $F_1^{ин} = m_1 a_1$.

Найдём ускорение груза 1. С этой целью рассмотрим отдельно движение грузов 1 и 3 (рис. 6.6 *a*, *b*).

Рассматривая груз 1 как отдельную систему, изобразим внешние силы: силу тяжести $\vec{P}_1$, реакцию нити $\vec{T}'$ и реакцию опоры $\vec{N}$ (см. рис. 6.6, *b*). Присоединим силу инерции $\vec{F}_1^{ин}$ и составим уравнение равновесия полученной системы сил в проекции на ось *x*, расположенную вдоль наклонной грани клина: $P_1 \sin 60^\circ - T' - F_1^{ин} = 0$, где $F_1^{ин} = m_1 a_1$.

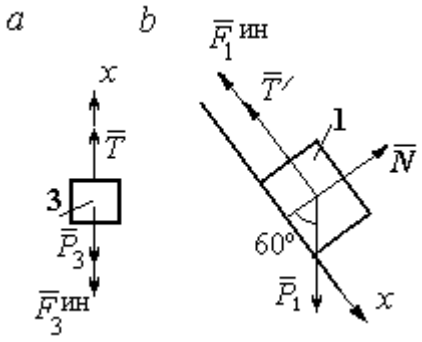


Рис. 6.6. Равновесие грузов

Для груза 3 внешними силами будут сила тяжести $\vec{P}_3$ и реакция нити $\vec{T}$. Присоединим к грузу 3 силу инерции $\vec{F}_3^{ин}$ (см. рис. 6.6, *a*) и составим уравнение

равновесия системы сил в проекции на ось $x$, выбранную по направлению движения груза 3: $T - P_3 - F_3^{\text{ин}} = 0$, где модуль силы инерции $F_3^{\text{ин}} = m_3 a_3$.

Решая полученную систему с учётом, что модули реакций нити и модули ускорений грузов равны: $T = T'$ и $a_1 = a_3$, находим ускорение грузов. Получим: $a_1 = a_3 = \dfrac{(m_1 \sin 60^\circ - m_3)g}{m_1 + m_3}$. Тогда давление клина на уступ:

$$R_x = F_1^{\text{ин}} \cos 60^\circ = m_1 g \frac{(m_1 \sin 60^\circ - m_3)}{(m_1 + m_3)} \cos 60^\circ .$$

Подставляя данные из условия задачи, найдём $R_x$ = 11,97 Н.

**Задача 64.** Для подъёма грузов используется лебёдка со ступенчатым воротом, изображённая на рис. 6.7. Радиусы большой и малой ступенек барабана ворота $r_1$ и $r_2$, радиус инерции барабана относительно оси вращения $i_3$. Лебёдка установлена на горизонтальной балке $AB$, которая закреплена в точке $A$ на неподвижном цилиндрическом шарнире и опирается на каток в точке $B$. Груз 1 поднимается на верёвке, навитой на большую ступеньку ворота. На малой ступеньке барабана ворота закреплена другая верёвка, удерживающая противовес 2. К барабану лебёдки приложен постоянный вращающий момент $M_{\text{вр}}$.

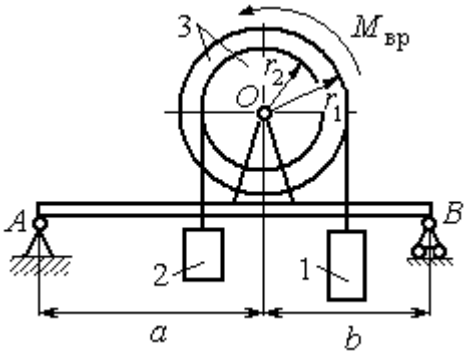


Рис. 6.7. Лебёдка на балке

Найти реакции опор балки во время движения груза, если радиусы ступенек барабана $r_1$ = 0,8 м, $r_2$ = 0,2 м, радиус инерции барабана относительно оси вращения $i_3$=0,6 м, масса груза 1 $m_1$ = 100 кг, противовеса 2 $m_2$ =30 кг, масса барабана $m_1$ = 50 кг, величина вращающего момента $M_{\text{вр}}$ = 1050 Н·м, расстояния от крайних точек балки $A$ и $B$ до линии вертикального диаметра барабана $a$ = 2 м, $b$ = 1 м.

*Решение*

Выберем систему, включающую только барабан 3, грузы 1 и 2 и нити, связывающие грузы с барабаном (рис. 6.8). Внешние силы, действующие на эту систему, – пара сил, создающая вращающий момент $M_{\text{вр}}$, силы тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$ грузов 1, 2 и барабана 3 и реакция $\vec{R}_O$ опоры барабана на шарнир в точке $O$. Натяжения нитей для данной системы являются внутренними и на рис. 6.8 не показаны.

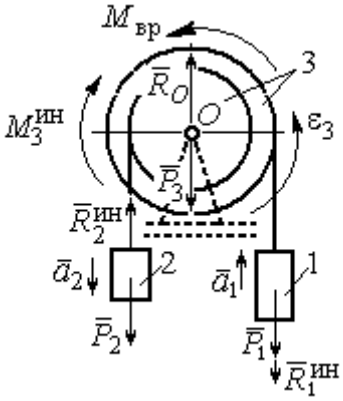



Рис. 6.8. Расчётная схема равновесия барабана

Приложим силы инерции. Направления главных векторов сил инерции $\vec{R}_1^{\text{ин}}$, $\vec{R}_2^{\text{ин}}$ и момента сил инерции $M_3^{\text{ин}}$ показаны на рис. 6.8.

Согласно принципу Даламбера, полученная система внешних сил и сил инерции является уравновешенной. Составим уравнения равновесия:

$$R_O + R_2^{\text{ин}} - P_2 - P_3 - P_1 - R_1^{\text{ин}} = 0; \;\; M_{\text{вр}} - M_3^{\text{ин}} - R_2^{\text{ин}} r_2 + P_2 r_2 - P_1 r_1 - R_1^{\text{ин}} r_1 = 0,$$

где $R_1^{\text{ин}} = m_1 a_1$, $R_2^{\text{ин}} = m_2 a_2$, $M_3^{\text{ин}} = J_{3O}\varepsilon_3$, $J_{3O} = m_3 i_3^2$.

Из второго уравнения с учётом кинематических соотношений: $\varepsilon_3 = \dfrac{a_1}{r_1}$ и $a_2 = \dfrac{r_2}{r_1} a_1$, найдём ускорение груза 1: $a_1 = \dfrac{r_1(M_{\text{вр}} + P_2 r_2 - P_1 r_1)}{m_3 i_3^2 + m_2 r_2^2 + m_1 r_1^2}$. Подставляя данные задачи, получим $a_1$ = 3,49 м/с$^2$.

Вычислим модули сил инерции $R_1^{\text{ин}} = m_1 a_1$=349 Н; $R_2^{\text{ин}} = m_2 a_2$ = 26,17 Н.

Подставляя модули сил инерции в первое уравнение условий равновесия, найдём реакцию опоры барабана на шарнир $O$:

$$R_O = -R_2^{\text{ин}} + P_2 + P_3 + P_1 + R_1^{\text{ин}} = 2088{,}63 \text{ Н}.$$

Для определения реакций опор балки $AB$ выберем объектом равновесия саму балку (рис. 6.9). На балку действуют сила $\vec{R}'_O$ давления со стороны шарнира $O$, реакция шарнира в точке $A$ (на рис. 6.9 разложенная на составляющие $\vec{R}_{Ax}$, $\vec{R}_{Ay}$) и реакция $\vec{R}_{By}$ опоры балки на шарнир в точке $B$. Составим уравнения равновесия балки:

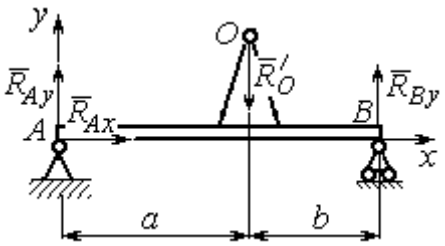


Рис. 6.9. Равновесие балки

$$\sum F_x = R_{Ax} = 0,\ \sum F_y = R_{Ay} - R'_O + R_{By} = 0,$$

$$\sum M_A(F) = R_{By}(a+b) - R'_O a = 0.$$

Решая систему с учётом того, что модули сил $\vec{R}'_O$ и $\vec{R}_O$ равны, найдём реакции опор балки: $R_{By} = R_O \dfrac{a}{a+b}$ = 1392,42 Н; $R_{Ay} = R_O - R_{By}$ = 696,21 Н.

Для сравнения реакции опор балки при неподвижном барабане $R_{By}$ = 1419,18 Н, $R_{Ay}$ = 346,62 Н.

### Упражнение

Упражнение 6.1. Груз 1 соединён с грузом 2 нерастяжимой нитью, переброшенной через неподвижный блок (рис. 6.10). Опускаясь вниз, груз 2 перемещает груз 1 по горизонтальной поверхности призмы 3 без трения. Призма стоит на горизонтальной гладкой поверхности и упирается левым краем в выступ. Определить силу давления призмы на пол, если массы грузов 1, 2 и призмы 3 одинаковы и равны $m$. Массой нити и блока пренебречь.

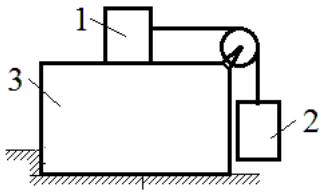


Рис. 6.10. Схема движения грузов в системе

## 6.2. Принцип возможных перемещений

**Возможными перемещениями** механической системы называют любую совокупность элементарных (бесконечно малых) перемещений точек системы из занимаемого в данный момент времени положения, которые допускаются всеми наложенными на систему связями.

**Идеальными связями** в механической системе называют такие связи, для

которых сумма элементарных работ их реакций на любом возможном перемещении равна нулю.

**Принцип возможных перемещений**.

Если все приложенные к точкам системы внешние и внутренние силы разделить на **активные силы** и **реакции связей**, то для равновесия механической системы с идеальными связями необходимо и достаточно, чтобы сумма элементарных работ всех активных сил была равна нулю на любом возможном перемещении системы: $\sum \delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) = 0$.

## Примеры решения задач на применение принципа возможных перемещений

**Задача 65**. В талевом механизме барабан 1 состоит из двух соосных жестко связанных валов (рис. 6.11). При поднятии груза верхний трос барабана 1 наматывается на вал большего радиуса $R_1$, нижний – сматывается с вала меньшего радиуса $r_1$.

Какой вращающий момент $M$, постоянный по величине, нужно приложить к барабану, чтобы уравновесить груз весом $P$, прикреплённый в центре блока 4. Массами блоков и троса пренебречь.

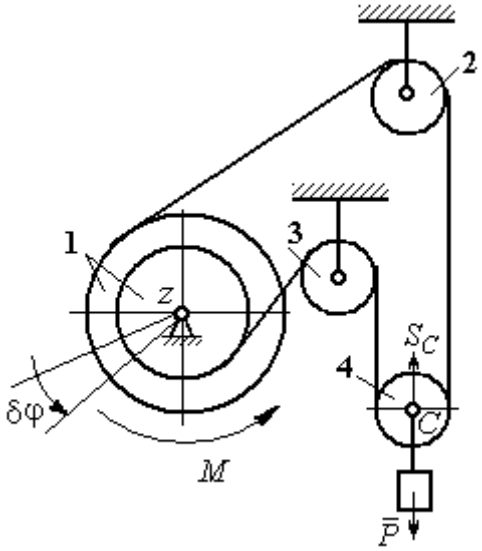



Рис. 6.11. Уравновешивание талевого механизма

*Решение*

Активными силами в системе являются сила тяжести груза $\vec{P}$ и уравновешивающий момент $M$. По принципу возможных перемещений для равновесия системы необходимо и достаточно выполнения условия:

$$\delta A(M) + \delta A(\vec{P}) = 0, \text{ или } M\delta\varphi_1 - P\delta S_C = 0.$$

где $\delta\varphi_1$ и $\delta S_C$ – возможные перемещения барабана и груза.

Найдём связь между перемещениями $\delta\varphi_1$ и $\delta S_C$. Предположим, в механизме осуществляется подъём груза. На рис. 6.12 показано построение мгновенного центра скоростей блока 4 – точки *K*. Здесь скорость точки *A* блока 4 (рис. 6.12) равна скорости точек обода малого вала барабана 1, а скорость точки *B* – скорости точек обода большого вала. Составим пропорцию $\frac{V_B}{V_A}=\frac{BK}{AK}=\frac{r_4+CK}{r_4-CK}$, где $r_4$ – радиус блока 4 (см. рис.6.12). Подставляя выражения для скоростей точек *A* и *B* $V_A=\omega_1 r_1$, $V_B=\omega_1 R_1$, найдём расстояние: $CK=\frac{(R_1-r_1)r_4}{R_1+r_1}$.

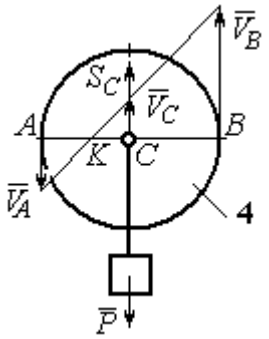


Рис. 6.12. Распределение скоростей точек блока 4

Угловая скорость блока 4 $\omega_4=\frac{V_B}{r_4+CK}=\frac{\omega_1(R_1+r_1)}{2r_4}$. Скорость его центра: $V_C=\omega_4\cdot CK=\frac{\omega_1(R_1-r_1)}{2}$. Выразим соотношение между скоростью точки *C* и угловой скоростью барабана 1 в дифференциальной форме: $dS_C=d\varphi_1\frac{(R_1-r_1)}{2}$. Поскольку действительное перемещение является одним из возможных (т. е. $ds=\delta s$, $d\varphi=\delta\varphi$), получим связь между возможными перемещениями барабана 1 и груза: $\delta S_C=\frac{\delta\varphi_1(R_1-r_1)}{2}$.

Подставляя найденное соотношение в уравнение принципа возможных перемещений, представим его в окончательном виде: $M\delta\varphi_1-P\frac{\delta\varphi_1(R_1-r_1)}{2}=0$, откуда найдём значение уравновешивающего момента: $M=\frac{P(R_1-r_1)}{2}$.

**Задача 66.** Брус 1 весом $P_1 = P$ лежит на цилиндрическом катке 2 и на блоке 3 одинаковых радиусов $r$, и одинакового веса $P_2 = P_3 = 2P$ (рис. 6.13). Каток 2 катится без проскальзывания по наклонной плоскости с углом наклона 30º к горизонту. Блок 3 вращается вокруг неподвижной оси $z$ и к нему приложена пара сил с моментом $M = =Pr$. Каток и блок расположены так, что брус 1 параллелен наклонной плоскости.

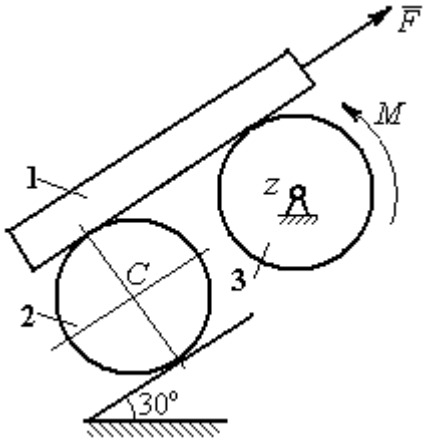


Рис. 6.13. Равновесие механической системы

Какую силу $F$, параллельную наклонной плоскости, нужно приложить к брусу 1, чтобы удержать его в равновесии. Скольжение между брусом и катком, брусом и блоком отсутствует.

*Решение*

Рассмотрим механизм, состоящий из бруса 1, катка 2 и блока 3. Активными силами, действующими на механизм, являются силы тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$ и $\vec{P}_3$ бруса, катка и блока, пара сил с моментом $M$, приложенная к блоку 3, и сила $\vec{F}$, приложенная к брусу. Связи в механизме идеальные, так как работа реакции $\vec{N}_2$ опоры катка 2 на плоскость, работа силы $\vec{F}_{\text{сц}}$ сцепления катка с плоскостью и работа реакции шарнира блока 3 при любом перемещении системы равны нулю. Направления векторов сил в системе показаны на рис. 6.14.

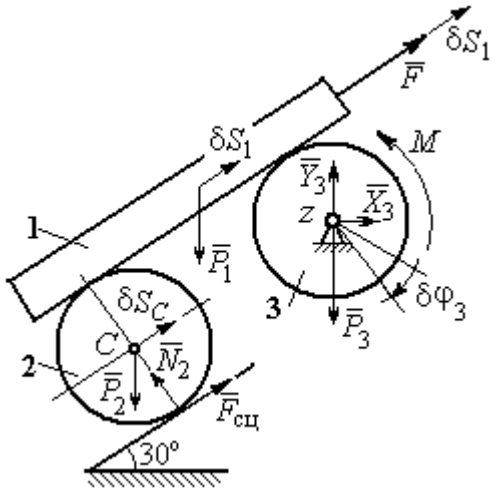


Рис. 6.14. Расчётная схема применения принципа возможных перемещений

Придадим системе возможное перемещение, сдвинув брус 1 на расстояние $\delta S_1$ вдоль линии действия силы $\vec{F}$, вверх по наклонной плоскости. Тогда центр

катка 2 переместится на расстояние $\delta S_C$, а блок 3 повернётся на элементарный угол $\delta\varphi_3$ (см. рис. 6.14).

Для определения условий равновесия применим к системе принцип возможных перемещений. Получим уравнение:

$$-P_1\delta S_1\cos 60^\circ - P_2\delta S_C\cos 60^\circ - M\delta\varphi_3 + F\delta S_1 = 0.$$

Выразим все перемещения через перемещение бруса $\delta S_1$. Допустим, скорость бруса равна $V_1$. Тогда $V_C = \frac{V_1}{2}$, и, следовательно, $\delta S_C = \frac{\delta S_1}{2}$.

Угловая скорость блока 3 $\omega_3 = \frac{V_1}{r}$, отсюда $\delta\varphi_3 = \frac{\delta S_1}{r}$.

Подставляя найденные соотношения в уравнение принципа возможных перемещений с учётом данных задачи, находим $F = 2P$.

**Задача 67.** Уравновешивание роликового катка 3 с противовесом 1 осуществляется с помощью пары сил с моментом *M*, приложенных к блоку 2. Каток состоит из двух соосных жестко связанных дисков (рис. 6.15) радиусов *r* и *R* = 2*r* с общей массой 3*m*. Масса груза 1 равна *m*. При движении каток катится без скольжения по вертикальной поверхности, касаясь её диском меньшего радиуса. Вертикальная пружина с закреплённым верхним концом своим нижним концом удерживает каток за центр масс. Жесткость пружины $c = mg/r$.

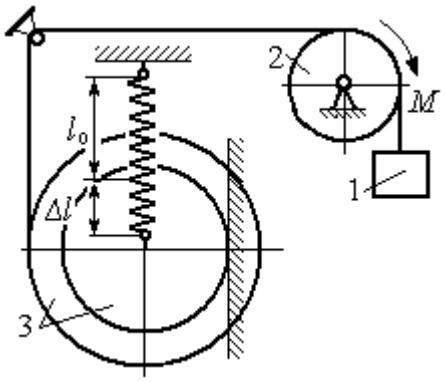


Рис. 6.15. Уравновешивание роликового катка

Какой величины уравновешивающий момент *M* приложен к блоку 2, если при равновесии катка пружина растянулась относительно недеформированного состояния на величину $\Delta l = r$.

*Решение*

Рассмотрим механическую систему, состоящую из груза 1, блока 2 и катка 3. Активными силами, действующими на механизм, являются силы тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$ и $\vec{P}_3$ – груза, блока и катка, пара сил с моментом $M$, приложенная к блоку 2, и сила $\vec{F}_{\text{упр}}$ упругости пружины, приложенная к центру катка. Реакциями связей в механизме являются: сила $\vec{F}_{\text{сц}}$ сцепления катка с плоскостью и реакция $\vec{R}_2$ шарнира блока 2.

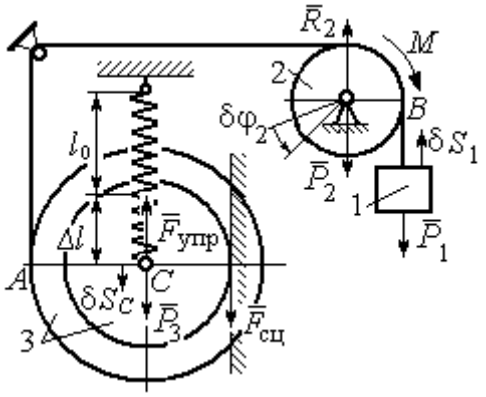


Рис. 6.16. Расчётная схема уравновешивания ролика

Реакция $\vec{N}_2$ опоры катка 2 на вертикальную плоскость равна нулю (на рис. 6.16 не показана).

Допустим, система находится в равновесии. Дадим центру катка возможное перемещение $\delta S_C$, направленное вертикально вниз. При этом блок 2 повернётся на угол $\delta\varphi_2$, а груз 1 получит бесконечно малое перемещение $\delta S_1$. Направления возможных перемещений показаны на рис. 6.16.

Составим уравнение принципа возможных перемещений:

$$P_3\delta S_C - F_{\text{упр}}\delta S_C + M\delta\varphi_2 - P_1\delta S_1 = 0,$$

где сила упругости в положении равновесия системы $F_{\text{упр}} = c\Delta l$.

Выразим перемещения $\delta\varphi_2$, $\delta S_1$ блока 2 и груза 1 через перемещение центра катка $\delta S_C$. Предположим, при возможном перемещении скорость центра масс катка равна $V_C$. Скорость груза 1 равна скорости точки $A$ на ободе большого диска катка: $V_1 = V_A = \dfrac{R+r}{r}V_C$. Здесь учтено, что точка касания катка с вертикальной поверхностью является его мгновенным центром скоростей. Угловая скорость блока 2 $\omega_2 = \dfrac{V_A}{r} = \dfrac{R+r}{r^2}V_C$.

Представляя кинематические соотношения в дифференциальном виде, получим необходимые связи между возможными перемещениями:

$$\delta S_1 = \frac{R+r}{r}\delta S_C = 3\delta S_C;\ \ \delta\varphi_2 = \frac{R+r}{r^2}\delta S_C = \frac{3\delta S_C}{r}.$$

Окончательно уравнение принципа возможных перемещений выражается в виде: $P_3\delta S_C - c\Delta l\delta S_C + M\frac{3\delta S_C}{r} - P_1 3\delta S_C = 0$. Величина уравновешивающего момента $M = \frac{1}{3}mgr$.

## Упражнения

Упражнение 6.2. Штамповка деталей осуществляется при помощи рычажного пресса (рис. 6.17). Найти соотношение между силой *F*, приложенной к внешнему рычагу, и силой *Q*, сжимающей деталь *A* вдоль центральной оси.

Длины рычагов *a*, *b*, *c*, *d* показаны на рис. 6.17.

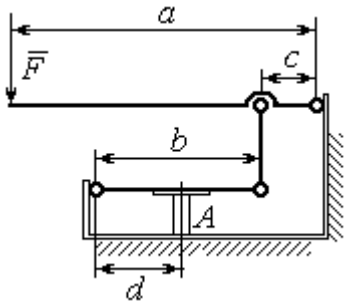


Рис. 6.17. Рычажный пресс

Упражнение 6.3. Конструкция состоит из двух валов, находящихся во внешнем зацеплении, и двух грузов, удерживающихся нитями, намотанными валы (рис. 6.18).

Радиус вала 1 $R_1 = r$. Вал 2 состоит из двух барабанов, жестко скреплённых на одной оси. Радиусы барабанов: $R_2 = 3r$, $r_2 = r$.

Найти величину уравновешивающего момента $M_2$, приложенного к валу 2, если к валу 1 приложена пара сил с моментом $M_1 = 2Pr$, а грузы 3 и 4 одинакового веса *P*.

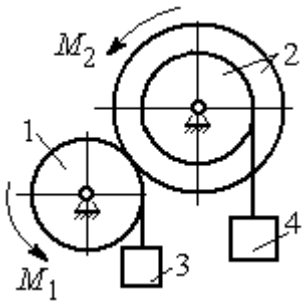


Рис. 6.18. Схема уравновешивания валов

## 6.3. Общее уравнение динамики

При движении механической системы с идеальными связями в каждый момент времени сумма элементарных работ активных сил и сил инерции на любом возможном перемещении равна нулю:

$$\sum \delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) + \sum \delta A(\vec{R}_k^{\text{и}}) = 0,$$

где $\delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}})$, $\delta A(\vec{R}_k^{\text{и}})$ – элементарные работы активных сил и сил инерции, приложенных к точкам системы на её возможном перемещении.

При вычислении элементарных работ активных сил и сил инерции используют обычные формулы для вычисления работы сил на элементарном перемещении точек их приложения.

### Примеры решения задач на применение общего уравнения динамики

**Задача 68.** Механическая система включает груз 1, ступенчатый диск 2 (каток), катящийся ступенькой по неподвижному рельсу, и однородный диск 3 (блок), вращающийся вокруг неподвижной оси, соединённых нерастяжимыми нитями (рис. 6.19). Качение ступенчатого диска происходит без скольжения. К грузу 1 приложена сила $\vec{F}$ под углом 30° к горизонтальному направлению движения груза. К блоку 3 приложена пара сил с моментом $M$. Найти закон движения центра масс катка 2 и реакцию шарнира блока 3 в момент времени $t$ = 1 с, если $P_1$= 10 Н; $P_2$ = 20 Н; $P_3$ = 15 Н; $F = 5(t+1)$ Н; $M = 3(1+2t)$ Н·м; $R_2$ = 0,8 м; $r_2$ = 0,2 м; $R_3$ = 0,4 м; момент инерции катка 2 относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения, $i_{2C}$ = 0,6 м.

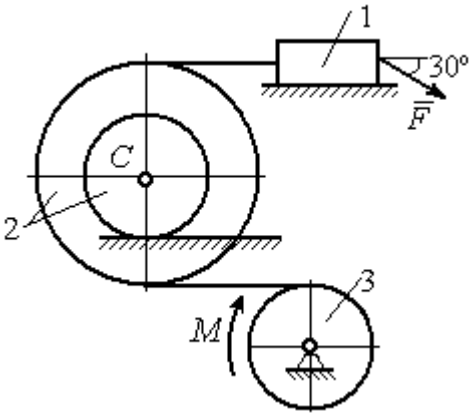


Рис. 6.19. Схема движения механической системы

*Решение*

В рассматриваемой механической системе активными силами являются силы тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$, сила $\vec{F}$ и пара сил с моментом $M$ (рис. 6.20).

Реакциями связей являются нормальные реакции опор: $\vec{N}_1$, $\vec{N}_2$, сила сцепления катка 2 с неподвижной поверхностью $\vec{F}_{\text{сц}}$ и реакция шарнира $O$ блока 3 (на рис. 6.20 реакция показана в виде разложения на составляющие $\vec{X}_3$, $\vec{Y}_3$). Связи идеальные, так как скольжение груза 1 происходит по гладкой поверхности, качение диска 2 без проскальзывания, а ось вращения блока 3 неподвижна.

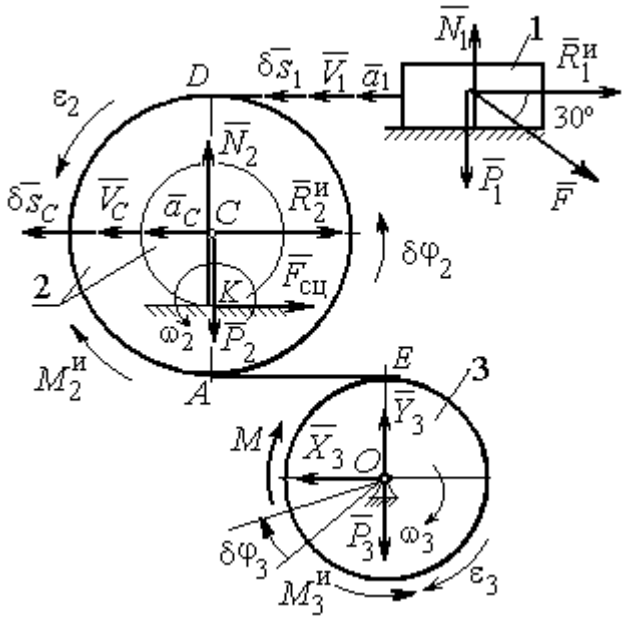



Рис. 6.20. Расчётная схема исследования движения механической системы

Предположим, система движется так, что блок 3 вращается с угловой скоростью $\omega_3$ и угловым ускорением $\varepsilon_3$ в направлении поворота, создаваемого моментом $M$. Соответствующие направления скорости $\vec{V}_C$ и ускорения $\vec{a}_C$ центра масс катка 2, его угловой скорости $\omega_2$ и ускорения $\varepsilon_2$, а также направление скорости $\vec{V}_1$ и ускорения $\vec{a}_1$ груза 1 показаны на рис. 6.20.

Присоединим к телам системы силы инерции. Главные векторы $\vec{R}_1^{\text{и}}$, $\vec{R}_2^{\text{и}}$ сил инерции груза 1 и катка 2 приложены в центрах масс груза и катка и направлены в сторону, противоположную ускорениям $\vec{a}_1$ и $\vec{a}_C$. Главные моменты $\vec{M}_2^{\text{и}}$, $\vec{M}_3^{\text{и}}$ сил инерции катка 2 и блока 3 направлены в сторону, противоположную угловым ускорениям $\varepsilon_2$ и $\varepsilon_3$.

Главные векторы и главные моменты сил инерции показаны на рис. 6.20.

Для механической системы с идеальными связями общее уравнение

динамики имеет вид:

$$\sum \delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) + \sum \delta A(\vec{R}_k^{\text{и}}) = 0.$$

Угловая скорость катка 2 $\omega_2 = \dfrac{V_C}{CK} = \dfrac{V_C}{r_2}$. Здесь учтено, что в точке $K$ находится мгновенный центр скоростей катка (см. рис. 6.20). Скорость точки $E$ блока 3 равна скорости точки $A$ катка 2 (см. рис. 6.20):

$$V_E = V_A = \omega_2 \cdot AK = \omega_2 (R_2 - r_2) = V_C \frac{R_2 - r_2}{r_2}.$$

Угловая скорость блока 3 $\omega_3 = \dfrac{V_E}{R_3} = V_C \dfrac{(R_2 - r_2)}{R_3 r_2}$.

Скорость груза 1 равна скорости точки $D$ катка 2:

$$V_1 = V_D = \omega_2 \cdot DK = \omega_2 (R_2 + r_2) = V_C \frac{(R_2 + r_2)}{r_2}.$$

Соотношения между ускорениями определяются путем дифференцирования установленных кинематических равенств:

$$a_1 = a_C \frac{(R_2 + r_2)}{r_2}, \quad \varepsilon_2 = \frac{a_C}{r_2}, \quad \varepsilon_3 = a_C \frac{(R_2 - r_2)}{R_3 r_2}.$$

Если выразить скоростные кинематические соотношения в дифференциальном виде, то, полагая действительное перемещение возможным (т. е. $ds = \delta s$, $d\varphi = \delta\varphi$), получим соотношения между перемещениями:

$$\delta s_1 = \delta s_C \frac{(R_2 + r_2)}{r_2}, \ \delta\varphi_2 = \frac{\delta s_C}{r_2}, \ \delta\varphi_3 = \delta s_C \frac{(R_2 - r_2)}{R_3 r_2}.$$

Найдем элементарные работы активных сил.

Работы сил тяжести груза 1 и катка 2 равны нулю, так как перемещения точек приложения сил перпендикулярны векторам сил.

Работа силы тяжести блока 3 также равна нулю, поскольку точка приложения силы тяжести блока 3 не перемещается:

$$\delta A(\vec{P}_1) = P_1 \delta s_1 \cos 90^\circ = 0; \ \ \delta A(\vec{P}_2) = P_2 \delta s_C \cos 90^\circ = 0; \ \delta A(\vec{P}_3) = 0.$$

Работу совершают только пара сил с моментом $M$ и сила $\vec{F}$:

$$\delta A(\vec{M}) = M\delta\varphi_3 = M\delta s_C \frac{(R_2 - r_2)}{R_3 r_2};$$

$$\delta A(\vec{F}) = F\delta s_1 \cos 150^\circ = -F\delta s_C \frac{(R_2 + r_2)}{r_2}\cos 30^\circ.$$

В результате сумма элементарных работ активных сил:

$$\sum \delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) = \delta A(\vec{M}) + \delta A(\vec{F}) =$$

$$= M\delta s_C \frac{(R_2 - r_2)}{R_3 r_2} - F\delta s_C \frac{(R_2 + r_2)}{r_2}\cos 30^\circ = (0{,}85 + 23{,}35t)\delta s_C .$$

Определим модули главных векторов и главных моментов сил инерции:

$$R_1^{\text{и}} = m_1 a_1 = \frac{P_1}{g}\frac{(R_2 + r_2)}{r_2} a_C, \quad R_2^{\text{и}} = m_2 a_C = \frac{P_2 a_C}{g};$$

$$M_2^{\text{и}} = J_{2C}\varepsilon_2 = \frac{P_2}{g} i_{2C}^2 \frac{a_C}{r_2};$$

$$M_3^{\text{и}} = J_{3O}\varepsilon_3 = \frac{P_3 R_3}{2g}\frac{(R_2 - r_2)}{r_2} a_C,$$

где $J_{2C}$ – момент инерции катка 2 относительно оси, проходящей через его центр масс перпендикулярно плоскости движения, $J_{2C} = m_2 i_{2C}^2$; $i_{2C}$ – радиус инерции катка; $J_{3O}$ – осевой момент инерции блока 3, $J_{3O} = \frac{m_3 R_3^2}{2}$.

Найдем элементарные работы сил инерции:

$$\delta A(\vec{R}_1^{\text{и}}) = -R_1^{\text{и}}\delta s_1 = -\frac{P_1(R_2 + r_2)^2 a_C}{g r_2^2}\delta s_C;$$

$$\delta A(\vec{R}_2^{\text{и}}) = -R_2^{\text{и}}\delta s_C = -\frac{P_2 a_C}{g}\delta s_C;$$

$$\delta A(\vec{M}_2^{\text{и}}) = -M_2^{\text{и}}\delta\varphi_2 = -\frac{P_2 i_2^2 a_C}{g r_2^2}\delta s_C;$$

$$\delta A(\vec{M}_3^{\text{и}}) = -M_3^{\text{и}}\delta\varphi_3 = -\frac{P_3(R_2 - r_2)^2 a_C}{2gr_2^2}\delta s_C .$$

Сумма элементарных работ сил инерции:

$$\sum \delta A(\vec{R}_k^{\text{и}}) = -\frac{P_1(R_2 + r_2)^2 a_C}{gr_2^2}\delta s_C - \frac{P_2 a_C}{g}\delta s_C - \frac{P_2 i_2^2 a_C}{gr_2^2}\delta s_C -$$

$$-\frac{P_3(R_2 - r_2)^2 a_C}{2gr_2^2}\delta s_C = -52{,}75\, a_C \delta s_C, \text{ где } g = 9{,}81 \text{ м/с}^2.$$

С учетом проделанных вычислений общее уравнение динамики принимает вид: $\sum \delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) + \sum \delta A(\vec{R}_k^{\text{и}}) = (0{,}85 + 23{,}35t)\delta s_C - 52{,}75\, a_C \delta s_C = 0$, откуда найдём ускорение центра масс катка 2 как функцию времени:

$$a_C(t) = 0{,}02 + 0{,}45t .$$

Представляя ускорение $a_C$ в виде второй производной координаты движения центра масс $a_C = \ddot{s}_C$, получим дифференциальное уравнение $\ddot{s}_C = 0{,}02 + 0{,}45t$. Дважды проинтегрировав это уравнение с нулевыми начальными условиями, найдём закон движения центра масс:

$$s_C = 0{,}01t^2 + 0{,}075t^3 .$$

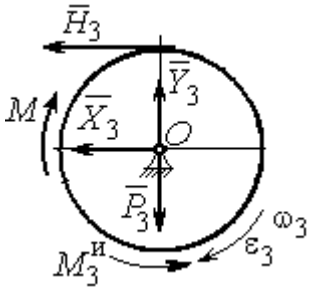


Рис. 6.21. Вращение блока 3

Рассмотрим вращательное движение блока 3, освободив его от связей. На блок действуют сила тяжести $\vec{P}_3$, реакция подшипника, разложенная на составляющие $\vec{X}_3$, $\vec{Y}_3$, пара сил с моментом $M$ и реакция нити $\vec{H}_3$ (рис. 6.21). Присоединим к блоку 3 силы инерции. При вращательном движении блока вокруг оси, проходящей через центр масс, главный вектор сил инерции равен нулю. Главный момент сил инерции $M_3^{\text{и}}$ направлен в сторону, противоположную угловому ускорению блока 3.

По принципу Даламбера система сил, приложенных к блоку 3, включая силы инерции, находится в равновесии. Составим уравнение равновесия в виде равенства нулю суммарного момента всех сил относительно оси вращения: $M - H_3 R_3 - M_3^{\text{и}} = 0$, откуда найдём реакцию нити: $H_3 = \dfrac{M}{R_3} - \dfrac{M_3^{\text{и}}}{R_3}$. Подставляя в уравнение величину модуля главного момента сил инерции блока 3 $M_3^{\text{и}}(1)$ = 0,7 Н·м и значение момента, приложенного к блоку 3, в момент времени $t$ = 1 с, $M(1)$ = 9 Н·м найдём реакцию нити $H_3(1)$= 20,75 Н.

Уравнения равновесия, составленные в виде проекций сил на вертикальную и горизонтальную оси (см. рис. 6.21), имеют вид:

$$X_3 + H_3 = 0,\ Y_3 - P_3 = 0.$$

Составляющие реакции шарнира блока 3 в момент времени $t$ = 1 с: $X_3$= – 20,75 Н, $Y_3$=15 Н. Полная реакция шарнира $R_3 = \sqrt{X_3^2 + Y_3^2}$ = 25,6 Н.

**Задача 69.** Груз 2 весом $P_2$, поднимаемый лебёдкой (рис. 6 22), подвешен в центре подвижного блока 3 весом $P_3$. Нерастяжимая нить одним концом прицеплена к грузу 1 весом $P_1$, лежащему на наклонной плоскости. Другой конец, переброшенный через невесомый блок $B$, охватывает снизу подвижный блок 3 радиуса $r$ и закреплён в вертикальном положении. К грузу 1 приложена сила $\vec{F}$, направленная вдоль наклонной плоскости.

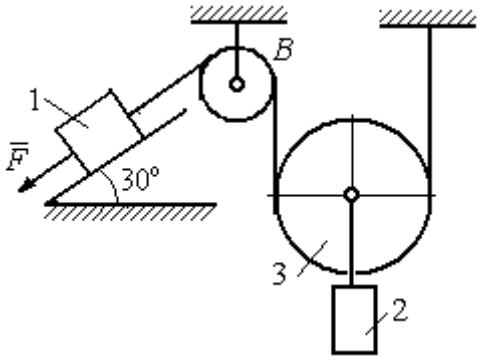


Рис. 6.22. Схема подъёмного устройства

Найти закон движения поднимаемого груза, если $P_1 = P_3 = P$, $P_2 = 3P$, $F = 2P$ и движение началось из состояния покоя.

*Решение*

Применим к решению задачи общее уравнение динамики. В данной механической системе активными силами являются силы тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$ и сила $\vec{F}$ (рис. 6.23). Реакциями связей являются реакция шарнира блока $B$ и

реакция опоры груза 1 (на рис. 6.23 не показаны). Связи идеальные, так как работа реакций связей равна нулю.

Предположим, груз 1 спускается вниз по наклонной плоскости с ускорением $a_1$. Приложим к телам системы силы инерции. Главные вектора сил инерции $\vec{R}_1^{\text{ин}}$ и $\vec{R}_2^{\text{ин}}$ грузов 1 и 2, движущихся поступательно, приложены в центрах масс грузов и направлены противоположно векторам ускорений тел. Главный вектор $\vec{R}_3^{\text{ин}}$ сил инерции блока 3 приложен в центре масс блока 3 и направлен противоположно вектору ускорения его центра масс. Главный момент сил инерции $M_3^{\text{ин}}$ относительно оси, проходящей через центр масс блока 3 перпендикулярно плоскости движения, направлен в сторону, противоположную направлению углового ускорения блока 3, совпадающего с направлением углового движения. Направления главных векторов и главного момента сил инерции тел показаны на рис. 6.23.

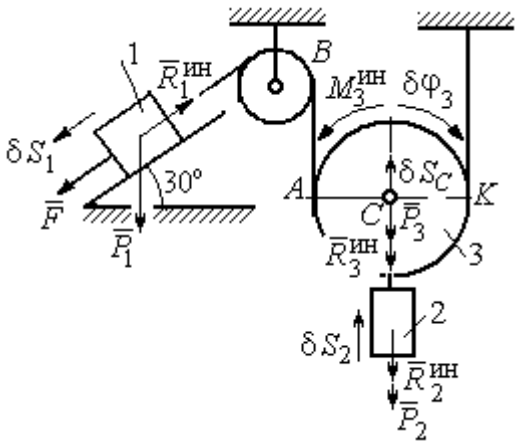



Рис.6.23. Активные силы и силы инерции, приложенные к системе

Дадим системе возможное перемещение, при котором груз 1 спустился вниз по наклонной плоскости на расстояние $\delta S_1$. В соответствии с приложенными в системе связями центр масс подвижного блока 2 и груз 2 переместились вверх на высоту $\delta S_C$, а сам блок повернулся на угол $\delta\varphi_3$ (см. рис. 6.23).

Составим общее уравнение динамики $\sum\delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) + \sum\delta A(\vec{R}_k^{\text{и}}) = 0$. Получим

$$F\delta S_1 + P_1\delta S_1\cos 60° - P_2\delta S_2 - P_3\delta S_C -$$

$$- R_1^{\text{ин}}\delta S_1 - R_2^{\text{ин}}\delta S_C - R_3^{\text{ин}}\delta S_C - M_3^{\text{ин}}\delta\varphi_3 = 0,$$

где модули сил инерции $R_1^{ин} = m_1 a_1$, $R_2^{ин} = m_2 a_2$, $R_3^{ин} = m_3 a_C$, $M_3^{ин} = \frac{m_3 r^2}{2}\varepsilon_3$.

Выразим перемещение $\delta S_2$ и ускорение $a_2$ груза 2, а также поворот $\delta\varphi_3$ и угловое ускорение $\varepsilon_3$ подвижного блока 3 через перемещение $\delta S_1$ и ускорение $a_1$ груза 1.

Угловая скорость блока 3 $\omega_3 = \frac{V_A}{AK} = \frac{V_1}{2r}$. Здесь учтено, что точка $K$ блока 3 является его мгновенным центром скоростей. Тогда, элементарный поворот блока $\delta\varphi_3 = \frac{\delta S_1}{2r}$, а его угловое ускорение $\varepsilon_3 = \frac{a_1}{2r}$.

Скорость центра масс блока 3 и скорость груза 2: $V_2 = V_C = \frac{V_1}{2}$. Из этого равенства следует, что: $\delta S_2 = \delta S_C = \frac{\delta S_1}{2}$, $a_2 = a_C = \frac{a_1}{2}$.

Подставляя найденные соотношения в общее уравнение динамики с учётом данных задачи, окончательно получим уравнение: $\frac{1}{2}P\delta S_1 = \frac{17}{8g}Pa_1\delta S_1$.

Отсюда $a_1 = \frac{4}{17}g = 0{,}23g$. Ускорение груза 2, $a_2 = \frac{a_1}{2} = 0{,}12g$.

Представим ускорение груза 2 в виде второй производной координаты его движения. Получим дифференциальное уравнение: $\ddot{S}_2 = 0{,}12g$. Дважды проинтегрировав его с нулевыми начальными условиями, найдём закон движения груза: $S_2 = 0{,}06gt^2$.

**Задача 70**. Грузы 1 и 2 весом $P_1 = 20$ Н и $P_2 = 30$ Н привязаны к нерастяжимой нити. Нить переброшена через неподвижные блоки $B$ и $D$ и охватывает снизу подвижный блок 3 весом $P_3 = 40$ Н (рис. 6.24). Определить ускорения грузов 1 и 2 и центра масс блока 3. Весом неподвижных блоков $B$ и $D$ пренебречь.

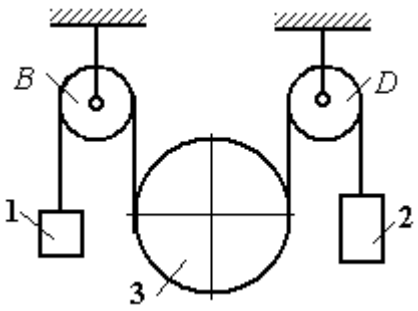


Рис. 6.24. Механическая система с двумя степенями свободы

*Решение*

В данной механической системе активными силами являются силы тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$ (рис. 6.25), а реакциями связей – реакции шарниров блоков $B$ и $D$. Связи идеальные, так как оси вращения блоков $B$ и $D$ неподвижны.

Применим к решению задачи общее уравнение динамики. Система имеет две степени свободы. В этом случае общее уравнение динамики необходимо составлять для каждого из независимых перемещений.

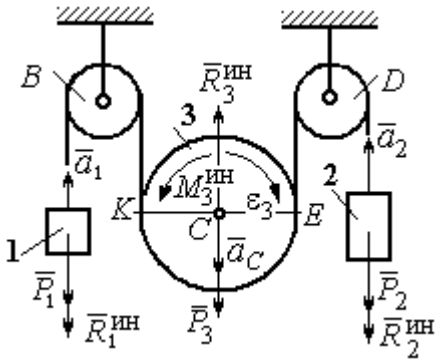


Рис.6.25. Активные силы и силы инерции, приложенные к системе

Предположим, система движется так, что оба груза 1 и 2 равноускоренно перемещаются вверх. Скорости грузов $\vec{V}_1$, $\vec{V}_2$, ускорения – $\vec{a}_1$ и $\vec{a}_2$. Блок 3 опускается вниз с ускорением центра $\vec{a}_C$, вращается и имеет угловое ускорение $\varepsilon_3$, направленное по ходу часовой стрелки (см. рис. 6.25).

Приложим к телам системы силы инерции (см. рис. 6.25). Модули сил инерции: $R_1^{\text{ин}} = m_1 a_1$, $R_2^{\text{ин}} = m_2 a_2$, $R_3^{\text{ин}} = m_3 a_C$. Главный момент сил инерции блока 3 $M_3^{\text{ин}} = J_{3C}\varepsilon_3$, где осевой момент инерции $J_{3C} = \dfrac{m_3 r^2}{2}$. Направления векторов сил и моментов сил инерции показаны на рис. 6.25.

Для вычисления углового ускорения блока 3 воспользуемся векторным представлением ускорения точки при плоскопараллельном движении тела.

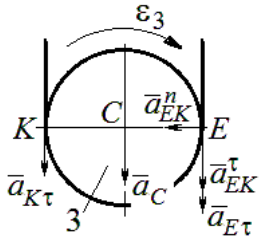


Рис. 6.26. Схема вычисления углового ускорения блока 3

Выберем точку $K$ за полюс. Ускорение точки $E$ определяется равенством $\vec{a}_E = \vec{a}_K + \vec{a}^{\,n}_{EK} + \vec{a}^{\,\tau}_{EK}$, где $\vec{a}_K$ – ускорение полюса $K$; $\vec{a}^{\,n}_{EK}$, $\vec{a}^{\,\tau}_{EK}$ – нормальная и касательная составляющие ускорения точки $E$ при вращении блока 3 вокруг полюса $K$ (рис. 6.26). Спроектируем векторное равенство на вертикальную ось $E\tau$. Получим: $a_{E\tau} = a_{K\tau} + a^{\tau}_{EK}$, где $a_{E\tau}$ и $a_{K\tau}$ – проекции ускорений точек $E$ и $K$ на вертикальную ось.

Поскольку модуль ускорения точки $K$ нити равен модулю ускорения груза 1, то $a_{K\tau} = a_1$. Модуль ускорения точки $E$ нити равен модулю ускорения груза 2 и $a_{E\tau} = a_2$. Так как $a^{\tau}_{EK} = \varepsilon_3 AK = \varepsilon_3 2r$, то $\varepsilon_3 = \dfrac{a_{E\tau} - a_{K\tau}}{2r} = \dfrac{a_2 - a_1}{2r}$.

Составляя такое же векторное уравнение для определения ускорения центра масс блока 3 (точки $C$) и проектируя его на вертикальную ось, найдём:

$$a_C = a_{K\tau} + a^{\tau}_{CK} = a_1 + \varepsilon_3 r = \frac{a_2 + a_1}{2}.$$

Выберем в качестве независимых координат $s_1, s_2$ – положения грузов 1 и 2, отсчитываемые от неподвижных осей вращения блоков $B$ и $D$. Возможные перемещения грузов обозначим $\delta s_1$ и $\delta s_2$.

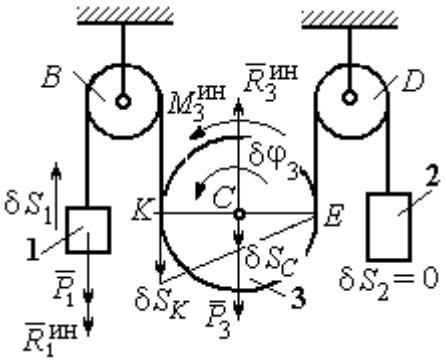


Рис.6.27. Движение системы при перемещении груза 1.

Дадим системе возможное перемещение, при котором груз 1 поднимается вверх на расстояние $\delta s_1$, а груз 2 – неподвижен. При таком движении нить, соединяющая груз 2 с блоком 3, неподвижна вплоть до точки $E$ (рис. 6.27).

Вращение блока 3 происходит против направления хода часовой стрелки. Точка $E$ является мгновенным центром скоростей блока 3, и угловая скорость блока $\omega_3 = \frac{V_K}{2r} = \frac{V_1}{2r}$. Скорость центра масс блока $V_C = \frac{1}{2}V_1$. Тогда элементарный поворот блока 3 $\delta\varphi_3 = \frac{\delta s_1}{2r}$ и элементарное перемещения центра масс $\delta s_C = \frac{1}{2}\delta s_1$ .

На данном возможном перемещении работу совершают как активные силы – силы тяжести $\vec{P}_1$ и $\vec{P}_3$ груза 1 и блока 3, так и силы инерции – $\vec{R}_1^{\text{ин}}$, $\vec{R}_3^{\text{ин}}$ и пара сил инерции с моментом $M_3^{\text{ин}}$.

Составим общее уравнение динамики:

$$\sum \delta A\left(\vec{F}_k^{\text{акт}}\right) + \sum \delta A\left(\vec{R}_k^{\text{ин}}\right) = -P_1\delta s_1 + P_3\delta s_C - R_1^{\text{ин}}\delta s_1 - R_3^{\text{ин}}\delta s_C + M_3^{\text{ин}}\delta\varphi_3 = 0.$$

Здесь работа сил инерции

$$R_1^{\text{ин}}\delta s_1 = m_1 a_1 \delta s_1, \quad R_3^{\text{ин}}\delta s_C = m_3 a_C \delta s_C = \frac{P_3}{g}\left(\frac{a_1 + a_2}{2}\right)\cdot\frac{1}{2}\delta s_1;$$

$$M_3^{\text{ин}}\delta\varphi_3 = J_{3C}\varepsilon_3\delta\varphi_3 = \frac{P_3 r^2}{2g}\cdot\frac{a_2 - a_1}{2r}\cdot\frac{\delta s_1}{2r}.$$

В результате общее уравнение динамики представляется выражением

$$-P_1\delta s_1 + \frac{1}{2}P_3\delta s_1 - \frac{P_1}{g}a_1\delta s_1 - \frac{P_3}{g}\left(\frac{a_1 + a_2}{2}\right)\cdot\frac{1}{2}\delta s_1 + \frac{P_3 r^2}{2g}\cdot\frac{a_2 - a_1}{2r}\cdot\frac{\delta s_1}{2r} = 0,$$

которое преобразуется к виду:

$$(3P_3 + 8P_1)a_1 + P_3 a_2 = (4P_3 - 8P_1)g.$$

Дадим системе другое независимое возможное перемещение, при котором груз 2 движется вверх ($\delta s_2 \neq 0$), а груз 1 неподвижен ($\delta s_1 = 0$).

При этом перемещении нить, соединяющая груз 1 и блок 3 неподвижна вплоть до точки $K$ (рис. 6.28). Вращение блока 3 происходит по направлению хода часовой стрелки. Точка $K$ является мгновенным центром скоростей блока 3.

Тогда $\omega_3 = \frac{V_E}{2r} = \frac{V_2}{2r}$ и скорость центра масс блока $V_C = \frac{1}{2}V_2$. Элементарный поворот блока 3 $\delta\varphi_3 = \frac{\delta s_2}{2r}$ и перемещение центра масс $\delta s_C = \delta s_E = \frac{1}{2}\delta s_2$.

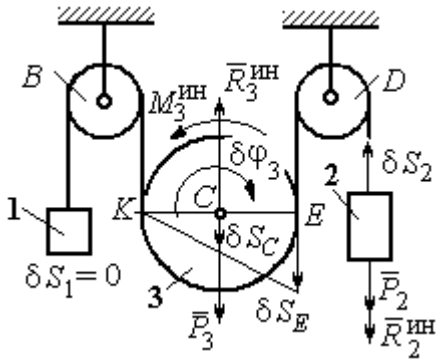


Рис. 6.28. Движение системы при перемещении груза 2

При таком движении работу совершают силы тяжести $\vec{P}_2$ и $\vec{P}_3$, силы инерции $\vec{R}_2^{ин}$, $\vec{R}_3^{ин}$ и пара сил с моментом $M_3^{ин}$.

Составим общее уравнение динамики на возможном перемещении $\delta s_2$ (см. рис. 6.28):

$$-P_2\delta s_2 - R_2^{ин}\delta s_2 + P_3\delta s_C - R_3^{ин}\delta s_C - M_3^{ин}\delta\varphi_3 = 0,$$

которое преобразуется к виду

$$-P_2\delta s_2 - \frac{P_2}{g}a_2\delta s_2 + \frac{1}{2}P_3\delta s_2 - \frac{P_3}{g}\left(\frac{a_1+a_2}{2}\right)\frac{1}{2}\delta s_2 - \frac{P_3 r^2}{2g}\left(\frac{a_2-a_1}{2r}\right)\frac{\delta s_2}{2r} = 0$$

или к виду

$$(8P_2 + 3P_3)a_2 + P_3 a_1 = (4P_3 - 8P_2)g.$$

Подставляя данные задачи в оба уравнения динамики, соответствующие независимым перемещениям $\delta s_1$ и $\delta s_2$, получим систему уравнений:

$$7a_1 + a_2 = 0, \quad 2g + 9a_2 + a_1 = 0.$$

Решение системы: $a_1 = \frac{1}{31}g$, $a_2 = -\frac{7}{31}g$ представляет ускорения грузов 1 и 2.

Ускорение центра масс блока 3 находится по формуле $a_C = \frac{a_1 + a_2}{2} = -\frac{3}{31}g$.

Знаки ускорений определяют направления движений тел: груз 1 движется в выбранном направлении – вверх, груз 2 – вниз, центр блока 3 – вверх.

## Упражнения

Упражнение 6.4. В механической системе (рис. 6.29) блок 1 радиуса $r$ и каток 2 соединены горизонтальным невесомым стержнем. Скольжение между стержнем и катками отсутствует. Каток 2 состоит из двух шкивов радиусов $r$ и $R = 2r$, скреплённых на одной оси. Каток катится, опираясь малым шкивом на горизонтальную поверхность, без проскальзывания. Груз 3 представляет собой поршень, двигающийся по горизонтальной поверхности без трения и прикреплённый к центру масс катка 2. К блоку 1 приложена пара сил с переменным моментом $M_{\text{вр}} = mgr\sin\omega t$.

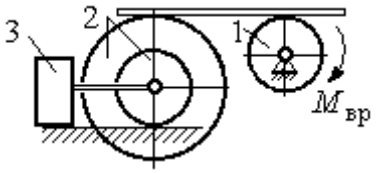


Рис. 6.29. Схема движения механической системы

Найти закон движения поршня 3, если массы грузов $m_1 = m_3 = m$, общая масса катка 2 $m_2 = 2m$, момент инерции катка 2 относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения, $i_2 = 1{,}5r$. Движение началось из состояния покоя.

Упражнение 6.5. Груз 1, двигаясь горизонтально, приводит в движение ступенчатый барабан 2 посредством нерастяжимой нити, намотанной на его малую ступень (рис. 6.30). К барабану на нитях, намотанных на большую и малую ступеньки, подвешены два груза 3 и 4. На груз 1 действует сила $F = P(t+1)$. Определить закон движения груза 3, если веса грузов одинаковы и равны $P$, вес барабана 2 равен $2P$, радиусы ступенек барабана $r$ и $2r$, радиус инерции барабана $i_2 = r\sqrt{2}$, и движение началось из состояния покоя.

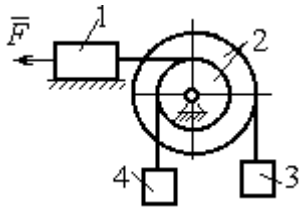


Рис. 6.30. Схема подъёмника

## 6.4. Уравнения Лагранжа II рода

**Обобщенными координатами** называется совокупность любых $s$ независимых параметров $q_1, q_2, \ldots, q_s$, однозначно определяющих положение системы в любой момент времени.

Если системе сообщить возможное перемещение, при котором все обобщенные координаты изменятся на элементарные (бесконечно малые) величины $\delta q_1, \delta q_2, \ldots, \delta q_s$, называемые **вариациями обобщенных координат**, то все действующие активные силы совершат элементарную работу, которая может быть представлена в виде: $\delta A = Q_1 \cdot \delta q_1 + Q_2 \cdot \delta q_2 + \ldots + Q_s \cdot \delta q_s$.

Величина $Q_k$, $k = 1, 2, \ldots, s$, равная коэффициенту при вариации $\delta q_k$ обобщенной координаты, называется **обобщенной силой**, соответствующей

данной обобщенной координате. Расчет обобщенных сил осуществляется путем последовательного придания системе возможных перемещений, при которых варьируется только одна из обобщенных координат, а вариации остальных координат равны нулю.

Для материальной системы с идеальными связями дифференциальные уравнения движения в обобщенных координатах – **уравнения Лагранжа II рода** – имеют вид: $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} = Q_k$, $k = 1,2,...,s$, где $s$ – число степеней свободы системы; $T$ – кинетическая энергия системы; $q_1, q_2, ..., q_s$ – обобщенные координаты; $\dot{q}_1, \dot{q}_2, ..., \dot{q}_s$ – обобщенные скорости.

## Примеры решения задач на составление уравнений Лагранжа

**Задача 71**. В механизме домкрата (рис. 6.31) движение зубчатого колеса 1 передаётся шестерне 2, к которой соосно прикреплено зубчатое колесо 3, имеющее зацепление с зубчатой рейкой 4, на которой поднимается груз 5 массы $m_5$ = 50 кг.

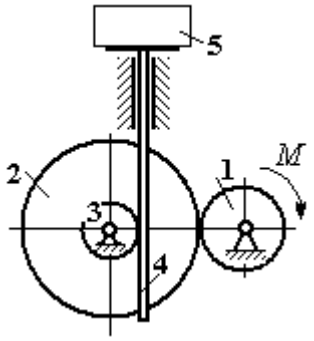


Рис. 6.31. Схема механизма домкрата

Радиусы зубчатых колёс $r_1$ = 5 см, $r_2$ = 12 см, $r_3$ = 6 см. Зубчатые колёса считать сплошными однородными дисками. Массы колёс $m_1$ = 0,8 кг, $m_2$ = 1,6 кг, $m_3$ = 0,6 кг, масса зубчатой рейки $m_4$ = 1 кг.

Какой величины постоянный вращающий момент нужно приложить к колесу 1 для того, чтобы в момент времени $t$ = 2 с груз 5 имел скорость $V_5$ = 1 м/с, если движение системы начинается из состояния покоя.

*Решение*

Домкрат является механической системой с одной степенью свободы. Выберем в качестве обобщённой координаты координату $x$, отмечающую положение груза 5 (рис. 6.32).

Уравнение Лагранжа для обобщённой координаты $x$ имеет вид: $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}}\right)-\frac{\partial T}{\partial x}=Q_x$, где $T$ – кинетическая энергия системы; $\dot{x}$ – обобщённая скорость; $Q_x$ – обобщённая сила.

Кинетическая энергия колеса 1: $T_1=\frac{J_1\omega_1^2}{2}$, где $\omega_1$ – угловая скорость колеса 1; $J_1$ – момент инерции колеса, $J_1=\frac{m_1r_1^2}{2}$.

Кинетические энергии шестерни 2 и зубчатого колеса 3, у которых угловые скорости одинаковы, соответственно: $T_2=\frac{J_2\omega_2^2}{2}$, $T_3=\frac{J_3\omega_2^2}{2}$, где $\omega_2$ – угловая скорость шестерни 2; $J_2$, $J_3$ – моменты инерции шестерни 2 и зубчатого колеса 3 относительно оси, проходящей через общий центр масс, $J_2=\frac{m_2r_2^2}{2}$, $J_3=\frac{m_3r_3^2}{2}$. Скорость груза 5 равна скорости зубчатой линейки $V_5=V_4$. Кинетическая энергия зубчатой линейки 4 и груза 5: $T_4=\frac{m_4V_4^2}{2}$, $T_5=\frac{m_5V_4^2}{2}$.

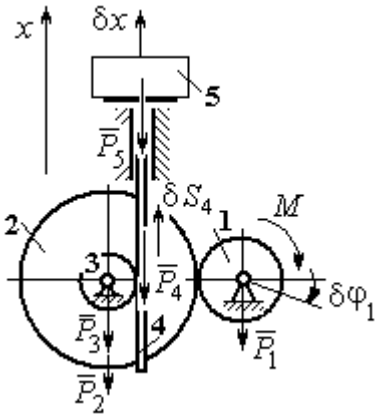


Рис. 6.32. Возможные перемещения звеньев механизма

Выразим угловые скорости колёс через скорость груза (зубчатой линейки).

Имеем: $\omega_2=\omega_3=\frac{V_4}{r_3}$ (см. рис. 6.32). Кроме того, из равенства $\omega_2r_2=\omega_1r_1$ следует $\omega_1=\frac{\omega_2r_2}{r_1}=\frac{V_4r_2}{r_1r_3}$.

Подставляя полученные соотношения в выражения кинетических энергий тел и с учётом данных задачи, получим кинетическую энергию системы:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 =$$

$$= \frac{m_1 r_1^2}{4}\left(\frac{V_4 r_2}{r_1 r_3}\right)^2 + \frac{m_2 r_2^2}{4}\left(\frac{V_4}{r_3}\right)^2 + \frac{m_3 r_3^2}{4}\left(\frac{V_4}{r_3}\right)^2 + \frac{m_4 V_4^2}{2} + \frac{m_5 V_4^2}{2} =$$

$$= \left[\frac{m_1 + m_2}{2}\left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2 + \frac{m_3}{2} + m_4 + m_5\right]\frac{V_4^2}{2} = 28{,}05 V_4^2 = 28{,}05\,\dot{x}^2.$$

Вычислим обобщённую силу.

Дадим возможное перемещение $\delta x$ грузу 5. При этом линейка 4 переместится на расстояние $\delta s_4$, а зубчатое колесо 1 повернётся на угол $\delta\varphi_1$. Найдём сумму работ всех сил, приложенных к системе, на этом возможном перемещении. Получим: $\delta A = -P_5\delta x - P_4\delta s_4 + M\delta\varphi_1$. Работа сил тяжести зубчатых колёс $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$ и $\vec{P}_3$ равна нулю, так как точки приложения этих сил неподвижны.

Из ранее полученных скоростных соотношений следуют равенства перемещений: $\delta s_4 = \delta x$, $\delta\varphi_1 = \frac{r_2}{r_1 r_3}\delta x$. В результате сумма работ сил на возможном перемещении системы выражается в виде $\delta A = \left(-m_5 g - m_4 g + M\frac{r_2}{r_1 r_3}\right)\delta x$. Отсюда обобщённая сила $Q_x$, соответствующая координате *x*: $Q_x = -(m_5 + m_4)g + M\frac{r_2}{r_1 r_3} = -500{,}31 + 40M$.

Составим уравнение Лагранжа.

С учётом, что $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}}\right) = 56{,}1\,\ddot{x}$ и $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$, дифференциальное уравнение движения имеет вид: $56{,}1\,\ddot{x} = -500{,}31 + 40M$ или $\ddot{x} = -8{,}92 + 0{,}71M$.

Интегрируя это уравнение с нулевыми начальными условиями, получим закон изменения скорости груза 5: $V_5 = \dot{x} = (-8{,}92+0{,}71M)t$.

По условию задачи при $t = 2$ с $V_5 = 1$ м/с. Подставляя эти данные в уравнение, получим: $M = 13{,}27$ Н·м.

**Задача 72**. Механическая система состоит из ступенчатого блока 2, катка 3, соединённых невесомым брусом 1, и невесомой пружины жесткостью $c$. Радиусы ступеней блока $r$ и $R = 1{,}5r$, радиус катка 3 равен $r$. Брус, лежащий на катке 3 и блоке 2, во время движения остаётся параллельным линии качения катка 3 (рис. 6.33). В центре катка 3 приложена сила $\vec{F}$, направленная вверх параллельно наклонной плоскости, а к блоку 2 – пара сил с моментом $M$. Качение катка по неподвижной поверхности без скольжения. Проскальзывание между брусом 1 и дисками отсутствует. Передача движения пружины блоку 2 производится посредством невесомого жесткого вертикального стержня, прижатого к малой ступеньке блока без скольжения. Радиус инерции блока 2 относительно оси вращения $i_z = r\sqrt{2}$. Веса тел: $P_3 = P$, $P_2 = 2P$, приложенная сила $F = 2P$, момент $M = Pr$, жесткость пружины $c = P/r$.

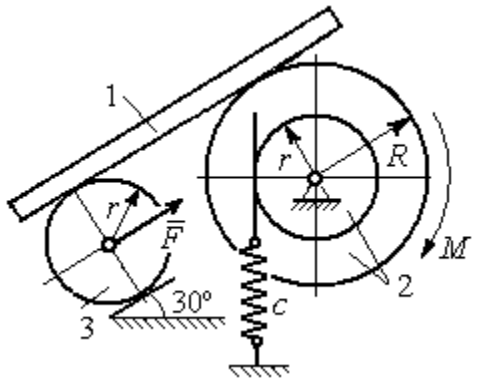


Рис. 6.33. Механическая система с одной степенью свободы

Определить закон угловых колебаний блока 2 при $P = 10$ Н, $r = 0{,}2$ м, если в начальный момент пружина находилась в нерастянутом состоянии, а блоку 2 придали угловую скорость $\omega_0 = 0{,}5$ рад/с в сторону вращения, создаваемого заданным моментом.

*Решение*

Рассматриваемая механическая система (рис. 6.34) имеет одну степень свободы. В качестве обобщённой координаты $q$ выберем перемещение $x$

верхнего края пружины, отсчитываемого от уровня недеформируемой пружины (см. рис. 6.34). Обобщённая скорость $\dot{q} = \dot{x}$.

Уравнение Лагранжа II рода, описывающее движение системы, имеет вид $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}}\right) - \frac{\partial T}{\partial x} = Q_x$, где $T$ – кинетическая энергия системы; $Q_x$ – обобщенная сила, соответствующая обобщенной координате *x*.

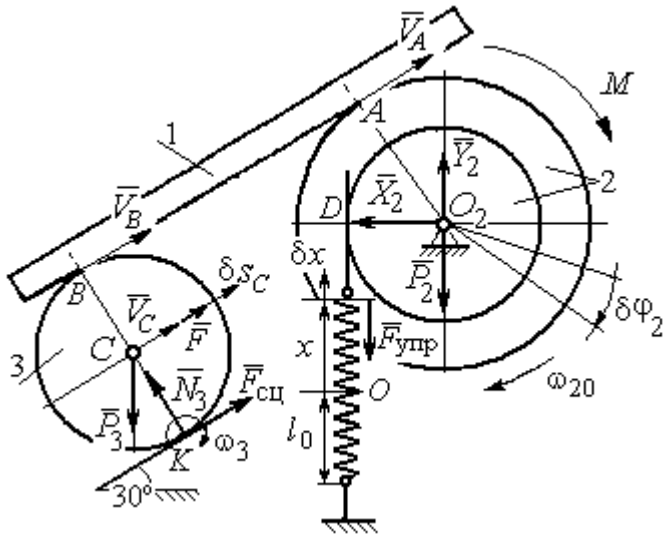



Рис. 6.34 Расчётная схема колебаний механической системы с одной степенью свободы

Вычислим кинетическую энергию системы. Энергия вращательного движения блока 2: $T_2 = \frac{1}{2} J_{2z} \omega_2^2$, где $\omega_2$ – угловая скорость блока; $J_{2z}$ – момент инерции блока 2 относительно оси *z*, $J_{2z} = m_2 i_z^2$. Каток 3 совершает плоскопараллельное движение. Его кинетическая энергия $T_3 = \frac{1}{2} m_3 V_C^2 + \frac{1}{2} J_{zC} \omega_3^2$, где $V_C$, $\omega_3$ – скорость центра масс катка 3 и его угловая скорость; $J_{zC}$ – момент инерции катка относительно оси, проходящей через его центр масс перпендикулярно плоскости движения, $J_{zC} = \frac{1}{2} m_3 r^2$; $r$ – радиус катка.

Выразим угловые скорости $\omega_2$, $\omega_3$, а также скорость $V_C$ через обобщённую скорость $\dot{x}$.

Заметим, что скорость точки *D* блока 2 равна скорости движения верхнего края пружины: $V_D = \dot{x}$ (см. рис. 6.34). Угловая скорость блока 2: $\omega_2 = \dfrac{V_D}{r} = \dfrac{\dot{x}}{r}$.

Скорость точки *A* блока 2: $V_A = \omega_2 R = \dfrac{\dot{x}R}{r}$.

Так как брус совершает поступательное движение, то скорости точек *A* и *B* равны: $V_B = V_A$. Угловая скорость катка 3 (точка *K* касания катка 3 с неподвижной поверхностью является его мгновенным центром скоростей): $\omega_3 = \dfrac{V_B}{2r} = \dfrac{V_A}{2r} = \dfrac{\dot{x}R}{2r^2}$. Скорость центра катка 3: $V_C = \dfrac{V_B}{2} = \dfrac{\dot{x}R}{2r}$.

Подставляя найденные кинематические соотношения с учётом исходных данных задачи, получим кинетическую энергию тел системы:

$$T_2 = \frac{1}{2} J_{2z} \omega_2^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{2P}{g} \left(r\sqrt{2}\right)^2 \left(\frac{\dot{x}}{r}\right)^2 = \frac{2P}{g} \dot{x}^2;$$

$$T_3 = \frac{1}{2} m_3 V_C^2 + \frac{1}{2} J_{zC} \omega_3^2 = \frac{1}{2} \frac{P}{g} \left(\frac{\dot{x}R}{2r}\right)^2 + \frac{1}{2} \frac{Pr^2}{2g} \left(\frac{\dot{x}R}{2r^2}\right)^2 = \frac{3P}{4g} \left(\frac{R}{2r}\right)^2 \dot{x}^2.$$

Полная кинетическая энергия системы:

$$T = T_2 + T_3 = \frac{P}{g} \left(2 + \frac{3}{4} \left(\frac{R}{2r}\right)^2\right) \dot{x}^2.$$

Найдём обобщённую силу. Произвольное положение системы определяется обобщённой координатой *x*, показывающей растяжение пружины. Дадим пружине в произвольном положении возможное (бесконечно малое) перемещение $\delta x$ в положительном направлении оси *x* (см. рис. 6.34). При этом блок 2 повернётся на угол $\delta\varphi_2 = \dfrac{\delta x}{r}$, центр масс катка 3 сдвинется на расстояние $\delta s_C = \dfrac{R}{2r} \delta x$. На заданном перемещении системы работу совершают сила тяжести катка 3, пара сил с моментом *M*, сила $\vec{F}$ и сила упругости пружины.

Элементарная работа вращающего момента $M$: $\delta A(M) = M\delta\varphi_2 = M\dfrac{\delta x}{r}$.

Работа силы тяжести катка 3: $\delta A(\vec{P}_3) = P_3\delta s_C\cos 120^\circ = -P_3\dfrac{R}{4r}\delta x$.

Работа силы $F$: $\delta A(\vec{F}) = F\delta s_C = F\dfrac{R}{2r}\delta x$.

Модуль силы упругости пружины, растянутой из недеформированного положения на расстояние $x$: $F_{\text{упр}} = cx$. Сила упругости направлена в сторону, противоположную растяжению (см. рис. 6.34). Её работа при перемещении $\delta x$ вычисляется по формуле $\delta A(\vec{F}_{\text{упр}}) = F_{\text{упр}}\delta x\cos 180^\circ = -cx\delta x$.

Сумма работ сил на рассматриваемом возможном перемещении системы с учётом данных задачи:

$$\delta A = M\frac{\delta x}{r} - P_3\frac{R}{4r}\delta x + F\frac{R}{2r}\delta x - cx\delta x = P\left(\frac{17}{8} - \frac{x}{r}\right)\delta x,$$

откуда обобщённая сила $Q_x = P\left(\dfrac{17}{8} - \dfrac{x}{r}\right)$.

Вычислим необходимые производные кинетической энергии: $\dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial T}{\partial \dot{x}}\right) = \dfrac{2P}{g}\left(2 + \dfrac{3}{4}\left(\dfrac{R}{2r}\right)^2\right)\ddot{x}$, $\dfrac{\partial T}{\partial x} = 0$ и, подставляя их в общий вид уравнений Лагранжа, получим дифференциальное уравнение колебаний верхнего края пружины:

$$\frac{2P}{g}\left(2 + \frac{3}{4}\left(\frac{R}{2r}\right)^2\right)\ddot{x} = P\left(\frac{17}{8} - \frac{x}{r}\right), \text{ или } \ddot{x} + 10{,}2x = 4{,}34 \text{ (здесь } g = 9{,}81 \text{ м/с}^2\text{).}$$

Решение дифференциального уравнения представляется в виде суммы: $x = x_{\text{одн}} + x_{\text{частн}}$. Общее решение однородного уравнения имеет вид $x_{\text{одн}} = C_1\sin kt + C_2\cos kt$, где $C_1$, $C_2$ – произвольные постоянные; $k$ – круговая частота собственных колебаний пружины, $k = \sqrt{10{,}2}$ = 3,19 рад/с. Частное решение неоднородного уравнения ищется в виде константы $x_{\text{част}} = b$. Подставив

его в уравнение колебаний, получим: $b = 0{,}42$. Таким образом, общее решение неоднородного уравнения имеет вид $x(t) = C_1 \sin 3{,}19t + C_2 \cos 3{,}19t + 0{,}42$.

Произвольные постоянные $C_1$, $C_2$ находятся из начальных условий. По условию задачи в начальный момент пружина была в нерастянутом состоянии. Тогда начальная координата пружины (её верхнего края) $x(0) = 0$. Подставляя значение начальной координаты в общее решение неоднородного уравнения при $t = 0$, получим $C_2 = -0{,}42$. Скорость верхнего края пружины в начальный момент времени $\dot{x}(0)$ равна начальной скорости $V_D(0)$ точки $D$ блока 2. Поскольку в начальный момент времени блоку 2 сообщили угловую скорость $\omega_{20} = 0{,}5$ рад/с, то при $r = 0{,}2$ м $\dot{x}(0) = V_D(0) = \omega_{20} r = 0{,}1$ м/с.

Вычисляем скорость движения края пружины, взяв производную: $\dot{x}(t) = 3{,}19 C_1 \cos 3{,}19t - 3{,}19 C_2 \sin 3{,}19t$. Подставляя начальное значение скорости, получим $C_1 = 0{,}03$.

Окончательно уравнение движения верхнего края пружин: $x(t) = 0{,}03 \sin 3{,}19t - 0{,}42 \cos 3{,}19t + 0{,}42$ м. Уравнение колебательного движения блока 2: $\varphi_2 = \dfrac{x}{r} = 0{,}15 \sin 3{,}19t - 2{,}1 \cos 3{,}19t + 2{,}1$ рад.

**Задача 73**. Прямоугольная призма 3 весом $2P$ лежит на катке 1 радиуса $r$ и веса $P$ и опирается на невесомый блок 2 (рис. 6.35). Каток 1 катится по неподвижной горизонтальной поверхности без скольжения. По наклонной поверхности призмы скатывается без скольжения каток 4 весом $P$ и радиуса $r$. Угол наклона поверхности призмы к горизонту составляет 30º. На каток 1 действует пара сил с постоянным моментом $M = 3Pr$, а на призму 3 – горизонтальная сила $\vec{F}$ с модулем $F = P$. Катки считать однородными

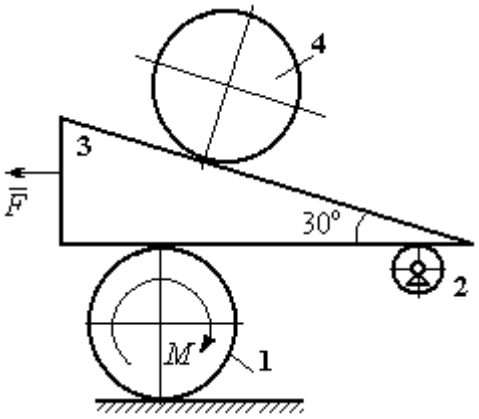


Рис. 6.35. Механическая система с двумя степенями свободы

дисками. Проскальзывание между катками 1, 4 и призмой отсутствует. В начальный момент система находилась в покое.

Определить закон движения призмы 3 и закон движения катка 4 относительно призмы.

*Решение*

Рассматриваемая механическая система – катки и призма имеет две степени свободы, так как перемещение катка 4 относительно призмы 3 не зависит от перемещения самой призмы и катка 1. За обобщенные координаты выберем перемещение $x_4$ центра масс катка 4 относительно края призмы и перемещение $x_3$ края призмы 3 относительно произвольной неподвижной вертикальной плоскости (рис. 6.36). Обобщенные скорости: $\dot{x}_4$, $\dot{x}_3$.

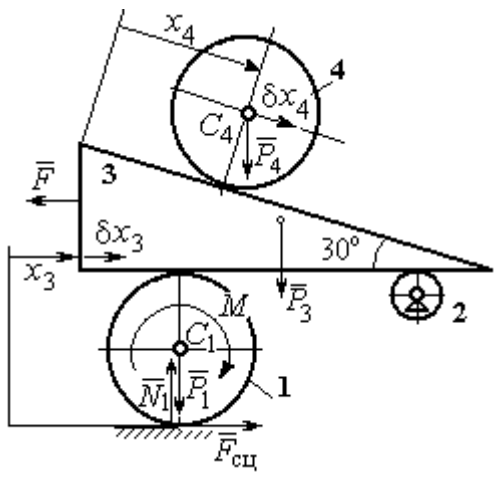



Рис. 6.36. Возможные перемещения механической системы

Уравнения Лагранжа II рода, описывающие движение системы в обобщённых координатах:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_4}\right) - \frac{\partial T}{\partial x_4} = Q_{x_4};$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_3}\right) - \frac{\partial T}{\partial x_3} = Q_{x_3},$$

где $T$ – кинетическая энергия системы; $Q_{x_4}$, $Q_{x_3}$ – обобщенные силы, соответствующие указанным обобщенным координатам.

Вычислим кинетическую энергию тел в системе.

Каток 1 совершает плоскопараллельное движение. Кинетическая энергия катка $T_1 = \frac{1}{2} m_1 V_{C_1}^2 + \frac{1}{2} J_{C_1} \omega_1^2$, где $V_{C_1}$ – скорость центра масс катка, $V_{C_1} = \frac{1}{2}\dot{x}_3$; $J_{C_1}$ – момент инерции катка относительно оси, проходящей через центр масс

перпендикулярно плоскости движения, $J_{C_1} = \frac{m_1 r^2}{2}$; $\omega_1$ – угловая скорость катка 1, $\omega_1 = \frac{\dot{x}_3}{2r}$.

Призма 3 совершает поступательное движение со скоростью $V_3 = \dot{x}_3$. Её кинетическая энергия $T_3 = \frac{m_3 V_3^2}{2} = \frac{m_3 \dot{x}_3^2}{2}$.

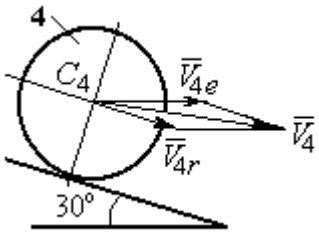


Рис. 6.37. Скорость центра масс катка 4

При расчёте кинетической энергии катка 4 по формуле $T_4 = \frac{1}{2} m_4 V_4^2 + \frac{1}{2} J_{C_4} \omega_4^2$ необходимо учитывать, что каток 4 совершает сложное движение. Здесь относительное движение катка – его качение по наклонной поверхности призмы, переносное – поступательное перемещение вместе с призмой.

Вектор абсолютной скорости центра масс катка 4 $\vec{V}_4$ представляется в виде суммы $\vec{V}_4 = \vec{V}_{4e} + \vec{V}_{4r}$ (рис. 6.37), где $\vec{V}_{4e}$ – вектор переносной скорости катка, равный по модулю скорости призмы: $V_{4e} = \dot{x}_3$; $\vec{V}_{4r}$ – вектор относительной скорости центра масс катка, равный по величине $V_{4r} = \dot{x}_4$. Модуль абсолютной скорости центра масс катка 4 (по теореме косинусов):

$$V_4^2 = V_{4e}^2 + V_{4r}^2 - 2V_{4e}V_{4r}\cos 150^\circ = \dot{x}_3^2 + \dot{x}_4^2 + 2\dot{x}_3\dot{x}_4\cos 30^\circ .$$

Поскольку переносное движение катка 4 поступательное, угловая скорость катка $\omega_4$ равна его угловой скорости в относительном движении $\omega_4 = \frac{V_{4r}}{r} = \frac{\dot{x}_4}{r}$.

В результате выражение кинетической энергии системы, в обобщённых скоростях имеет вид:

$$T = \frac{1}{2} m_1 V_{C_1}^2 + \frac{1}{2} J_{C_1} \omega_1^2 + \frac{1}{2} m_3 V_3^2 + \frac{1}{2} m_4 V_4^2 + \frac{1}{2} J_{C_4} \omega_4^2 =$$

$$= \frac{P}{2g}\left(\frac{27}{8}\dot{x}_3^2 + \frac{3}{2}\dot{x}_4^2 + \dot{x}_3\dot{x}_4\sqrt{3}\right).$$

Дадим системе возможное перемещение по координате $x_3$, оставляя координату $x_4$ без изменения: $\delta x_3 > 0, \delta x_4 = 0$. При таком движении системы каток 4 не скатывается по призме, а движется поступательно вместе с ней. В этом случае работа сил тяжести катков 1, 4 и призмы равна нулю, так как нет вертикального перемещения точек приложения этих сил. Работу на этом перемещении будет производить только сила $\vec{F}$ и пара сил с моментом $M$, приложенная к катку 1. Суммарная элементарная работа

$$\delta A = -F\delta x_3 + M\delta\varphi_1 = \left(-F + \frac{M}{2r}\right)\delta x_3 .$$

Здесь учтено, что элементарный угол поворота катка 1 связан с перемещением призмы соотношением: $\delta\varphi_1 = \frac{\delta x_3}{2r}$. Отсюда обобщённая сила, соответствующая координате $x_3$: $Q_{x_3} = -F + \frac{M}{2r} = \frac{1}{2}P$.

Дадим системе другое независимое перемещение – по координате $x_4$, оставляя координату $x_3$ без изменения: $\delta x_4 > 0, \delta x_3 = 0$. При этом возможном перемещении вся система стоит, кроме катка 4, который скатывается по наклонной поверхности призмы. При таком движении системы работу совершает только сила тяжести катка 4. Выражая элементарную работу $\delta A = P_4\delta x_4 \cos 60^\circ = \frac{1}{2}P\delta x_4$, найдём обобщённую силу, соответствующую координате $x_4$: $Q_{x_4} = \frac{1}{2}P$.

Составим уравнения Лагранжа. С этой целью вычислим необходимые производные кинетической энергии

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_3}\right) = \frac{27P}{8g}\ddot{x}_3 + \frac{P\sqrt{3}}{2g}\ddot{x}_4;\ \ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_4}\right) = \frac{3P}{2g}\ddot{x}_4 + \frac{P\sqrt{3}}{2g}\ddot{x}_3;\ \ \frac{\partial T}{\partial x_3} = 0,\ \frac{\partial T}{\partial x_4} = 0.$$

Подставляя результаты расчётов в общий вид уравнений Лагранжа, получим систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{27P}{8g}\ddot{x}_3 + \frac{P\sqrt{3}}{2g}\ddot{x}_4 = \frac{1}{2}P, \quad \frac{3P}{2g}\ddot{x}_4 + \frac{P\sqrt{3}}{2g}\ddot{x}_3 = \frac{1}{2}P$$

или

$$6{,}75\ddot{x}_3 + 1{,}73\ddot{x}_4 = g\,; \;\; 3\ddot{x}_4 + 1{,}73\ddot{x}_3 = g\,.$$

Решаем данную систему как алгебраическую относительно ускорений $\ddot{x}_3$, $\ddot{x}_4$. Получим: $\ddot{x}_3 = 0{,}07g$, $\ddot{x}_4 = 0{,}29g$.

Интегрируя дважды эти уравнения с нулевыми начальными условиями, получим закон движения призмы ($x_3 = 0{,}035gt^2$) и центра масс катка 4 относительно призмы ($x_4 = 0{,}145gt^2$). Движение призмы и катка 4 относительно призмы происходит в положительном направлении осей.

**Задача 74**. Механическая система состоит из трёх тел – груза 1, катка 2 и блока 3 (рис. 6.38). Невесомый стержень, соединяющий каток 2 с блоком 3, параллелен горизонтальной плоскости качения катка 2. К центру катка 2 прикреплена горизонтальная пружина, другой конец которой соединён с грузом 1. Коэффициент жесткости пружины *c*. Груз 1 весом $P_1$ движется без трения по горизонтальной поверхности. Каток 2 весом $P_2$ катится по горизонтальной поверхности без скольжения. Радиус катка 2 равен *r*. Блок 3 считать однородным диском весом $P_3$ радиуса *R*. К блоку 3 приложена пара сил с моментом *M*. Движение катка 2 блоку 3 передаётся горизонтальным невесомым стержнем. Скольжение между стержнем и дисками отсутствует. В начальный момент система находилась в покое. При этом груз 1 находился в положении, при котором пружина была растянута относительно своего недеформированного состояния на величину $\Delta l_0$.

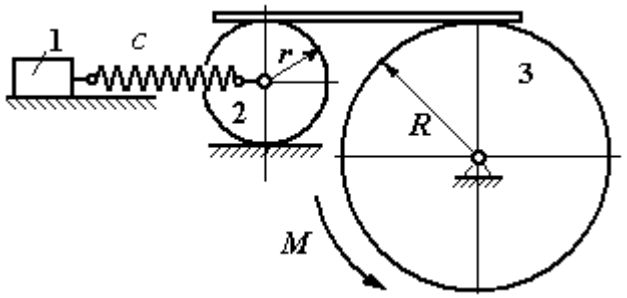


Рис. 6.38. Колебания механической системы с двумя степенями свободы

Найти закон абсолютного движения груза 1, если известно $P_1$ = 10 Н, $P_2$ = 20 Н, $P_3$ = 30 Н, $M$ = 5 Н·м, $R$ = 24 см, $c$ = 207 Н/м, $\Delta l_0$ = 5 см.

*Решение*

Рассматриваемая механическая система имеет две степени свободы. В качестве обобщенных координат выберем удлинение пружины $x_1$ относительно недеформированного состояния и угол $\varphi_3$ поворота блока 3 (рис. 6.39). При этом $x_1$ является относительной координатой движения груза, а $\varphi_3$ – абсолютной координатой вращения блока 3.

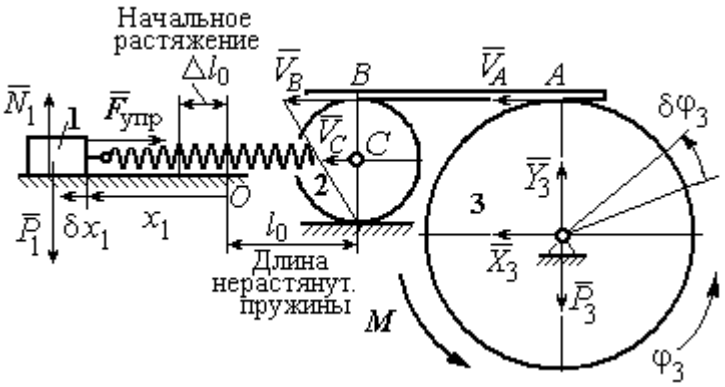



Рис. 6.39. Расчётная схема колебаний механической системы

Рассмотрим сложное движение груза 1. Относительное движение груза – это его движение на пружине в предположении, что точка крепления пружины неподвижна. Относительная скорость $V_{1r} = \dot{x}_1$. Переносное движение – это перемещение груза вместе с фиксированной длиной пружины (иначе, заменяя пружину жестким стержнем). Переносная скорость груза 1 $V_{1e} = V_C$, где $V_C$ – скорость центра масс катка 2.

На рис. 6.39 показано распределение скоростей точек катка 2, откуда следует: $V_C = \frac{1}{2} V_B$. Имеем: $V_B = V_A = \omega_3 R = \dot{\varphi}_3 R$ и $V_C = \frac{1}{2}\dot{\varphi}_3 R$.

Для того чтобы найти модуль абсолютной скорости груза 1, спроектируем векторное равенство теоремы сложения скоростей $\vec{V}_1 = \vec{V}_{1r} + \vec{V}_{1e}$ на горизонтальную ось. Полагая, что движение системы происходит в

положительном направлении отсчета обобщённых координат, получим: $V_1 = \dot{x}_1 + \frac{1}{2}\dot{\varphi}_3 R$.

Уравнения Лагранжа II рода, описывающие движение системы:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1}\right) - \frac{\partial T}{\partial x_1} = Q_x, \quad \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_3}\right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_3} = Q_\varphi,$$

где $T$ – кинетическая энергия системы; $Q_x$, $Q_\varphi$ – обобщенные силы, соответствующие обобщенным координатам $x_1$ и $\varphi_3$.

Вычислим кинетическую энергию системы и выразим её через обобщённые скорости.

Кинетическая энергия поступательного движения груза 1 определяется выражением $T_1 = \frac{1}{2} m_1 V_1^2$, где $V_1$ следует рассматривать как абсолютную скорость груза. Тогда $T_1 = \frac{1}{2} m_1 \left( \dot{x}_1 + \frac{1}{2}\dot{\varphi}_3 R \right)^2$. Каток 2 совершает плоскопараллельное движение. Кинетическая энергия катка $T_2 = \frac{3}{4} m_2 V_C^2$, причём $V_C = \frac{1}{2}\dot{\varphi}_3 R$. Тогда $T_2 = \frac{3}{16} m_2 \dot{\varphi}_3^2 R^2$. Кинетическая энергия вращающегося блока 3: $T_3 = \frac{1}{2} J_{3z} \omega_3^2$ , где $J_{3z}$ – осевой момент инерции блока 3, $J_{3z} = \frac{m_3 R^2}{2}$. Окончательно $T_3 = \frac{1}{4} m_3 \dot{\varphi}_3^2 R^2$.

Кинетическая энергия системы имеет вид:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 = \frac{1}{2} m_1 (\dot{x}_1 + \frac{1}{2}\dot{\varphi}_3 R)^2 + \frac{3}{16} m_2 \dot{\varphi}_3^2 R^2 + \frac{m_3 R^2}{4} \dot{\varphi}_3^2 =$$

$$= \frac{1}{2} m_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} m_1 \dot{x}_1 \dot{\varphi}_3 R + \left( \frac{1}{8} m_1 + \frac{3}{16} m_2 + \frac{1}{4} m_3 \right) \dot{\varphi}_3^2 R^2.$$

Дадим системе возможное перемещение, при котором изменяется координата груза $x_1$ ($\delta x_1 > 0$), а другая координата – угол поворота блока 3 $\varphi_3$ остаётся постоянной ($\delta\varphi_3 = 0$). В этом случае груз 1 движется горизонтально, блок 3 и каток 2 – неподвижны. При таком движении работу будет производить только упругая сила пружины.

Модуль силы упругости пружины пропорционален её растяжению и в произвольном положении груза равен: $F_{\text{упр}} = c\Delta\ell = cx_1$. Направление силы упругости противоположно растяжению (см. рис. 6.39).

Сумма элементарных работ сил на заданном перемещении системы $\delta x_1$: $\delta A = -F_{\text{упр}}\delta x_1 = -cx_1\delta x_1$. Отсюда обобщенная сила $Q_x$, соответствующая координате $x_1$: $Q_x = -cx_1 = -207x_1$ Н.

Дадим системе другое возможное перемещение, при котором пружина не растягивается: $\delta x_1 = 0$, а блок 3 повернулся на угол $\delta\varphi_3$: $\delta\varphi_3 > 0$. В этом случае пружина рассматривается как жёсткий стержень, связывающий груз 1 с центром масс катка 2. В результате при повороте блока 3 груз 1 и точка *C* движутся одинаково в горизонтальном направлении. На этом перемещении системы работу совершает только пара сил с моментом *M*, приложенная к блоку 3. Имеем $\delta A = M\delta\varphi_3$, и, следовательно, обобщённая сила $Q_\varphi = M = 5$ Н·м.

Составим уравнения Лагранжа, для чего вычислим производные от кинетической энергии по обобщенным скоростям и координатам:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} = m_1\dot{x}_1 + \frac{1}{2}m_1R\dot{\varphi}_3;\ \ \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_3} = \frac{1}{2}m_1R\dot{x}_1 + \left(\frac{1}{4}m_1 + \frac{3}{8}m_2 + \frac{1}{2}m_3\right)\dot{\varphi}_3R^2;$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_1} = 0,\ \ \frac{\partial T}{\partial \varphi_3} = 0.$$

Полные производные по времени:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1}\right) = m_1\ddot{x}_1 + \frac{1}{2}m_1R\ddot{\varphi}_3;\ \ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_3}\right) = \frac{1}{2}m_1R\ddot{x}_1 + \left(\frac{1}{4}m_1 + \frac{3}{8}m_2 + \frac{1}{2}m_3\right)\ddot{\varphi}_3R^2.$$

Приравнивая полные производные обобщённым силам, получим уравнения Лагранжа окончательно в виде системы алгебраических уравнений относительно ускорений $\ddot{x}_1$ и $\ddot{\varphi}_3$:

$$1{,}02\ddot{x}_1 + 0{,}12\ddot{\varphi}_3 = -207x_1;\ \ 0{,}12\ddot{x}_1 + 0{,}15\ddot{\varphi}_3 = 5.$$

Разрешая систему относительно ускорения $\ddot{x}_1$, получим уравнение относительных колебаний груза:

$$\ddot{x}_1 + 225x_1 = -4{,}35.$$

Решение линейного неоднородного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами представляется в виде суммы общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного: $x_1 = x_{\text{одн}} + x_{\text{частн}}$.

Общее решение однородного уравнения $x_{\text{одн}} = C_1 \sin kt + C_2 \cos kt$, где $C_1$, $C_2$ – произвольные постоянные; $k$ – круговая частота собственных колебаний груза 1, $k = \sqrt{225} = 15$ рад/с. Частное решение неоднородного уравнения ищется в виде константы $x_{\text{част}} = b$. Подставив его в уравнение колебаний, получим: $b$ = – 0,02.

Таким образом, общее решение неоднородного уравнения

$$x_1(t) = C_1 \sin 15t + C_2 \cos 15t - 0{,}02.$$

Начальная координата $x_{01}$ груза 1 определяется из условия, что в начальный момент времени при $t = 0$ груз находился в положении, при котором пружина была растянута относительно своего недеформированного состояния на расстояние $\Delta l_0$ = 0,05 м. Следовательно, $x_{01} = 0{,}05$. Подставляя значение начальной координаты в общее решение неоднородного уравнения при $t = 0$, получим: $C_2 = 0{,}07$.

Относительная скорость груза 1 в любой момент времени: $\dot{x}_1(t) = C_1 15\cos 15t - C_2 15\sin 15t$. По условию задачи начальная скорость груза 1 $\dot{x}_1(0) = 0$. После подстановки начального условия в выражение для скорости груза 1 получим: $C_1 = 0$.

Окончательно уравнение относительного движения груза 1:

$$x_1(t) = 0{,}07\cos 15t - 0{,}02 \text{ м}.$$

Найдём уравнение вращательного движения блока 3. Для этого в дифференциальное уравнение $0{,}12\ddot{x}_1 + 0{,}15\ddot{\varphi}_3 = 5$ подставим значение второй производной решения относительных колебаний груза 1. Получим: $\ddot{\varphi}_3 = 33{,}33 + 12{,}6\cos 15t$. Полагая $\ddot{\varphi}_3 = \dfrac{d\omega_3}{dt}$, получим дифференциальное уравнение первого порядка: $\dfrac{d\omega_3}{dt} = 33{,}33 + 12{,}6\cos 15t$, откуда найдём угловую скорость блока 3: $\omega_3 = 33{,}33t + 0{,}84\sin 15t + C_3$.

Аналогично, положив $\omega_3 = \dfrac{d\varphi_3}{dt}$, найдём закон вращательного движения блока 3: $\varphi_3 = 16{,}665t^2 - 0{,}056\cos 15t + C_3 t + C_4$.

Начальные условия движения блока: при $t = 0$, $\varphi_3(0) = 0$, $\omega_3(0) = 0$. Подставляя начальные условия в уравнения движения, получим: $C_4 = 0{,}056$, $C_3 = =0$.

Окончательно уравнение вращательного движения блока 3:

$$\varphi_3 = 16{,}665t^2 - 0{,}056\cos 15t + 0{,}056.$$

Абсолютное движение $s_1$ груза 1 представляется суммой относительного и переносного движений:

$$s_1 = x_1 + S_C = x_1 + \frac{1}{2}R\varphi_3 = 2t^2 - 0{,}06\cos 15t - 0{,}01.$$

## Упражнения

Упражнение 6.6. Каток весом $P_1 = 2P$, радиуса $r$, движущийся без проскальзывания по вертикальной стене, удерживается вертикальной пружиной жесткостью $C = 4P/r$, прикреплённой одним концом к центру катка, другим – к неподвижной поверхности (рис. 6.40). К нити, намотанной на барабан катка, подвешен груз 2 весом $P_2 = P$. На груз действует сила $F = P$, к катку приложена пара сил с моментом $M = Pr$.

Найти закон движения груза 2 и максимальное растяжение пружины, если движение системы началось из состояния покоя при недеформированной пружине.

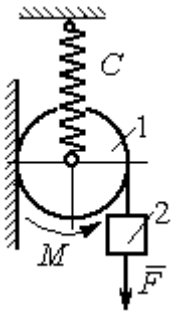


Рис. 6.40. Схема движения катка

Упражнение 6.7. Грузы 1 и 2 весом $P_1 = 20$ Н и $P_2 = 30$ Н привязаны к нерастяжимой нити. Нить переброшена через неподвижные блоки $B$ и $D$ и охватывает снизу подвижный блок 3 весом $P_3 = 40$ Н (рис. 6.41).

Определить ускорения грузов 1 и 2 и центра масс блока 3. Весом нити и неподвижных блоков $B$ и $D$ пренебречь.

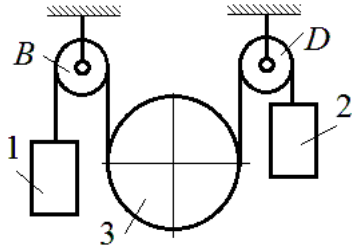


Рис. 6.41. Механическая система с двумя степенями свободы

Упражнение 6.8. Каток 1, радиуса $r$ весом $P$ катится по горизонтальной поверхности. К катку приложена пара сил с моментом $M = 2Pr$. Каток передаёт движение невесомой тележке (см. рис. 6.42). В кузове тележки находится каток 2 такого же радиуса $r$ и веса $P$, который движется по горизонтальной поверхности кузова под действием силы $F = P$, приложенной в центре катка. Найти закон движения центра катка 2 относительно тележки, если движение системы началось из состояния покоя.

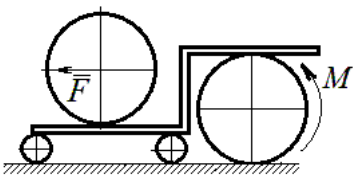


Рис. 6 42. Движение катка в кузове тележки

# 7. ОТВЕТЫ И КРАТКИЕ ПОЯСНЕНИЯ

## 7.1. Ответы к упражнениям главы 1

**1.1**

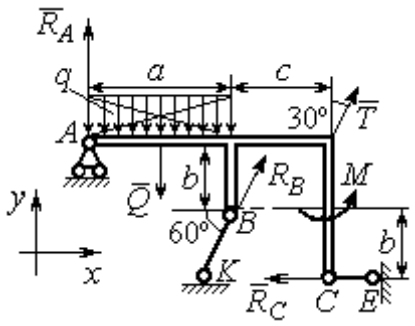



Рис. 7.1. Расчётная схема к упражнению 1.1

$T = 15$ кН, $Q = 15$ кН.

$$R_B\cos 60^\circ + T\cos 60^\circ - R_C = 0;$$

$$R_A - Q + R_B\cos 30^\circ + T\cos 30^\circ = 0;$$

$$-Q\cdot\frac{a}{2} + R_B\cos 30^\circ\cdot a + R_B\cos 60^\circ\cdot b + T\cos 30^\circ\cdot(a+c) + + M - R_C\cdot 2b = 0.$$

$R_B = -3{,}8$ кН, $R_C = 5{,}6$ кН, $R_A = 5{,}3$ кН.

**1.2**

$Q = 9$ кН. $T = 2$ кН.

$$X_A + T\cos 30^\circ + Q\cos 30^\circ = 0;$$

$$Y_A - Q\cos 60^\circ + R_B - T\cos 60^\circ - F = 0;$$

$$-Q\cdot\frac{c}{2} + R_B(b + c\cos 60^\circ) - Fc\cos 60^\circ + M -$$

$$-T\cos 60^\circ(b + c\cos 60^\circ) - T\cos 30^\circ(a + c\sin 60^\circ) = 0.$$

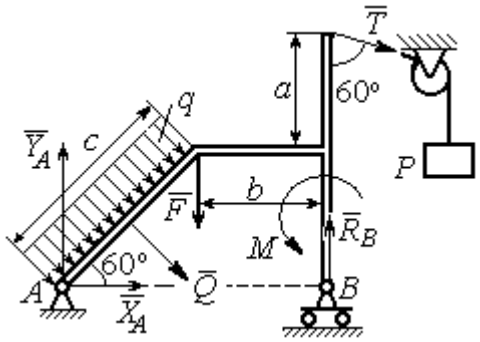



Рис. 7.2. Расчётная схема к упражнению 1.2

$R_B = 10{,}02$ кН, $X_A = -9{,}53$ кН, $Y_A = -0{,}52$ кН.

**1.3**

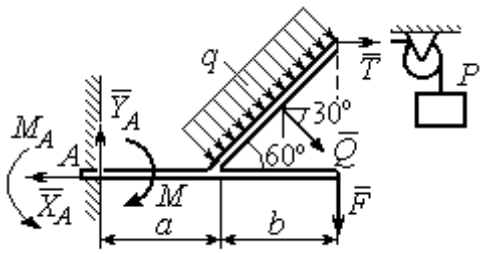



Рис. 7.3. Расчётная схема к упражнению 1.3

$Q = 8$ кН. $T = 3$ кН.

$$-X_A + T + Q\cos 30^\circ = 0;$$

$$Y_A - Q\cos 60^\circ - F = 0;$$

$$-T\,2b\cos 30^\circ - F(a+b) + M_A - M -$$

$$-Q\cos 60^\circ\left(a + \frac{b}{2}\right) - Q\cos 30^\circ\left(b\cos 30^\circ\right) = 0.$$

$M_A = 18{,}61$ кН·м, $X_A = 9{,}93$ кН, $Y_A = 6$ кН.

**1.4**

$Q = 6{,}93$ кН, $T = 2$ кН.

$$-X_B - T + Q\cos 30^\circ + F\cos 60^\circ = 0;$$

$$R_A - Q\cos 60^\circ + Y_B - F\cos 30^\circ = 0;$$

$$-\frac{Qa}{2\cos 30^\circ} + Y_B\left(b + \frac{a}{2\cos 30^\circ}\right) + Ta - Fa\cos 60^\circ -$$

$$-F\cos 30^\circ\left(b + \frac{a}{2\cos 30^\circ}\right) + M = 0.$$

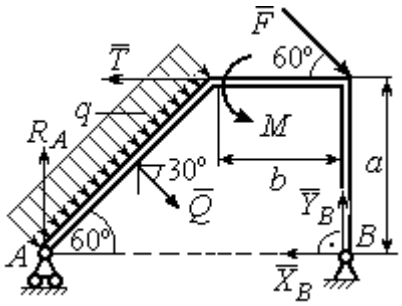



Рис.7.4. Расчётная схема к упражнению 1.4

$R_A = 0{,}72$ кН, $X_B = -5{,}5$ кН, $Y_B = 5{,}34$ кН.

**1.5**

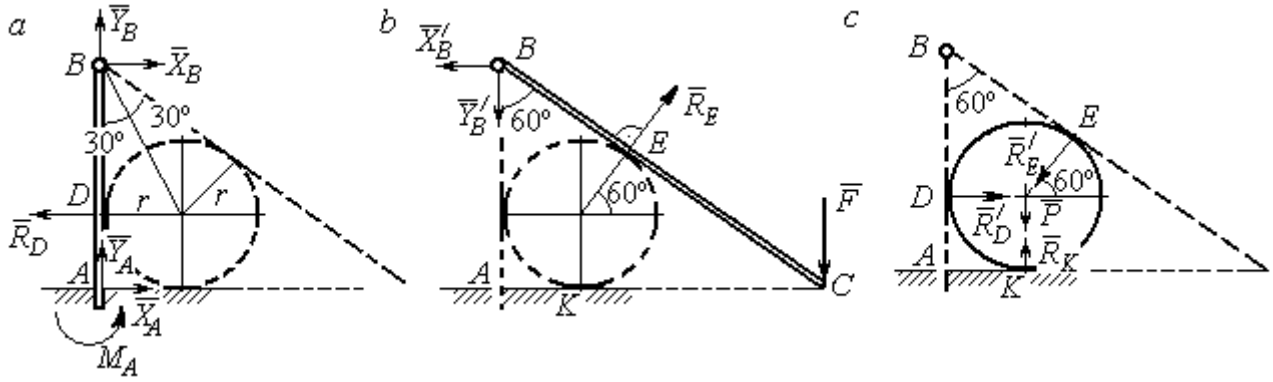



Рис. 7.5. Расчётные схемы к упражнению 1.5:
*a* – равновесие балки *AB*; *b* – равновесие балки *BC*; *c* – равновесие шара

$X_B = X'_B$, $Y_B = Y'_B$, $R_D = R'_D$, $R_E = R'_E$.

Балка *AB*. $AB = r + BD = r + r\operatorname{ctg}30^\circ = 2{,}73$ м.

$$X_A - R_D + X_B = 0,\ Y_A + Y_B = 0,\ M_A + R_D \cdot r - X_B \cdot AB = 0.$$

Балка $BC$. $BE = BD$ = 1,73 м. $AC = BC\cos 30^\circ = 2AB\cos 30^\circ$ = 4,73 м.

$$R_E\cos 60^\circ - X'_B = 0,\ RE\sin 60\circ - Y'B - F = 0,\ R_E \cdot BE - F \cdot AC = 0.$$

Шар.

$$R'_D - R'_E\cos 60^\circ = 0,\ R_K - P - R'_E\cos 30^\circ = 0.$$

$R_E$ = 21,87 кН, $Y_B$ = 10,94 кН, $X_B$ = 10,94 кН, $R_D$ = 10,94 кН;

$R_K$ = 20,94 кН, $X_A$ = 0, $Y_A$ = – 10,94 кН, $M_A$ = 18,93 кН·м.

**1.6**

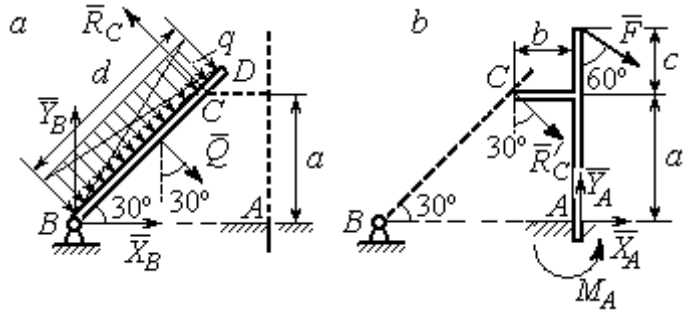



Рис. 7.6. Расчётные схемы к упражнению № 1.6:
*a* – равновесие балки *BD*; *b* – равновесие балки *AC*

Балка $BD$. $Q$ = 15 кН.

$$X_B + Q\cos 60^\circ - R_C\cos 30^\circ = 0;$$

$$Y_B - Q\cos 30^\circ + R_C\cos 60^\circ = 0;$$

$$-Q\frac{d}{2} + R_C 2a = 0.$$

Балка $AC$. $R_C = R'_C$.

$$X_A + R'_C\cos 60^\circ + F\cos 30^\circ = 0,\ Y_A - R'_C\cos 30^\circ - F\cos 60^\circ = 0;$$

$$M_A - R'_C\cos 60^\circ \cdot a + R'_C\cos 30^\circ \cdot b - F\cos 30^\circ(a + c) = 0.$$

$X_B$ = 0,61 кН, $Y_B$ = 8,3 кН, $R_C$ = 9,37 кН;

$X_A$ = – 8,15 кН, $Y_A$ = 10,11 кН, $M_A$ = 11,65 кН·м.

**1.7**

Балка $AB$. $Q_1$ = 6 кН.

$T = P$ = 3 кН.

$$X_A + R_B - T\cos 60^\circ + F = 0;$$

$$Y_A - Q_1 - T\cos 30^\circ = 0;$$

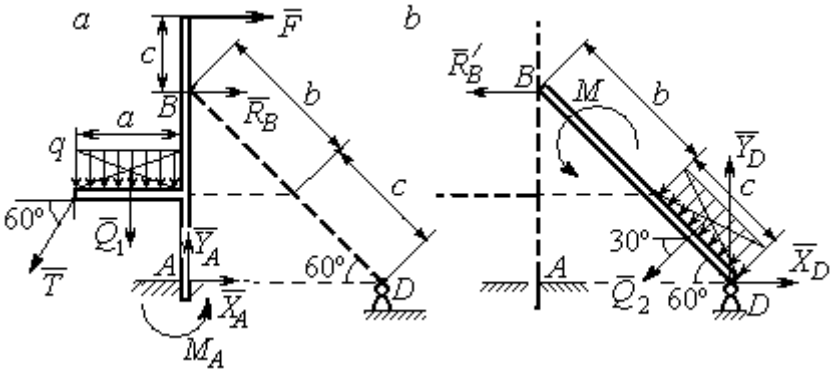



Рис. 7.7. Расчётные схемы к упражнению 1.7:
*a* – равновесие балки *AB*; *b* – равновесие балки *BD*

$$M_A - R_B(b+c)\cos 30^\circ + Q_1\frac{a}{2} +$$

$$+ T\cos 30^\circ a + T\cos 60^\circ c\cos 30^\circ -$$

$$- F\left[c + (b+c)\cos 30^\circ\right] = 0.$$

Балка $DB$. $Q_2 = 3$ кН. $R'_B = R_B$.

$$X_D - R'_B - Q_2\cos 30^\circ = 0,\ Y_D - Q_2\cos 60^\circ = 0,\ M + R'_B(b+c)\cos 30^\circ + Q_2\frac{c}{2} = 0.$$

$X_A = -1{,}49$ кН, $Y_A = 8{,}6$ кН, $M_A = 8{,}86$ кН, $R_B = -1{,}01$ кН;

$X_D = 1{,}59$ кН, $Y_D = 1{,}5$ кН.

**1.8**

Шар.

$$R_B\cos 60^\circ - R_D\cos 60^\circ = 0;$$

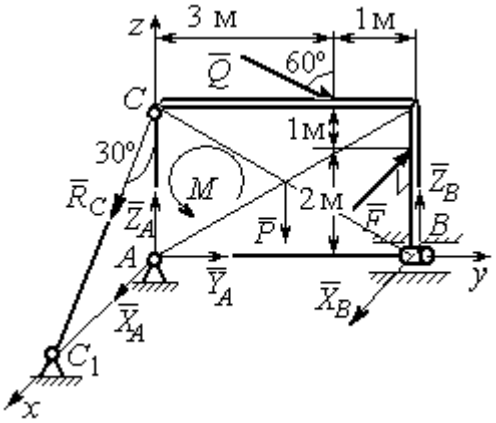



Рис. 7.9. Расчётная схема к упражнению 1.9

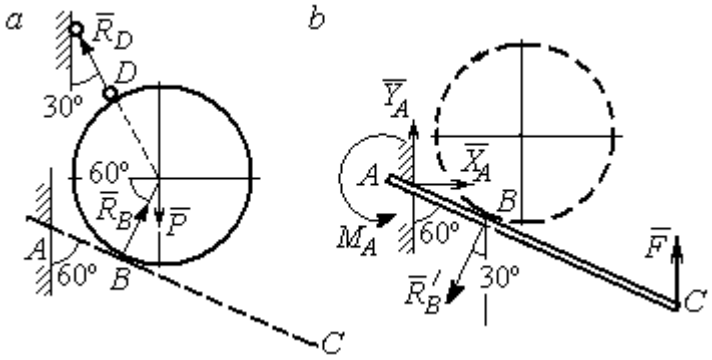



Рис. 7.8. Расчётные схемы к упражнению 1.8: *a* – равновесие шара; *b* – равновесие балки $AC$

$$R_B\cos 30^\circ + R_D\cos 30^\circ - P = 0.$$

Балка $AC$. $R'_B = R_B$.

$$X_A - R'_B\cos 60^\circ = 0;\ Y_A - R'_B\cos 30^\circ + F = 0;$$

$$M_A - R'_B AB + F\cdot AC\cos 30^\circ = 0.$$

$X_A = 2{,}89$ кН, $Y_A = 0$ кН, $M_A = -11{,}55$ кН·м, $R_B = 5{,}77$ кН, $R_D = 5{,}77$ кН.

**1.9**

$$X_A + R_C\cos 60^\circ + X_B - F = 0;\ Y_A + Q\cos 30^\circ = 0;$$

$$Z_A - R_C\cos 30^\circ - Q\cos 60^\circ + Z_B - P = 0;$$

$$M - Q\cos 60^\circ\cdot 3 - Q\cos 30^\circ\cdot 3 + Z_B\cdot 4 - P\cdot 2 = 0;$$

$$R_C\cos60^\circ\cdot 3 - F\cdot 2 = 0,\ -X_B\cdot 4 + F\cdot 4 = 0.$$

$$X_A = 5{,}34 \text{ кН},\ Y_A = 2{,}6 \text{ кН};$$

$$Z_A = 8{,}92 \text{ кН},\ R_C = 10{,}67 \text{ кН};$$

$$X_B = 8 \text{ кН},\ Z_B = 3{,}82 \text{ кН}.$$

**1.10**

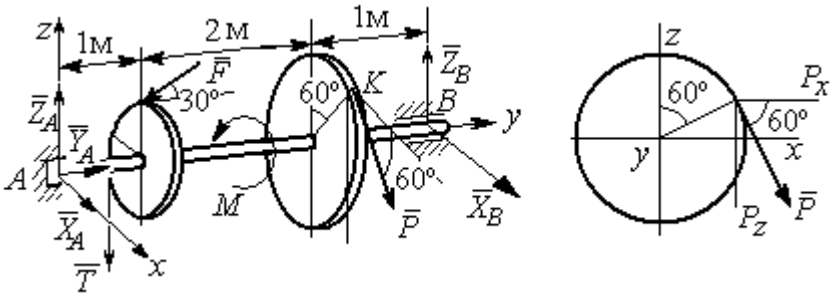



Рис. 7.10. Расчётные схемы к упражнению 1.10

$T = Q = 3$ кН.

$$X_A + P\cos60^\circ + X_B = 0,\ Y_A - F\cos30^\circ = 0;$$

$$Z_A - F\cos60^\circ - P\cos30^\circ - T + Z_B = 0.$$

$$-T\cdot 1 - F\cos60^\circ\cdot 1 + F\cos30^\circ\cdot r - P\cos30^\circ\cdot 3 + Z_B\cdot 4 = 0;$$

$$-Tr + PR - M = 0,\ -P\cos60^\circ\cdot 3 + X_B\cdot 4 = 0.$$

$X_A = 5{,}6$ кН, $Y_A = 3{,}46$ кН, $Z_A = 5{,}48$ кН, $P = 6{,}4$ кН, $X_B = 2{,}4$ кН, $Z_B = 5{,}06$ кН.

**1.11**

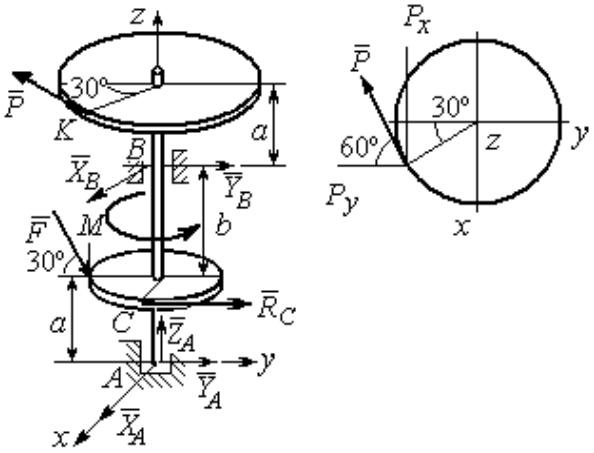



Рис. 7.11. Расчётные схемы к упражнению 1.11

$R_C = Q = 3$ кН.

$$X_A + X_B - P\cos30^\circ = 0;$$

$$Y_A + Y_B - P\cos60^\circ + R_C + F\cos30^\circ = 0;$$

$$Z_A - F\cos60^\circ = 0;$$

$$-Y_B(a+b) + P\cos60^\circ(2a+b) - R_C a - -$$

$$F\cos30^\circ\cdot a + F\cos60^\circ\cdot r = 0;$$

$$X_B(a+b) - P\cos30^\circ(2a+b) = 0;$$

$$-PR + R_C r + M = 0.$$

$X_A$ = – 1,85 кН, $Y_A$ = – 5,64 кН, $Z_A$ = 2 кН, $P$ = 6,4 кН, $X_B$ = 7,39 кН, $Y_B$ = 2,38кН.

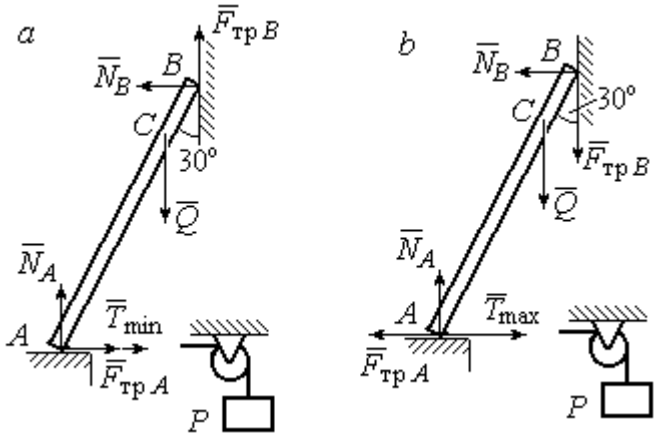



Рис. 7.13. Расчётные схемы к упражнению 1.13:
*a* – расчёт минимального веса груза;
*b* – расчёт максимального веса груза

**1.12**

$$T = Q = 3 \text{ кН}.$$

$$X_A + T + X_D = 0;$$

$$Y_A - F + P\cos 60^\circ = 0,$$

$$Z_A + Z_D + P\cos 30^\circ = 0;$$

$$Fa\sin 30^\circ + Z_D(b + 2a) + P(2b + 2a)\cos 30^\circ = 0;$$

$$Ta\sin 30^\circ - Pa\cos 30^\circ + M = 0;$$

$$-Ta - X_D(b + 2a) + Pa\cos 60^\circ + Fa\cos 30^\circ = 0.$$

$X_A$ = 0,8 кН, $Y_A$ = 2,56 кН, $Z_A$ = 1,3 кН;

$P$ = 2,89 кН, $X_D$ = 0,76 кН, $Z_D$ = – 3,80 кН.

**1.13**

Минимальный вес груза $P$:

$$T_{\min} + F_{\text{тр}A} - N_B = 0; \quad F_{\text{тр}B} + N_A - Q = 0;$$

$$F_{\text{тр}B} \cdot AB\sin 30° + N_B \cdot AB\cos 30° - Q \cdot AC\sin 30° = 0$$

Максимальный вес груза $P$:

$$T_{\max} - F_{\text{тр}A} - N_B = 0; \quad -F_{\text{тр}B} + N_A - Q = 0;$$

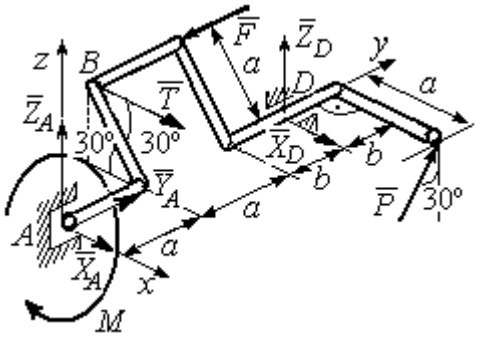



Рис. 7.12. Расчётная схема к упражнению 1.12

$$-F_{\text{тр}B} \cdot AB\sin 30° + N_B \cdot AB\cos 30° - Q \cdot AC\sin 30° = 0;$$

$$F_{\text{тр}A} = f N_A, \quad F_{\text{тр}B} = f N_B.$$

$$T_{\min} = 31.77 \text{ Н} < P < T_{\max} = 130{,}51 \text{ Н}.$$

**1.14**

Шкив. $T = T_1 = Q$.

$$T \cdot R - T_1 r + M - F_{\text{тр}} R = 0.$$

$$F_{\text{тр}} = 266{,}67 \text{ Н};$$

$$N = \frac{F_{\text{тр}}}{f} = 666{,}67 \text{ Н}.$$

Рычаг. $N = N'$. $F_{\text{тр}} = F'_{\text{тр}}$.

$$P(a+b) - N' \cdot b + F'_{\text{тр}} c = 0.$$

$$P = 320 \text{ Н}.$$

$$-X_A - P + N' = 0;$$

$$Y_A - F'_{\text{тр}} = 0.$$

$X_A$=346,67 Н, $Y_A$=266,67 Н.

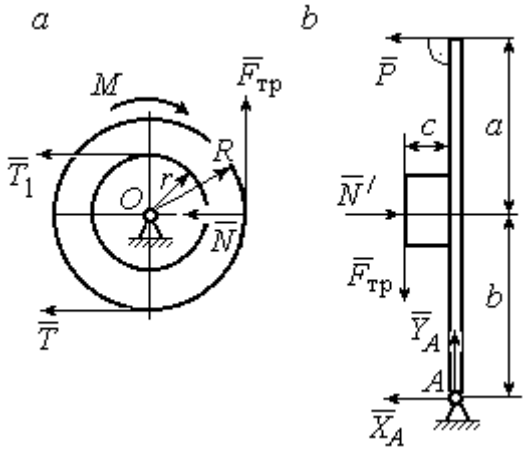



Рис. 7.14. Расчётные схемы к упражнению 1.14: *a* – равновесие шкива; *b* – равновесие рычага

$$\omega_{3z} = \omega_{1z} \frac{R_1}{r_2} \frac{R_2}{R_3} = \left(3 + \pi \cos\frac{\pi t}{2}\right)\frac{4}{3};$$

$$\omega_3(1) = |\omega_{3z}(1)| = 4 \text{ рад/с}.$$

## 7.2. Ответы к упражнениям главы 2

**2.1**

$$\omega_{1z} = \dot{\varphi}_1 = 3 + \pi \cos\frac{\pi t}{2},\ \omega_1(1) = |\omega_{1z}(1)| = 3$$

рад/с.

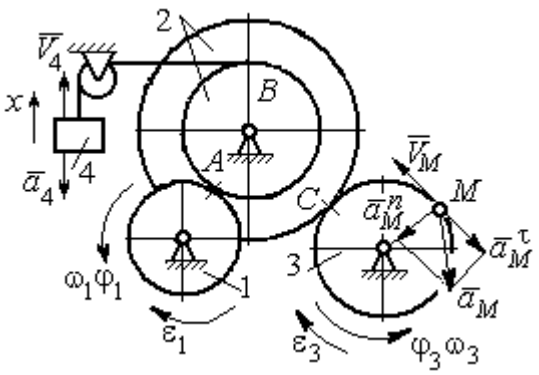



Рис. 7.15. Расчётная схема к упражнению 2.1

$$V_M(1) = \omega_3(1) R_3 = 40 \text{ см/с}.$$

$$\varepsilon_{3z} = \dot{\omega}_{3z} = -\frac{2\pi^2}{3}\sin\frac{\pi t}{2}, \quad \varepsilon_{3z}(1) = -\frac{2\pi^2}{3};$$

$$\varepsilon_3(1) = |\varepsilon_{3z}(1)| = \frac{2\pi^2}{3} = 6{,}58 \text{ рад/с}^2.$$

$\bar{a}_M = \bar{a}_M^n + \bar{a}_M^\tau$, $a_M^n(1) = \omega_3^2(1)R_3 = 160$ см/с$^2$, $a_M^\tau(1) = \varepsilon_3(1)R_3 = 65{,}8$ см/с$^2$.

$$a_M(1) = 173 \text{ см/с}^2.$$

$$V_{4x} = V_A = \omega_{1z}R_1 = \left(3 + \pi\cos\frac{\pi t}{2}\right)8; \quad V_4(1) = |V_{4x}(1)| = 24 \text{ см/с}.$$

$$\dot{V}_{4x} = -4\pi^2\sin\frac{\pi t}{2}, \; \dot{V}_{4x}(1) = -4\pi^2; \; a_4(1) = |\dot{V}_{4x}(1)| = 39{,}48 \text{ см/с}^2.$$

**2.2**

$$V_{4x} = \dot{x}_4 = 1 - \frac{\pi}{3}\cos\frac{\pi t}{3} - \frac{\pi}{3}\sin\frac{\pi t}{3};$$

$$V_{4x}(3) = 2{,}05 \text{ м/с}, \; V_4 = |V_{4x}(3)|$$

$$\omega_{3z} = \frac{V_{4x}}{r_3} = \frac{1}{r_3}\left(1 - \frac{\pi}{3}\cos\frac{\pi t}{3} - \frac{\pi}{3}\sin\frac{\pi t}{3}\right);$$

$$\omega_{3z}(3) = 6{,}83 \text{ рад/с}; \; \omega_3 = |\omega_{3z}(3)|.$$

$$\varepsilon_{3z} = \dot{\omega}_{3z} = \frac{1}{r_3}\left(\frac{\pi^2}{9}\sin\frac{\pi t}{3} - \frac{\pi^2}{9}\cos\frac{\pi t}{3}\right).$$

$$\varepsilon_{3z}(3) = 3{,}65 \text{ рад/с}^2; \; \varepsilon_3 = |\varepsilon_{3z}(3)|.$$

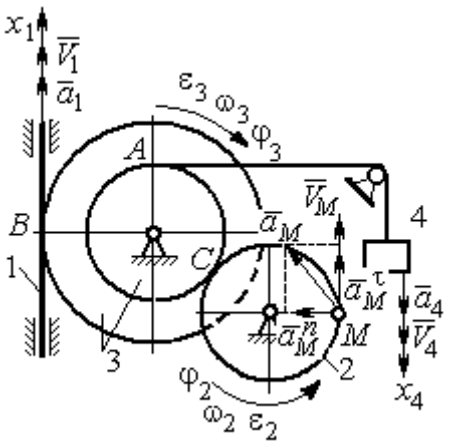


Рис. 7.16. Расчётная схема к упражнению 2.2

$$\frac{\omega_3}{\omega_2} = \frac{R_2}{r_3}; \; \omega_2 = \omega_3\frac{r_3}{R_2} = 10{,}25 \text{ рад/с}; \; V_M = \omega_2 R_2 = 2{,}05 \text{ м/с}.$$

$$\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_2} = \frac{R_2}{r_3}; \; \varepsilon_2 = \varepsilon_3\frac{r_3}{R_2} = 5{,}47 \text{ рад/с}^2.$$

$$a_M^n = \omega_2^2 R_2 = 20{,}4 \text{ м/с}^2; \; a_M^\tau = \varepsilon_2 R_2 = 1{,}09 \text{ м/с}^2.$$

$$a_M = \sqrt{\left(a_M^n\right)^2 + \left(a_M^\tau\right)^2} = 20{,}43 \text{ м/с}^2.$$

$$V_1 = \omega_3 R_3 = 2{,}73 \text{ м/с}; \; a_1 = \dot{V}_1 = \dot{\omega}_3 R_3 = \varepsilon_3 R_3 = 2{,}19 \text{ м/с}^2.$$

**2.3**

$BP_2 = BC\cos 30° = 4{,}33$ см; $CP_2 = 2{,}5$ см.

$$\omega_{BC} = \frac{V_B}{BP_2} = 1{,}15 \text{ рад/с};\quad V_C = \omega_{BC} CP_2 = 2{,}87 \text{ см/с};$$

$$\omega_1 = \frac{V_C}{CP_1} = 0{,}72 \text{ рад/с};\quad EP_1 = 2R_1\cos 30^\circ = 3{,}46 \text{ см};$$

$$V_E = \omega_1 EP_1 = 2{,}49 \text{ см/с};\quad EP_3 = 2AE\cos 30^\circ = 10{,}39 \text{ см};$$

$$\omega_{AE} = \frac{V_E}{EP_3} = 0{,}24 \text{ рад/с};\quad EA = AP_3;$$

$$V_A = \omega_{AE} AP_3 = 1{,}44 \text{ см/с},\quad \omega_{AO} = \frac{V_A}{AO} = 0{,}24 \text{ рад/с}.$$

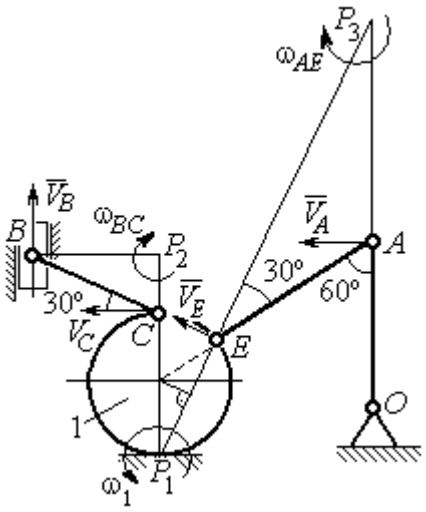



Рис. 7.17. Расчётная схема к упражнению 2.3

**2.4**

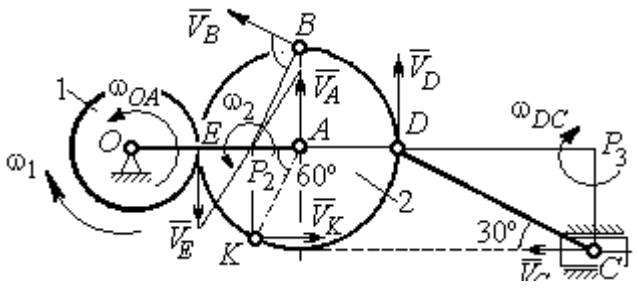



Рис. 7.18. Расчётная схема к упражнению 2.4

$E$ – точка касания дисков.

$$V_E = \omega_1 r_1 = 18 \text{ см/с}.$$

$$V_A = \omega_{OA}(r_1 + r_2) = 18 \text{ см/с}.$$

$$EP_2 = P_2A = 3 \text{ см},\ \omega_2 = \frac{V_E}{EP_2} = 6 \text{ рад/с}.$$

$$V_K = \omega_2 P_2 K = 31{,}18 \text{ см/с}.$$

$$V_B = \omega_2 P_2 B = 40{,}25 \text{ см/с};\ V_D = \omega_2 P_2 D = 54 \text{ см/с}.$$

$$DC = 2r_2,\ \omega_{DC} = \frac{V_D}{DP_3} = 5{,}197 \text{ рад/с};\ V_C\cos 30^\circ = V_D\cos 60^\circ,\ V_C = 31{,}18 \text{ см/с}.$$

**2.5**

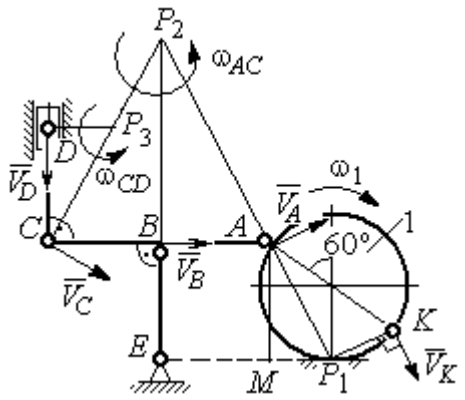



Рис. 7. 19. Расчётная схема к упражнению 2.5.

$$BE = 1{,}5R_1;\ R_1 = 2{,}67 \text{ см}.$$

$$KP_1 = R_1;\ \omega_1 = \frac{V_K}{KP_1} = 0{,}75 \text{ рад/с}.$$

$$AP_1 = \frac{AM}{\cos 30^\circ} = 4{,}62 \text{ см};\ V_A = \omega_1 P_1 A = 3{,}46 \text{ см/с}.$$

$$AP_2 = 2AB = 8 \text{ см};\ \omega_{AC} = \frac{V_A}{AP_2} = 0{,}43 \text{ рад/с}.$$

$$V_B \cos 0^\circ = V_A \cos 30^\circ;\ V_B = 2{,}99 \text{ см/с}.$$

$$\omega_{BE} = \frac{V_B}{BE} = 0{,}75 \text{ рад/с};\ V_C = V_A = 3{,}46 \text{ см/с};\ CP_3 = \frac{DC}{\cos 30^\circ} = 4{,}62 \text{ см};$$

$$\omega_{CD} = \frac{V_C}{CP_3} = 0{,}75 \text{ рад/с};\ V_D \cos 0^\circ = V_C \cos 60^\circ;\ V_D = 1{,}73 \text{ см/с}.$$

**2.6**

$$V_A = \omega_{OA} \cdot OA = 12 \text{ см/с};\ \omega_{AD} = 0,\ V_D = V_A.$$

$$\omega_{O_1C} = \frac{V_D}{DO_1} = 3 \text{ рад/с};$$

$$V_C = \omega_{O_1C} \cdot O_1C = 48 \text{ см/с}.$$

$$CB = CP = 16 \text{ см};\ \omega_{CB} = \omega_{CL} = \frac{V_C}{CP} = 3 \text{ рад/с}.$$

$$PL = \frac{CP}{\cos 30^\circ} = 18{,}48 \text{ см};\ PB = 2BC\cos 30^\circ.$$

$$V_L = \omega_{CL} \cdot PL = 55{,}44 \text{ см/с};$$

$$V_B = \omega_{CB} \cdot PB = 83{,}13 \text{ см/с}.$$

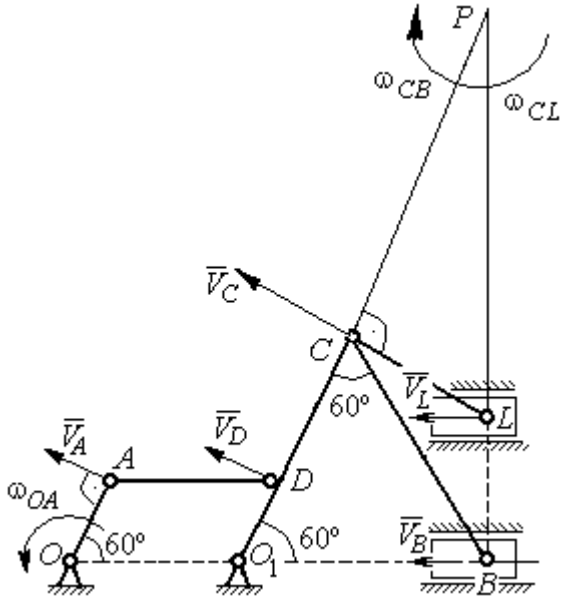



Рис. 7.20. Расчётная схема к упражнению 2.6.

**2.7**

$V_D = \omega_1 R_1 = 30$ см/с; $V_A = \omega_{OA} \cdot OA = 15$ см/с.

$$\omega_2 = \frac{V_A}{AP_2} = 3 \text{ рад/с.}$$

$$V_B = \omega_2 \cdot P_2 B = 21{,}21 \text{ см/с.}$$

$$V_C \cos 0^\circ = V_B \cos 45^\circ;\ V_C = 15 \text{ см/с.}$$

$$CP_3 = CB;\ \omega_{BC} = \frac{V_C}{CP_3} = 1{,}87 \text{ рад/с.}$$

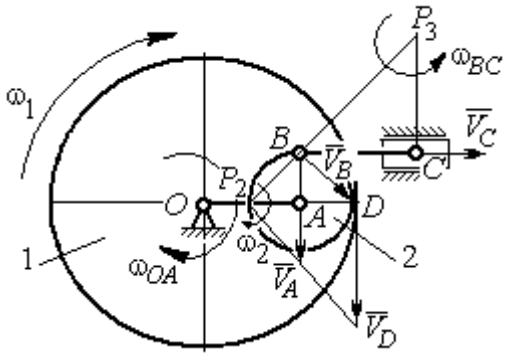



Рис. 7.21. Расчётная схема к упражнению 2.7

**2.8**

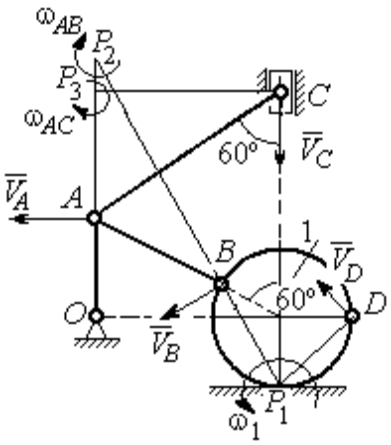



Рис. 7.22. Расчётная схема к упражнению 2.8

$AC = AB + R_1 = 12$ см; $CP_3 = AC \cos 30^\circ = 10{,}39$ см.

$$\omega_{AC} = \frac{V_C}{CP_3} = 0{,}48 \text{ рад/с;}\ V_A = \omega_{AC} \cdot AP_3 = 2{,}89 \text{ см/с.}$$

$$AB = AP_2;\ \omega_{AB} = \frac{V_A}{AP_2} = 0{,}29 \text{ рад/с.}$$

$$BP_2 = 2AB \cos 30^\circ = 17{,}32 \text{ см.}$$

$$V_B = \omega_{AB} BP_2 = 5{,}02 \text{ см/с.}$$

$$OA = (AB + R_1)\sin 30^\circ = 6 \text{ см;}\ \omega_{OA} = \frac{V_A}{AO} = 0{,}48 \text{ рад/с.}$$

$$BP_1 = 2R_1 \cos 30^\circ = 3{,}46 \text{ см;}\ \omega_1 = \frac{V_B}{BP_1} = 1{,}45 \text{ рад/с.}$$

$$DP_1 = R_1\sqrt{2} = 2{,}82 \text{ см;}\ V_D = \omega_1 DP_1 = 4{,}09 \text{ см/с.}$$

**2.9**

$$V_A = \omega_{OA} OA = 12 \text{ см/с;}\quad AP = 2AB = 2BC \cdot \operatorname{tg} 60^\circ = 27{,}71 \text{ см.}$$

$$\omega_{AB} = \frac{V_A}{AP} = 0{,}43 \text{ рад/с;}\ V_B \cos 0^\circ = V_A \cos 30^\circ;\ V_B = 10{,}38 \text{ см/с.}$$

$$\omega_{BC} = \frac{V_B}{BC} = 1{,}29 \text{ рад/с.}$$

$$\bar{a}_B = \bar{a}_A + \bar{a}^n_{BA} + \bar{a}^\tau_{BA};\quad \bar{a}_B = \bar{a}_C + \bar{a}^n_{BC} + \bar{a}^\tau_{BC},\ a_C = 0.$$

$$\bar{a}_A = \bar{a}_O + \bar{a}^n_{AO} + \bar{a}^\tau_{AO},\ a_O = 0.$$

$$\bar{a}^n_{BC} + \bar{a}^\tau_{BC} = \bar{a}^n_{AO} + \bar{a}^\tau_{AO} + \bar{a}^n_{BA} + \bar{a}^\tau_{BA}.$$ Найти $a^\tau_{BC}$

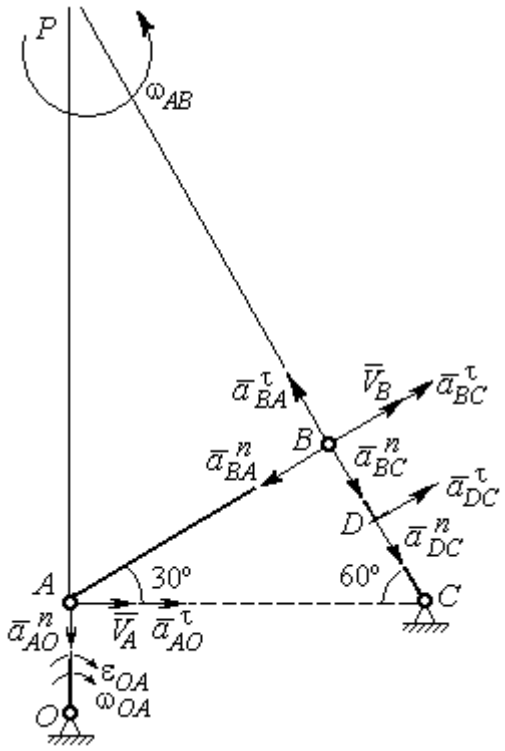



Рис. 7.23. Расчётная схема к упражнению 2.9

$$a^n_{AO} = \omega^2_{AO} \cdot AO = 36 \text{ см/с}^2;$$

$$a^\tau_{AO} = \varepsilon_{AO} \cdot AO = 8 \text{ см/с}^2;$$

$$AB = BC \cdot \text{tg}60^\circ = 13{,}86 \text{ см}.$$

$$a^n_{BA} = \omega^2_{AB} \cdot AB = 2{,}56 \text{ см/с}^2;\ \ a^\tau_{AB} = \varepsilon_{AB} AB.$$

$$a^n_{BC} = \omega^2_{BC} \cdot BC = 13{,}31 \text{ см/с}^2;\ \ a^\tau_{BC} = \varepsilon_{BC} BC.$$

Проекция на $AB$:

$$a^\tau_{BC} = -a^n_{AO}\cos 60^\circ +$$

$$+ a^\tau_{AO}\cos 30^\circ - a^n_{BA} = 13{,}63 \text{ см/с}^2.$$

$$\varepsilon_{BC} = \frac{\left|a^\tau_{BC}\right|}{BC} = 1{,}7 \text{ рад/с}^2.$$

$$\bar{a}_D = \bar{a}^n_{DC} + \bar{a}^\tau_{DC}.$$

$$a^n_{DC} = \omega^2_{BC} \cdot DC = 6{,}65 \text{ см/с}^2;\ \ a^\tau_{DC} = \varepsilon_{BC} \cdot DC = 6{,}8 \text{ см/с}^2.$$

$$a_D = \sqrt{\left(a^n_{DC}\right)^2 + \left(a^\tau_{DC}\right)^2} = 9{,}51 \text{ см/с}^2.$$

**2.10**

$$V_A = \omega_1 r_1 = 12 \text{ см/с};\ P_2A = \frac{1}{2}BC = 5 \text{ см}.$$

$$\omega_{AB} = \frac{V_A}{P_2A} = 2{,}4 \text{ рад/с}.$$

$$V_B\cos 30^\circ = V_A\cos 60^\circ;\ V_B = 6{,}93 \text{ см/с}.$$

$$P_3B = BC\cos 30^\circ = 8{,}66 \text{ см};$$

$$\omega_{BC} = \frac{V_B}{P_3B} = 0{,}8 \text{ рад/с}.$$

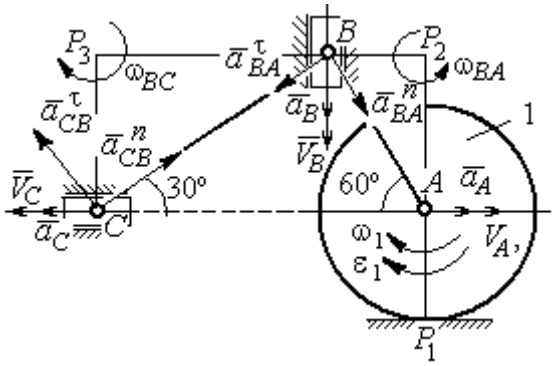



Рис. 7.24. Расчётная схема к упражнению 2.10

$$\bar{a}_B = \bar{a}_A + \bar{a}^n_{BA} + \bar{a}^\tau_{BA}.$$ Найти $a_B$.

Проекция на $BA$: $a_B\cos 30^\circ = a_A\cos 60^\circ + a_{BA}^n$.

$$a_A = a_A^\tau = \varepsilon_1 r_1 = 8 \text{ см/с}^2;\ AB = BC\operatorname{tg}30^\circ = 5{,}77 \text{ см}.$$

$$a_{BA}^n = \omega_{BA}^2 \cdot BA = 33{,}23 \text{ см/с}^2;\ \ a_B = 43{,}03 \text{ см/с}^2.$$

$$\bar{a}_C = \bar{a}_B + \bar{a}_{CB}^n + \bar{a}_{CB}^\tau.$$

Проекция на $BC$: $a_C\cos 60^\circ = a_B\cos 60^\circ - a_{CB}^n$,

$$a_{CB}^n = \omega_{CB}^2 \cdot CB = 6{,}4 \text{ см/с}^2;\ \ a_C = a_B - 2a_{CB}^n = 30{,}23 \text{ см/с}^2.$$

## 7.3. Ответы к упражнениям главы 3

**3.1**

$$CM_1 = S_r(1) = \frac{40}{3}\sin\frac{\pi}{3} = 11{,}55 \text{ см}.$$

Так как $CM_1\cos 30^\circ = 10$ см $= R$, то точка $M_1$ лежит на вертикальном диаметре.

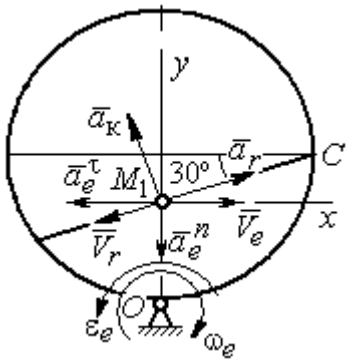


Рис. 7.25. Расчётная схема к упражнению 3.1

$$V_r = \dot{S}_r = \frac{40\pi}{9}\cos\frac{\pi t}{3};\ V_r(1) = 6{,}98 \text{ см/с}.$$

$$\omega_e(1) = 0{,}5 \text{ рад/с};\ OM_1 = R - \frac{1}{2}CM_1 = 4{,}23 \text{ см}.$$

$$V_e = \omega_e OM_1;\ \ V_e(1) = 2{,}12 \text{ см/с}.$$

$$\bar{V}_M = \bar{V}_e + \bar{V}_r.$$

$$V_{Mx} = V_e - V_r\cos 30^\circ = -3{,}93 \text{ м/с};\ V_{My} = -V_r\cos 60^\circ = -3{,}49 \text{ м/с};$$

$$V_M = \sqrt{(V_{Mx})^2 + (V_{My})^2} = 5{,}26 \text{ см/с}.$$

$$\bar{a}_M = \bar{a}_e + \bar{a}_r + \bar{a}_к.$$

$$\bar{a}_e = \bar{a}_e^n + \bar{a}_e^\tau,\ \ a_e^n = \omega_e^2 OM_1;\ \ a_e^n(1) = 1{,}06 \text{ см/с}^2.$$

$$\dot{\omega}_e = -\frac{\pi}{3}\sin\frac{\pi t}{3},\ \ \dot{\omega}_e(1) = -0{,}91 \text{ рад/с}^2;\ \ \varepsilon_e = |\dot{\omega}_e(1)| = 0{,}91 \text{ рад/с}^2,$$

$$a_e^\tau(1) = \varepsilon_e \cdot OM_1 = 3{,}85 \text{ см/с}^2.$$

$$\dot{V}_r = -\frac{40\pi^2}{27}\sin\frac{\pi t}{3},\ \dot{V}_r(1) = -12{,}66;\ a_r = \left|\dot{V}_r(1)\right| = 12{,}66\ \text{см/с}^2$$

$$a_к = 2\left|\omega_e\right| \cdot \left|V_r\right|;\ \ a_к(1) = 6{,}98\ \text{см/с}^2.$$

$$\bar{a}_M = \bar{a}_e^n + \bar{a}_e^\tau + \bar{a}_r + \bar{a}_к.$$

$$a_{Mx} = -a_e^\tau + a_r\cos 30° - a_к\cos 60° = 3{,}62\ \text{см/с}^2;$$

$$a_{My} = -a_e^n + a_r\cos 60° + a_к\cos 30° = 11{,}31\ \text{см/с}^2.$$

$$a_M = \sqrt{(a_{Mx})^2 + (a_{My})^2} = 11{,}87\ \text{см/с}^2.$$

**3.2**

Положение $M_1$:

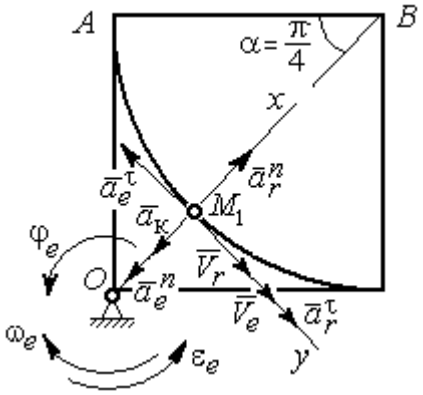



Рис. 7.26. Расчётная схема к упражнению 3.2

$$\alpha = \frac{S_r(1)}{R} = \frac{\pi}{4};\ \ OM_1 = 8{,}28\ \text{см}.$$

$$\dot{S}_r = 10\pi t;\ \ V_r = \left|\dot{S}_r(1)\right| = 31{,}42\ \text{см/с}.$$

$$\dot{\varphi}_e = 2t - 5,$$

$$\dot{\varphi}_e(1) = -3\ \text{рад/с},\ \ \omega_e = \left|\dot{\varphi}_e(1)\right| = 3\ \text{рад/с}.$$

$$V_e = \omega_e \cdot OM_1 = 24{,}6\ \text{см/с}.$$

$$\bar{V}_M = \bar{V}_e + \bar{V}_r \cdot\ V_{Mx} = V_e + V_r = 56{,}02\ \text{см/с};$$

$$V_{My} = 0;\ V_M = 56{,}02\ \text{см/с}.$$

$$\bar{a}_M = \bar{a}_e + \bar{a}_r + \bar{a}_к = \bar{a}_e^n + \bar{a}_e^\tau + \bar{a}_r^n + \bar{a}_r^\tau + \bar{a}_к.$$

$$\bar{a}_e = \bar{a}_e^n + \bar{a}_e^\tau\ \cdot\ a_e^n = \omega_e^2 \cdot OM_1 = 74{,}52\ \text{см/с}^2;$$

$$\dot{\omega}_e = 2\ \text{рад/с}^2;\ \varepsilon_e = \left|\dot{\omega}_e\right|;\ \ a_e^\tau(1) = \varepsilon_e OM_1 = 16{,}56\ \text{см/с}^2;$$

$$\bar{a}_r = \bar{a}_r^n + \bar{a}_r^\tau \cdot \dot{V}_r = 10\pi;\ a_r^\tau = \left|\dot{V}_r\right| = 10\pi = 31{,}42\ \text{см/с}^2;$$

$$a_r^n(1) = \frac{V_r^2}{R} = 49{,}36\ \text{см/с}^2;\ \ a_к = 2\left|\omega_e\right| \cdot \left|V_r\right|;\ \ a_к(1) = 62{,}84\ \text{см/с}^2.$$

$$a_{Mx} = -a_e^n + a_r^n - a_к = -88\ \text{см/с}^2;\ a_{My} = -a_e^\tau + a_r^\tau = 14{,}86\ \text{см/с}^2.$$

$$a_M = \sqrt{(a_{Mx})^2 + (a_{My})^2} = 89{,}24\ \text{см/с}^2.$$

## 7.4. Ответы к упражнениям главы 4

**4.1**

$$m\ddot{x} = F - P\cos 60° - F_{\text{тр}}, \quad m\ddot{y} = N - P\cos 30° = 0.$$

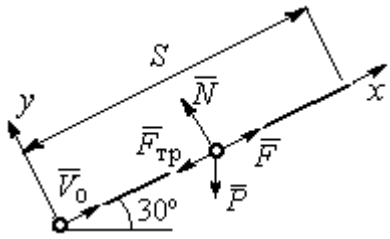



Рис. 7.27. Расчётная схема к упражнению 4.1

$$F_{\text{тр}} = fN = fmg\cos 30°;$$

$$\ddot{x} = \frac{1}{2}kt - 3{,}4, \quad \dot{x} = \frac{1}{4}kt^2 - 3{,}4t + V_0;$$

$$x = \frac{1}{12}kt^3 - 1{,}7t^2 + V_0 t.$$

Конечные условия: $t = 2$ с; $x = S = 2$ м; $V = 2V_0$.

$$V_0 = k - 6{,}8; \quad 1 = \frac{1}{3}k - 3{,}4 + V_0.$$

$$k = 8{,}4; \; V_0 = 1{,}6 \text{ м/с}.$$

**4.2**

Уравнения движения точки:

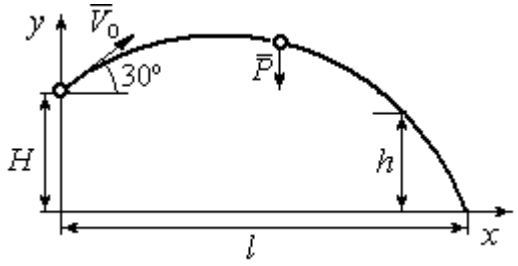



Рис. 7.28. Расчётная схема к упражнению 4.2

$$m\ddot{x} = 0; \; \dot{x} = V_0\cos 30°; \; x = V_0 t\cos 30°.$$

$$m\ddot{y} = -P; \dot{y} = -gt + V_0\cos 60°;$$

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + V_0 t\cos 60° + H.$$

Краевое условие пролёта высоты $h$:

$$t = 1 \text{ с}; \; y = h = 7 \text{ м}.$$

Подставляя краевые условия в уравнение движения, находим: $V_0 = 3{,}81$ м/с.

Краевое условие падения точки:

$$t = t_{\text{пад}}; \; x = l; \; y = 0.$$

Подстановка в уравнения движения условия приводит к системе:

$$l = V_0 t_{\text{пад}}\cos 30°; \; 0 = -\frac{1}{2}gt_{\text{пад}}^2 + V_0 t_{\text{пад}}\cos 60° + H.$$

Находим: $t_{\text{пад}} = 1{,}64$ с; $l = 5{,}41$ м.

**4.3**

Уравнение движения груза (рис. 7.29, *a*): $m\ddot{S} = -F = -k\dot{S}$.

Начальные условия: $t = 0$; $S = 0$; $\dot{S} = V_0$.

Решение: $S = \frac{mV_0}{k}\left(1 - e^{-\frac{k}{m}t}\right) = 6\left(1 - e^{-t}\right)$ м.

Скорость груза: $\dot{S} = 6e^{-t}$.

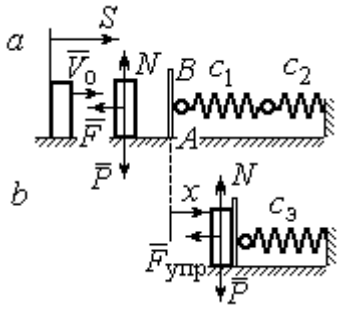



Рис. 7.29. Расчётная схема к упражнению 4.3: *a* – движение груза до начала колебаний; *b* – колебания груза

Скорость груза в момент соединения с площадкой *AB*: $V_1 = \dot{S}(1) = 0{,}21$ м/с.

Уравнение колебаний груза на эквивалентной пружине (рис. 7.29, *b*):

$$m\ddot{x} = -F_{упр} = -c_э x;\ c_э = \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2} = 30 \text{ Н/м}.$$

Начальные условия движения: $t = 0$; $x = 0$; $\dot{x} = V_1$.

Общий вид решения: $x = C_1\cos\omega t + C_2\sin\omega t$; $\omega = \sqrt{\frac{c_э}{m}} = 7{,}75$ рад/с, где константы: $C_1 = 0$; $C_2 = \frac{V_1}{\omega} = 0{,}28$ м. Закон движения груза $x = 0{,}28\sin 7{,}75t$.

Максимальное сжатие 0,28 м.

**4.4**

Жесткость эквивалентной пружины

$$c_э = \frac{c \cdot 2c}{c + 2c} = \frac{2}{3}c.$$

Уравнение колебаний:

$$m\ddot{x} = P - F_{упр} = P - c_э(\lambda_{ст} + x) = -c_э x.$$

Общее решение:

$$x = C_1\cos\omega t + C_2\sin\omega t;\ \omega = \sqrt{\frac{c_э}{m}} = 10{,}33 \text{ рад/с}.$$

Начальные условия: $t = 0$; $x = 0$; $\dot{x} = -V_0$.

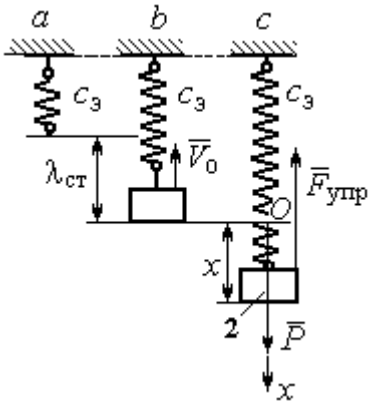



Рис. 7.30. Расчётная схема к упражнению 4.4: *a* – нерастянутая пружина; *b* – положение статического равновесия; *c* – произвольное положение груза

Находим константы интегрирования: $C_1 = 0$; $C_2 = \dfrac{V_0}{\omega} = 0{,}39$ м.

Закон движения груза: $x = 0{,}39\sin 10{,}33t$.

Амплитуда $A = 0{,}39$ м, частота $\omega = 10{,}33$ рад/с.

**4.5**

Скорость человека, находящегося в самолёте, в нижней точке траектории (точка $C$):

$$\frac{mV_C^2}{2} - \frac{mV_0^2}{2} = mg\left[l\sin\varphi + r(1-\cos\varphi)\right].$$

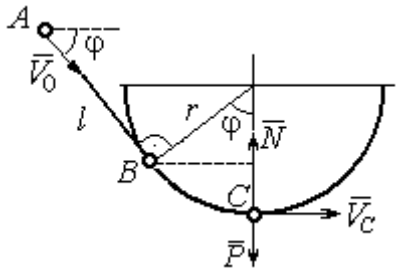


Рис. 7.31. Расчётная схема к упражнению 4.5

Откуда $V_C^2 = V_0^2 + 2g\left[l\sin\varphi + r(1-\cos\varphi)\right]$.

Уравнение движения человека, двигающегося вместе с самолётом, в проекции на нормаль в точке $C$: $\dfrac{mV_C^2}{r} = N - P$, где $N$ – реакция корпуса самолёта. Сила давления человека на корпус самолёта по величине равна реакции, но направлена в противоположную сторону.

Из условия $N \le 3P$ следует неравенство: $V_C^2 \le 2gr$, или

$$V_0^2 + 2g\left[l\sin\varphi + r(1-\cos\varphi)\right] \le 2gr.$$ Откуда $r \ge \dfrac{V_0^2 + 2gl\sin\varphi}{2g\cos\varphi}$.

**4.6**

Из уравнения теоремы об изменении кинетической энергии шарика в точке $B$ с учётом, что $V_A = 0$, найдём:

$$\frac{mV_B^2}{2} = \frac{ca^2}{2} + mg\left[R + R\cos 60° - a\cos 30°\right].$$

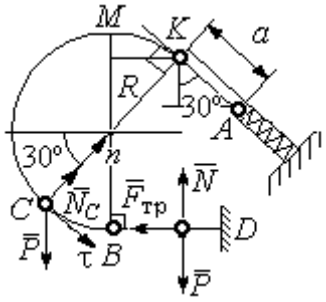


Рис. 7.32. Расчётная схема к упражнению 4.6

Составим уравнение теоремы об изменении кинетической энергии точки на участке $BD$:

$-\frac{mV_B^2}{2} = -fNs$, где $s$ – путь точки до остановки. С учётом данных задачи, получим: $s$ = 5,39 м.

Уравнение движения шарика в проекции на нормальную ось в точке $C$

$$\frac{mV_C^2}{R} = N_C - P\cos 60°.$$

Для вычисления реакции опоры шарика на трубу имеем равенство $N_C = \frac{mV_C^2}{R} + P\cos 60° = \frac{1}{R}\left[mV_B^2 - 2mgR(1-\cos 60°)\right] + mg\cos 60°$, где кинетическая энергия шарика в точке $B$: $mV_B^2 = ca^2 + 2mgR\left[(1+\cos 60°) - \frac{a}{R}\cos 30°\right]$. Получим: $N_C = 18{,}71$ Н. Давление шарика на трубку равно реакции опоры и направлено в противоположную сторону.

## 7.5. Ответы к упражнениям главы 5

**5.1**

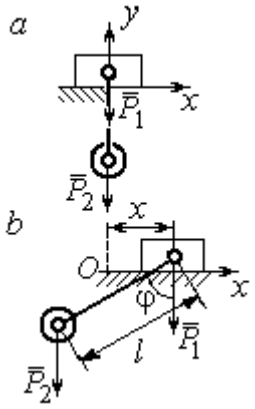



Рис. 7.33. Расчётная схема к упражнению 5.1:
*a* – начальное положение системы;
*b* – произвольное положение

$x_0$ – координата центра тяжести системы в начальном положении, $x_0$ = 0 (см. рис.7.33); $x$ – текущая координата центра тележки; $x_1$ – координата центра тяжести системы в её произвольном положении: $x_1 = \frac{m_1 x - m_2(l\sin\varphi - x)}{m_1 + m_2}$.

Уравнение закона сохранения движения центра масс системы: $x_1 = x_0$, или

$$m_1 x - m_2(l\sin\varphi - x) = 0.$$

Отсюда зависимость координаты движения тележки от положения груза 2: $x = \frac{m_2 l}{m_1 + m_2}\sin\varphi$.

**5.2**

Теорема об изменении кинетического момента системы относительно оси $z$: $\frac{dL_z}{dt} = \sum M_z(\vec{F}_k^e)$.

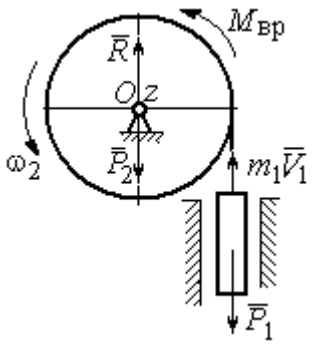


Рис. 7.34. Расчётная схема к упражнению 5.2

Кинетический момент системы:

$$L_z = L_z^{бар} + L_z^{гр} = \frac{m_2 r^2}{2}\omega + m_1 V_1 r = \left(m_1 + \frac{m_2}{2}\right)\omega r^2.$$

Суммарный момент внешних сил относительно оси $z$: $\sum M_z(\vec{F}_k^e) = M_{вр} - P_1 r = kt - m_1 g r$.

Дифференциальное уравнение вращения барабана:

$$\left(m_1 + \frac{m_2}{2}\right) r^2 \frac{d\omega}{dt} = kt - m_1 g r.$$

При нулевых начальных условиях $\omega = \frac{kt^2 - 2m_1 grt}{(2m_1 + m_2)r^2}$.

**5.3**

Уравнение теоремы об изменении кинетической энергии для неизменяемых систем на конечном перемещении: $T - T_0 = \sum A(F_k)$, $T_0 = 0$.

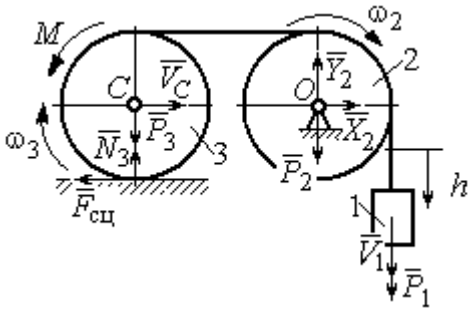


Рис. 7.35. Расчётная схема к упражнению 5.3

Кинетическая энергия груза 1: $T_1 = \frac{m_1 V_1^2}{2}$. Энергия вращательного движения блока 2: $T_2 = \frac{1}{2} J_O \omega_2^2$, где осевой момент инерции блока: $J_O = \frac{m_2 r^2}{2}$, угловая скорость блока $\omega_2 = \frac{V_1}{r}$. Кинетическая энергия катка 3: $T_3 = \frac{1}{2} m_3 V_C^2 + \frac{1}{2} J_C \omega_3^2$, где момент инерции катка относительно оси, проходящей

через центр масс перпендикулярно плоскости диска, $J_C = \frac{m_3 r^2}{2}$, угловая скорость катка и скорость его центра масс $\omega_3 = \frac{V_1}{2r}$, $V_C = \frac{V_1}{2}$.

Энергия системы: $T = T_1 + T_2 + T_3 = (8m_1 + 4m_2 + 3m_3)\frac{V_1^2}{16}$.

Суммарная работа вешних сил на перемещении $h$: $\sum A(F_k) = P_1 h - M\frac{h}{2r}$.

Уравнение теоремы об изменении кинетической энергии:

$$(8m_1 + 4m_2 + 3m_3)\frac{V_1^2}{16} = \left(m_1 g - \frac{M}{2r}\right)h.$$

Скорость груза на высоте $h$: $V_1 = 4\sqrt{\frac{\left(m_1 g - \frac{M}{2r}\right)h}{8m_1 + 4m_2 + 3m_3}}$.

**5.4**

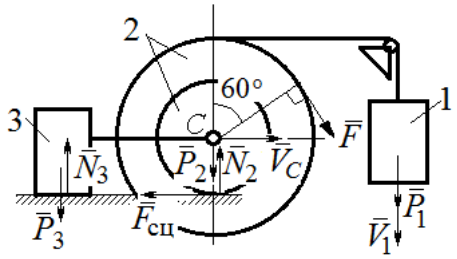



Рис. 7.36. Расчётная схема к упражнению 5.4

Для решения задачи используется теорема об изменении кинетической энергии в дифференциальной форме: $\frac{dT}{dt} = \sum N(\vec{F}_k^e)$, где $T$ – энергия системы в её текущем положении; $\sum N(\vec{F}_k^e)$ – суммарная мощность внешних сил.

Допустим, груз 1 движется вниз со скоростью $V_1$. Скорость центра масс катка $V_C$.

Кинетическая энергия катка 2: $T_2 = \frac{1}{2}m_2 V_C^2 + \frac{1}{2}J_{zC}\omega_2^2$. Здесь $m_2 = \frac{2P}{g}$, $J_{zC} = m_2 i_z^2$, $\omega_2 = \frac{V_C}{r}$. В результате кинетическая энергия катка $T_2 = \frac{3P}{g}V_C^2$.

Скорость груза 3 $V_3 = V_C$. Кинетическая энергия груза 3 $T_3 = \frac{P}{g}V_C^2$.

Скорость груза 1 $V_1 = \omega_2 3r = 3V_C$. Кинетическая энергия груза 1: $T_1 = \frac{9P}{2g}V_C^2$.

Суммарная кинетическая энергия (энергия системы): $T = T_1 + T_2 + T_3 = \frac{17P}{2g}V_C^2$. Производная $\frac{dT}{dt} = \frac{17P}{g}V_C\frac{dV_C}{dt} = \frac{17}{g}V_C a_C$.

Мощности сил $\vec{P}_2$, $\vec{N}_2$, $\vec{F}_{сц}$, $\vec{P}_3$, $\vec{N}_3$ равны нулю.

Мощность силы $\vec{F}$, приложенной к колесу, определяется по формуле: $N(\vec{F}) = \vec{F}\cdot\vec{V}_C + \vec{M}_C(\vec{F})\cdot\vec{\omega}_2 = FV_C\cos 60° + FR\omega_2$. Мощность силы $\vec{P}_1$ $N(\vec{P}_1) = P_1V_1$. Суммарная мощность внешних сил: $\sum N(F^e) = 7PV_C$.

Составляем уравнение теоремы об изменении кинетической энергии системы: $\frac{17P}{g}V_C a_C = 7PV_C$, откуда $a_C = \frac{7}{17}g$ м/с$^2$.

**5.5**

Рассмотрим движение катков отдельно, заменив невесомый стержень реакцией. Предположим, катки движутся направо (см. рис. 7.37). Уравнения движения катков:

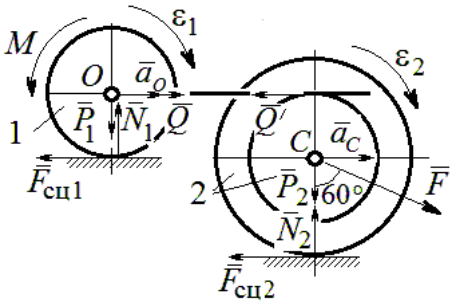


Рис. 7.37. Расчётная схема к упражнению 5.5

$$m_1 a_O = Q - F_{сц1},\ J_{1O}\varepsilon_1 = F_{сц1}r - M;$$

$$m_2 a_C = -Q' - F_{сц2} + F\cos 30°;$$

$$J_{2C}\varepsilon_2 = F_{сц2}3r - Q'r.$$

Здесь $\vec{Q}$ – реакция невесомого стержня, $|\vec{Q}| = |\vec{Q}'|$; $\vec{F}_{сц1}$, $\vec{F}_{сц2}$ – силы сцепления катков с поверхностями качения; моменты инерции катков $J_{1O} = \frac{m_1 r^2}{2}$, $J_{2C} = m_2 i_2^2$. Подставляя кинематические соотношения $\varepsilon_2 = \frac{a_C}{3r}$; $a_O = \frac{4}{3}a_C$; $\varepsilon_1 = \frac{4a_C}{3r}$, с учётом данных задачи, получим систему уравнений:

$$\frac{4P}{3g}a_C = Q - F_{сц1};\ \ \frac{2P}{3g}a_C = F_{сц1} - 4P;$$

$$\frac{2P}{g}a_C = -Q - F_{сц2} + P\sqrt{3};\ \ \frac{4P}{3g}a_C = 3F_{сц2} - Q.$$

Находим ускорение центра катка 2: $a_C = \dfrac{3\left(3\sqrt{3}-16\right)g}{46} \approx -\,0{,}7g$. Каток движется в противоположную сторону. Реакция стержня $Q = 2{,}6P$.

**5.6**

Выделяем звенья механизма, заменяя действия нитей их реакциями. Допустим, направления движений тел в системе соответствуют подъёму груза 1.

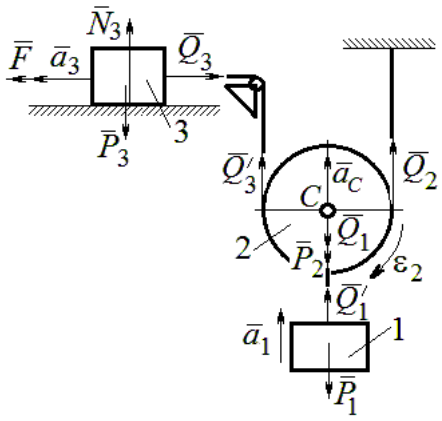



Рис. 7.38. Расчётная схема к упражнению 5.6

Уравнения движения тел:

$$m_3a_3 = F - Q_3,\ m_2a_C = Q'_3 + Q_2 - P_2 - Q_1;$$

$$J_{2C}\varepsilon_2 = Q'_3r - Q_2r,\ m_1a_1 = Q'_1 - P_1.$$

С учётом, что $\left|\vec{Q}_3\right| = \left|\vec{Q}'_3\right|$, $\left|\vec{Q}_1\right| = \left|\vec{Q}'_1\right|$ и

$$a_C = a_1,\quad a_3 = 2a_1,\quad \varepsilon_2 = \frac{a_1}{r},\quad J_{2C} = \frac{m_2r^2}{2},$$

подставляя данные задачи, получим систему уравнений:

$$2ma_1 = 2{,}5mg - Q_3;\ \ ma_1 = Q_3 + Q_2 - mg - Q_1;$$

$$\frac{ma_1}{2} = Q_3 - Q_2;\ m_1a_1 = Q_1 - P_1.$$

Решая систему, находим: $a_1 = \dfrac{2}{17}g \approx 0{,}12g;\ \ Q_3 = 2{,}26mg;\ Q_2 = 2{,}15mg$.

**5.7**

Заменяем действия нитей реакциями. Предположим, груз 1 спускается по наклонной плоскости. Уравнения движения тел:

$$m_1a_1 = P_1\cos 30° - Q_1;\ \ m_3a_3 = Q_3;$$

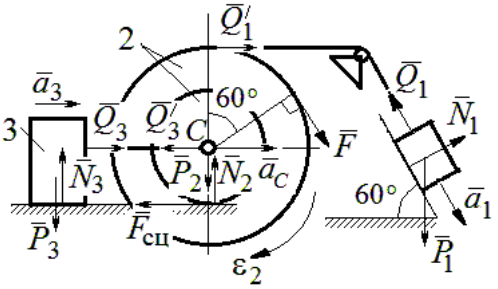



Рис. 7.39. Расчётная схема к упражнению 5.7

$$m_2 a_C = Q_1' - Q_3' - F_{\text{сц}} + F\cos 60^\circ;\ J_{2C}\varepsilon_2 = Q_1' R + FR + F_{\text{сц}} r,\ J_{2C} = m_2 i_2^2.$$

Соотношения ускорений: $\varepsilon_2 = \dfrac{a_1}{R+r}$, $a_C = \dfrac{a_1 r}{R+r}$, $a_3 = a_C$. Подставляя данные задачи, с учётом, что модули сил $Q_1' = Q_1$ и $Q_3' = Q_3$, получим систему уравнений:

$$ma_1 = mg\frac{\sqrt{3}}{2} - Q_1;\ \frac{2}{3}ma_1 = Q_3;$$

$$ma_1 = Q_1 - Q_3 - F_{\text{сц}} + \frac{1}{2}mg;\ 3ma_1 = 2Q_1 + 2mg + F_{\text{сц}}.$$

Находим $a_1 = \dfrac{3}{46}\left(5+3\sqrt{3}\right)g \approx 0{,}44g;\ Q_1 = 0{,}21mg;\ Q_3 = 0{,}44mg$.

## 7.6. Ответы к упражнениям главы 6

**6.1**

Внешние силы, действующие на систему: силы тяжести – $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$ и реакции опор $\vec{N}_3$, $\vec{R}_3$ Приложим к телам системы, силы инерции $\vec{R}_1^{\text{ин}}$, $\vec{R}_2^{\text{ин}}$ (рис. 7.40, *a*). В соответствии с принципом Даламбера, полученная система сил находится в равновесии. Составляем условие равновесия системы сил в проекциях на горизонтальную и вертикальную оси:

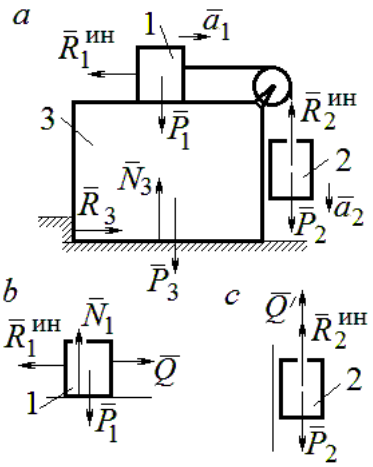



Рис. 7.40. Расчётная схема к упражнению 6.1

$$R_3 - R_1^{\text{ин}} = 0,\ N_3 - P_3 - P_1 - P_2 + R_2^{\text{ин}} = 0.$$

Для вычисления сил инерции рассмотрим отдельно грузы 1 и 2, заменяя действие соединяющей их нити реакцией (рис. 7.40, *b*, *c*). Присоединим к грузам силы инерции и, применив принцип Даламбера, составим уравнения равновесия систем сил - для груза 1 в проекции на горизонтальную ось, для груза 2 – на вертикальную:

$$Q - R_1^{\text{ин}} = 0;\ P_2 - Q' - R_2^{\text{ин}} = 0,$$

где $R_1^{ин} = m_1 a_1$, $R_2^{ин} = m_2 a_2$.

Решая полученную систему с учётом равенства модулей сил $Q = Q'$ и ускорений грузов $a_1 = a_2$, находим ускорение грузов: $a_1 = a_2 = 0{,}5g$. Тогда давление призмы на горизонтальную поверхность: $N_3 = 2{,}5mg$.

**6.2**

Активными силами в системе являются силы $\vec{F}$ и $\vec{Q}$. Для равновесия системы необходимо и достаточно выполнения условия: $\delta A(\vec{F}) + \delta A(\vec{Q}) = 0$ или $F\delta s_F - Q\delta s_Q = 0$, где $\delta s_F$ и $\delta s_Q$ – возможные перемещения точек приложения сил $\vec{F}$ и $\vec{Q}$.

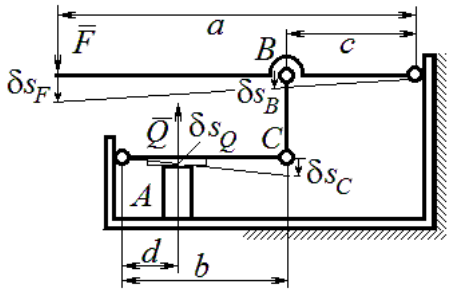


Рис. 7.41. Расчётная схема к упражнению 6.2

Имеем соотношения: $\dfrac{\delta s_F}{\delta s_B} = \dfrac{a}{c}$, $\dfrac{\delta s_C}{\delta s_Q} = \dfrac{b}{d}$, где $\delta s_B$ и $\delta s_C$ – возможные перемещения точек $B$ и $C$, причём $\delta s_B = \delta s_C$. Тогда $\delta s_Q = \dfrac{cd}{ab}\delta s_F$ и сила, сжимающая деталь $A$ под прессом, равна $Q = \dfrac{ab}{cd}F$.

**6.3**

Активными силами, совершающими работу при движении системы, являются силы тяжести $\vec{P}_3$, $\vec{P}_4$ и пары сил с моментами $M_1$ и $M_2$. Связи идеальные.

Для равновесия системы необходимо и достаточно выполнения условия:

$$\delta A(\vec{P}_3) + \delta A(\vec{P}_4) + \delta A(M_1) + \delta A(M_2) = 0 \text{ или}$$

$$P_3\delta s_3 - P_4\delta s_4 + M_1\delta\varphi_1 - M_2\delta\varphi_2 = 0,$$

где $\delta s_3, \delta s_4$ – элементарные перемещения грузов 3, 4; $\delta\varphi_1, \delta\varphi_2$ – элементарные повороты валов 1 и 2. Выразим все перемещения через угол поворота

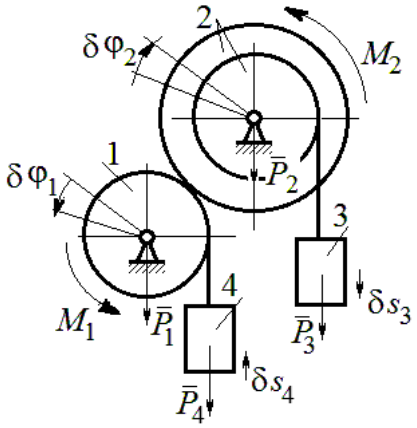


Рис. 7.42. Расчётная схема к упражнению 6.3

вала 2: $\delta s_3 = \delta\varphi_2 r$, $\delta\varphi_1 = 3\delta\varphi_2$, $\delta s_4 = 3r\delta\varphi_2$ и подставим в уравнение равновесия. Получим: $M_2 = 4Pr$.

**6.4**

Система с идеальными связями. Активными силами являются силы тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$ и пара сил с моментом $M_{\text{вр}}$ (рис. 7.43).

Направления поворотов дисков и их угловые ускорения показаны на рис. 7.43 дуговыми стрелками $\delta\varphi_1, \varepsilon_1$ и $\delta\varphi_2, \varepsilon_2$. Направления движения центра масс катка 2, груза 3 и их ускорения обозначены: $\delta s_C, a_C$ и $\delta s_3, a_3$.

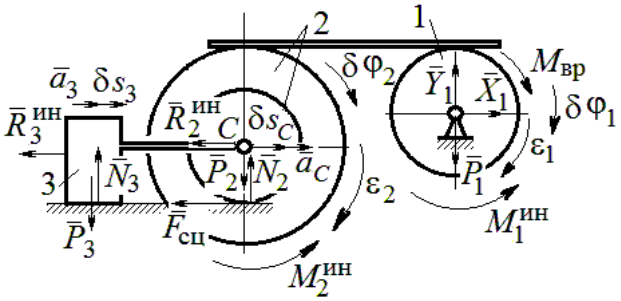



Рис. 7.43. Расчётная схема к упражнению 6.4

Кинематические соотношения между перемещениями и ускорениями: $\delta s_C = \delta s_3$, $a_C = a_3$, $\delta\varphi_2 = \dfrac{\delta s_3}{r}$, $\varepsilon_2 = \dfrac{a_3}{r}$, $\delta\varphi_1 = \dfrac{3\delta s_3}{r}$, $\varepsilon_1 = \dfrac{3a_3}{r}$.

Присоединим к телам системы силы инерции.

Модули главных векторов сил инерции: $R_3^{\text{ин}} = m_3 a_3 = ma_3$; $R_2^{\text{ин}} = m_2 a_C = 2ma_3$; $M_2^{\text{ин}} = m_2 i_2^2 \varepsilon_2 = 4{,}5mra_3$; $M_1^{\text{ин}} = \dfrac{m_1 R_1^2}{2}\varepsilon_1 = 1{,}5mra_3$.

Элементарные работы активных сил:

$$\sum \delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) = M_{\text{вр}}\delta\varphi_1 = (mg\sin\omega t)3\delta s_3.$$

Элементарные работы сил инерции:

$$\sum \delta A(\vec{R}_k^{\text{ин}}) = -R_3^{\text{ин}}\delta s_3 - R_2^{\text{ин}}\delta s_C - M_2^{\text{ин}}\delta\varphi_2 - M_1^{\text{ин}}\delta\varphi_1 =$$

$$= -ma_3\delta s_3 - 2ma_3\delta s_3 - 4{,}5ma_3\delta s_3 - 1{,}5ma_3 3\delta s_3 = -12ma_3\delta s_3.$$

Общее уравнение динамики имеет вид:

$$\sum \delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) + \sum \delta A(\vec{R}_k^{\text{ин}}) = m(3g\sin\omega t - 12a_3)\delta s_3 = 0.$$

Ускорение груза 3: $a_3 = 0{,}25g\sin\omega t$, или $\ddot{s}_3 = 0{,}25g\sin\omega t$. Интегрируя дифференциальное уравнение с нулевыми начальными условиями, получим закон движения груза: $s_3 = \dfrac{0{,}25g}{\omega}\left(t - \dfrac{1}{\omega}\sin\omega t\right)$.

**6.5**

Система с идеальными связями. Активные силы и главные вектора сил инерции показаны на рис. 7.44.

Элементарные работы активных сил: $\sum\delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) = F\delta s_1 + P_3\delta s_3 - P_4\delta s_4$ и сил инерции $\sum\delta A(\vec{R}_k^{\text{ин}}) = -R_1^{\text{ин}}\delta s_1 - R_3^{\text{ин}}\delta s_3 - R_4^{\text{ин}}\delta s_4 - M_2^{\text{ин}}\delta\varphi_2$, где модули сил инерции: $R_1^{\text{ин}} = \dfrac{P_1}{g}a_1$, $R_3^{\text{ин}} = \dfrac{P_3}{g}a_3$, $R_4^{\text{ин}} = \dfrac{P_1}{g}a_4$, $M_2^{\text{ин}} = \dfrac{P_2}{g}i_2^2\varepsilon_2$.

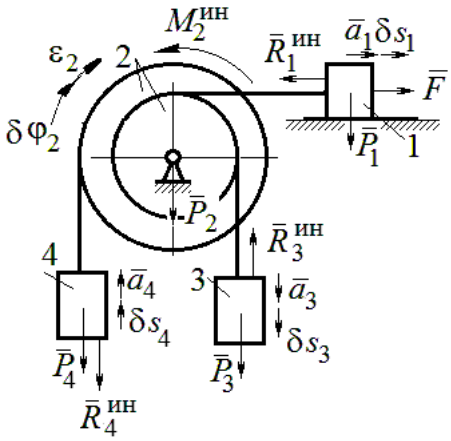


Рис. 7.44. Расчётная схема к упражнению 6.5

Кинематические соотношения: $\delta s_3 = \delta s_1$, $a_3 = a_1$, $\delta s_4 = 2\delta s_1$, $a_4 = 2a_1$, $\delta\varphi_2 = \dfrac{\delta s_1}{r}$, $\varepsilon_2 = \dfrac{a_1}{r}$.

Общее уравнение динамики:

$$\sum\delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) + \sum\delta A(\vec{R}_k^{\text{ин}}) = P(t+1)\delta s_1 + P\delta s_1 - 2P\delta s_1 -$$

$$-\left(\frac{P}{g}a_1\delta s_1 + \frac{P}{g}a_1\delta s_1 + \frac{2P}{g}2a_1 2\delta s_1 + \frac{2P}{g}2r^2\frac{a_1}{r}\frac{\delta s_1}{r}\right) = P\left(t - \frac{14a_1}{g}\right)\delta s_1 = 0.$$

Находим уравнение движения груза 3: $a_3 = a_1 = \dfrac{1}{14}gt$, или $\ddot{x}_3 = \dfrac{1}{14}gt$.

Проинтегрировав дифференциальное уравнение с нулевыми начальными условиями, получим закон движения груза 3: $x_3 = \dfrac{1}{84}gt^3 \approx 0{,}012gt^3$.

**6.6**

Рассматриваемая механическая система (рис. 7.45) имеет одну степень свободы. Уравнение Лагранжа: $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}}\right)-\frac{\partial T}{\partial x}=Q_x$, где $T$ – кинетическая энергия системы: $Q_x$ – обобщенная сила.

В качестве обобщённой координаты $x$ выберем положение точки $C$ относительно недеформированной пружины, отмеченной на рис. 7.45 величиной $l_0$. Обобщённая скорость $\dot{x}$ .

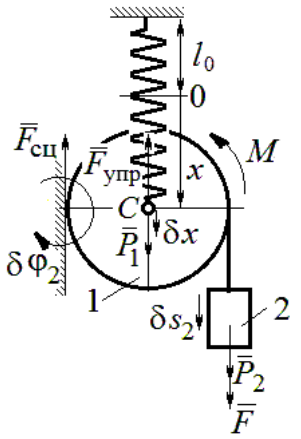


Рис. 7.45. Расчётная схема к упражнению 6.6

Кинетическая энергия катка: $T_1=\frac{1}{2}m_1V_C^2+\frac{1}{2}J_{zC}\omega_1^2$, где $\omega_1$, $V_C$ – угловая скорость катка и скорость его центра масс, $V_C=\dot{x}$, $\omega_1=\frac{V_C}{r}=\frac{\dot{x}}{r}$; момент инерции $J_{zC}=\frac{1}{2}m_1r^2$. Кинетическая энергия груза 2: $T_2=\frac{1}{2}m_2V_2^2$, где $V_2$ – скорость груза 2, $V_2=2V_C=2\dot{x}$. Кинетическая энергия системы, выраженная через обобщённую скорость: $T=T_1+T_2=\frac{7P}{2g}\dot{x}^2$.

В произвольном положении системы, определяемом координатой $x$, дадим центру масс катка возможное перемещение $\delta x$ (см. рис. 7.45). Элементарная работа активных сил $\sum\delta A(F_{\text{к}})=P_1\delta x-F_{\text{упр}}\delta x+(P_2+F)\delta s_2-M\delta\varphi_1$. Полагая перемещения $\delta s_2=2\delta x$, $\delta\varphi_1=\frac{\delta x}{r}$, модуль силы упругости $F_{\text{упр}}=cx$ и с учётом данных задачи, получим $\sum\delta A(F_{\text{к}})=(3P-cx)\delta x$. Обобщённая сила $Q_x=3P-cx$.

Уравнение Лагранжа $\frac{7P}{g}\ddot{x}=3P-cx$, или $\ddot{x}+\frac{4g}{7r}x=\frac{3g}{7}$.

Решение уравнения (с нулевыми начальными условиями): $x = \frac{3}{4} r(1 - \cos\omega t)$. Закон движения груза: $s_2 = 2x = \frac{3}{2} r(1 - \cos\omega t)$.

**6.7**

Рассматриваемая система имеет две степени свободы. Обобщённые координаты – расстояния $x_1$, $x_2$ соответственно до грузов 1 и 2, отсчитываемые от неподвижных центров блоков *B* и *D* (рис. 7.46, *a*). Обобщённые скорости $\dot{x}_1$, $\dot{x}_2$. Кинетическая энергия грузов и блока 3:

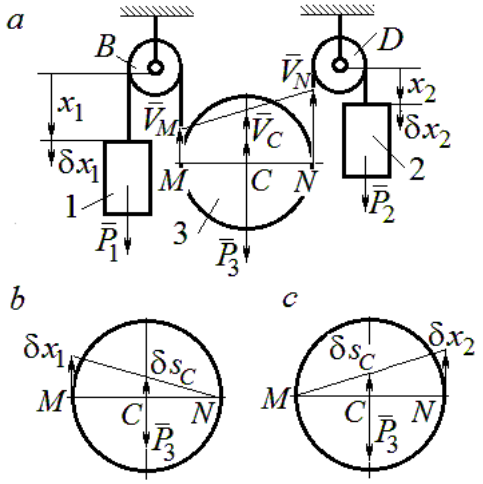



Рис. 7.46. Расчётная схема к упражнению 6.7:
*a* – кинематика механизма;
*b*, *c* – возможные перемещения блока 3 при вычислении обобщённых сил

$$T_1 = \frac{P_1 \dot{x}_1^2}{2g},\ T_2 = \frac{P_2 \dot{x}_2^2}{2g};$$

$$T_3 = \frac{P_3}{2g}\left(\frac{\dot{x}_1 + \dot{x}_2}{2}\right)^2 + \frac{1}{2}\frac{P_3 r^2}{2g}\left(\frac{\dot{x}_2 - \dot{x}_1}{2r}\right)^2.$$

Здесь учтено (см. рис. 7.46, *a*): что

$$V_C = \frac{V_N + V_M}{2} = \frac{\dot{x}_2 + \dot{x}_1}{2};$$

$$\omega_2 = \frac{V_N - V_M}{2r} = \frac{\dot{x}_2 - \dot{x}_1}{2r}.$$

Дадим системе возможное перемещение по координате $x_1$, оставляя координату $x_2$ постоянной: $\delta x_1 \neq 0$, $\delta x_2 = 0$. На этом перемещении сумма элементарных работ внешних сил (см. рис. 7.46, *a*, *b*):

$$\sum \delta A(F_к) = P_1 \delta x_1 - P_3 \delta s_C = \left(P_1 - \frac{1}{2} P_3\right)\delta x_1.$$

Обобщённая сила $Q_{x_1} = P_1 - \frac{1}{2} P_3$.

Дадим системе другое независимое возможное перемещение – по координате $x_2$, так, что $\delta x_1 = 0$, $\delta x_2 \neq 0$. При этом перемещении сумма элементарных работ внешних сил (см. рис. 7.46, *a*, *c*):

$$\sum \delta A(F_к) = P_2 \delta x_2 - P_3 \delta s_C = \left(P_2 - \frac{1}{2} P_3\right)\delta x_2.$$

Обобщённая сила $Q_{x_2} = P_2 - \frac{1}{2}P_3$.

Уравнения Лагранжа

$$\left(P_1 + \frac{3}{8}P_3\right)\frac{\ddot{x}_1}{g} + \frac{1}{8}P_3\frac{\ddot{x}_2}{g} = P_1 - \frac{1}{2}P_3,\ \ \frac{1}{8}P_3\frac{\ddot{x}_1}{g} + \left(P_2 + \frac{3}{8}P_3\right)\frac{\ddot{x}_2}{g} = P_2 - \frac{1}{2}P_3 \text{ или}$$

$$7\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2 = 0,\ \ddot{x}_1 + 9\ddot{x}_2 = 2g.$$

Ускорения грузов: $\ddot{x}_1 = -\frac{1}{31}g$, $\ddot{x}_2 = \frac{7}{31}g$. Ускорение центра масс блока $\ddot{x}_C = \frac{\ddot{x}_2 + \ddot{x}_1}{2} = \frac{6}{31}g$. Груз 1 и центр блока 3 движутся вверх, груз 2 – вниз. (Сравнить с задачей 70.)

**6.8**

Система с двумя степенями свободы. Обобщённые координаты: $x_1$ – положение центра масс катка 1 (точки $C_1$) относительно неподвижной вертикальной стены; $x_2$ – положение центра масс катка 2 (точки $C_2$) относительно подвижного края платформы.

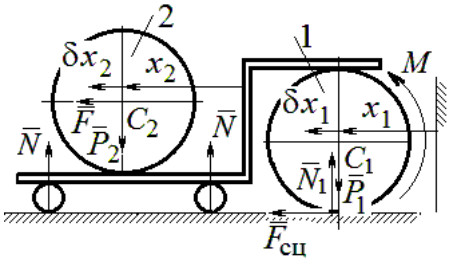


Рис. 7.47. Расчётная схема к упражнению 6.8

Кинетическая энергия системы

$$T = \frac{3}{4}m_1\dot{x}_1^2 + \frac{1}{2}\left[m_2\left(\dot{x}_2 + 2\dot{x}_1\right)^2 + \frac{m_2 r^2}{2}\left(\frac{\dot{x}_2}{r}\right)^2\right] = \frac{P}{g}\left(\frac{11}{4}\dot{x}_1^2 + \dot{x}_2^2 + 2\dot{x}_1\dot{x}_2\right).$$

Дадим системе возможное перемещение по координате $x_1$ $\left(\delta x_1 \neq 0\right)$, оставляя другую координату $x_2$ неизменной $\left(\delta x_2 = 0\right)$. Работу совершают момент $M$ и сила $\overline{F}$. Суммарная работа

$$\sum \delta A(F_к) = M\delta\varphi_1 + F\delta s_{C_2} = M\frac{\delta x_1}{r} + F\,2\delta x_1 = 4P\delta x_1.$$

Обобщённая сила $Q_{x_1} = 4P$.

При другом независимом возможном перемещении $\delta x_1 = 0$, $\delta x_2 \neq 0$ суммарная работа внешних сил $\sum \delta A(F_к) = F\delta x_2$ и обобщённая сила, соответствующая координате $x_2$, равна $Q_{x_2} = P$.

Уравнения Лагранжа

$$\frac{P}{g}\left(\frac{11}{2}\ddot{x}_1 + 2\ddot{x}_2\right) = 4P,\ \frac{P}{g}\left(2\ddot{x}_2 + 2\ddot{x}_1\right) = P, \text{ или}$$

$$11\ddot{x}_1 + 4\ddot{x}_2 = 8g,\ 2\ddot{x}_2 + 2\ddot{x}_1 = g$$

Ускорение центра катка 1 $\ddot{x}_1 = \frac{6}{7}g$. Тележка катится в направлении оси $x_1$. Ускорение центра катка 2 относительно тележки $\ddot{x}_2 = -\frac{5}{14}g$. Закон относительного движения центра катка 2 при нулевых начальных условиях: $x_2 = -\frac{5}{28}gt^2$. Каток катится к правому борту тележки.

# СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

*Бать М. И.*, *Джанелидзе Г. Ю.*, *Кельзон А. С.* Теоретическая механика в примерах и задачах: Т. 1–2.– СПб.: Лань, 2010.

*Бутенин Н. В.*, *Лунц Я. Л.*, *Меркин Д. Р.* Курс теоретической механики: В 2-х томах.– М.: Наука, 2009.

*Вебер Г. Э.*, *Ляпцев, С. А*. Лекции по теоретической механике. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2008.

*Тарг С. М.* Краткий курс теоретической механики: учебник для втузов. – М.: Высшая школа, 2010.

Учебное издание

Валерий Григорьевич Брагин
Евгений Борисович Волков
Юрий Михайлович Казаков

# ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

Учебное пособие

Редактор *Л.В. Устьянцева*

*Компьютерная версия*

Подписано в печать 26.10.2018 г.
Бумага писчая. Формат бумаги 60×84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. 15,625. Уч. изд. л. 10,5. Тираж экз. Заказ №
Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. СТАТИКА..... **Error! Bookmark not defined.**
1.1. Основные понятия статики..... **Error! Bookmark not defined.**
1.2. Система сходящихся сил. Условия равновесия**Error! Bookmark not defined.**
1.3. Произвольная плоская система сил..... **Error! Bookmark not defined.**
1.4. Равновесие систем тел ..... **Error! Bookmark not defined.**
1.5. Произвольная пространственная система сил**Error! Bookmark not defined.**
1.6. Равновесие тел при наличии сил трения..... **Error! Bookmark not defined.**
2. КИНЕМАТИКА ТОЧКИ И ТВЁРДОГО ТЕЛА..... **Error! Bookmark not defined.**
2.1. Криволинейное движение точки ..... **Error! Bookmark not defined.**
2.2. Поступательное движение и вращение твердого тела .**Error! Bookmark not defined.**
вокруг неподвижной оси ..... **Error! Bookmark not defined.**
2.3. Скорости точек при плоскопараллельном движении твёрдого тела ....**Error! Bookmark not defined.**
2.4. Ускорения точек при плоскопараллельном движении твёрдого тела ..**Error! Bookmark not defined.**
3. СЛОЖНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТОЧКИ..... **Error! Bookmark not defined.**
3.1. Основные понятия и определения сложного движения точки .....**Error! Bookmark not defined.**
4. ДИНАМИКА ТОЧКИ ..... **Error! Bookmark not defined.**
4.1. Дифференциальные уравнения движения точки.....**Error! Bookmark not defined.**
4.2. Колебания материальной точки ..... **Error! Bookmark not defined.**
4.3. Теорема об изменении кинетической энергии точки ..**Error! Bookmark not defined.**
5. ОБЩИЕ ТЕОРЕМЫ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ..... **Error! Bookmark not defined.**
5.1. Теорема о движении центра масс системы... **Error! Bookmark not defined.**
5.2. Теорема об изменении кинетического момента системы
относительно оси ..... **Error! Bookmark not defined.**
5.3. Теорема об изменении кинетической энергии системы**Error! Bookmark not defined.**
5.4. Применение общих теорем динамики системы к описанию
движений твёрдого тела ..... **Error! Bookmark not defined.**
6. ПРИНЦИПЫ МЕХАНИКИ ..... **Error! Bookmark not defined.**
6.1. Принцип Даламбера для системы ..... **Error! Bookmark not defined.**
6.2. Принцип возможных перемещений ..... **Error! Bookmark not defined.**
6.3. Общее уравнение динамики ..... **Error! Bookmark not defined.**
6.4. Уравнения Лагранжа II рода..... **Error! Bookmark not defined.**
7. ОТВЕТЫ И КРАТКИЕ ПОЯСНЕНИЯ .....**Error! Bookmark not defined.**
7.1. Ответы к упражнениям главы 1 .....**Error! Bookmark not defined.**
7.2. Ответы к упражнениям главы 2 .....**Error! Bookmark not defined.**
7.3. Ответы к упражнениям главы 3 .....**Error! Bookmark not defined.**
7.4. Ответы к упражнениям главы 4 .....**Error! Bookmark not defined.**
7.5. Ответы к упражнениям главы 5 .....**Error! Bookmark not defined.**
7.6. Ответы к упражнениям главы 6 .....**Error! Bookmark not defined.**

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**Error! Bookmark not defined.**




Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

**В. Г. Брагин, Е. Б. Волков, Ю. М. Казаков**

# ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

Учебное пособие

Екатеринбург
2018

**Министерство науки и высшего образования РФ**
**ФГБОУ ВПО**
**«Уральский государственный горный университет»**

# СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

***Учебно-методическое пособие***
**и контрольные задания для выполнения РГР и самостоятельной работы студентов специальности**
***21.05.04 Горное дело***

**Екатеринбург**
**2019**

А 94
Рецензент: *Н.М.Суслов*, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой ГМК
Уральского государственного горного университета

Учебно-методическое пособие рассмотрено на заседании кафедры технической механики 04 апреля 2019г. (протокол № 7) и рекомендовано для издания в УГГУ

А. А. Чиркова, А. П. Золкин, Д. Н. Суслов, А. И. Афанасьев
СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ: учебно-методическое пособие и контрольные задания для выполнения РГР и самостоятельной работы студентов специальности *21.05.04 Горное дело*.– Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2019. – 84 с.

Учебно-методическое пособие содержит краткие методические указания, контрольные задания и примеры выполнения заданий по темам: «Осевое нагружение стержней переменного сечения. Определение деформаций при осевом нагружении», «Расчет вала на прочность при кручении. Определение углов закручивания вала – расчет на жесткость», «Расчет на прочность балки при изгибе. Подбор сечения балки», «Расчет на жесткость балки при изгибе. Определение формы изогнутой оси балки», «Расчет стержней на устойчивость», «Расчет статически неопределимых балок», «Расчет статически неопределимых рам».

© Чиркова А. А., Золкин А. П.,
Суслов Д.Н.,Афанасьев А. И. 2019
© Уральский государственный
горный университет, 2019

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Задача №1. Осевое нагружение стержней .....4
Задача №2. Расчёт вала на кручение и жёсткость….....11
Задача №3. Расчёт балки на прочность при изгибе .....17
Задача №4. Расчёт балки на жёсткость .....23
Задача №5. Геометрические характеристики плоского симметричного сечения……..……30
Задача № 6. Расчёт статически неопределемых стержневых систем. ……36
Задача 7.Расчет статически неопределимых балок ……..……...43
Задача №8. Расчет стержней на устойчивость……..67
Задача №9. Расчет статически неопределимых рам……..……...70
Оформление расчетно-графической работы.....84
Список рекомендуемой литературы .....84

## Задача № 1. Осевое нагружение стержней

Для стального стержня из условия прочности подобрать площади поперечных сечений при условии, что отношение площади большего участка к меньшему равно $k = S_m/S_x$. Построить эпюры: осевой силы $N$; нормальных напряжений $\sigma$ и продольных перемещений $\Delta$. Модуль упругости стали $E = 200000$ МПа. Предел текучести стали $\sigma_m$. Коэффициент запаса прочности по пределу текучести – $n_m$. Исходные данные сведены в табл. 1, расчетные схемы даны на рис. 1.

Таблица 1

**Исходные данные к задаче № 1**

| № п/п | Сила, кН | | | | Длина участка, м | | | | $\sigma_т$, МПа | $n_т$ | $k = S_m/S_x$ | Номер схемы |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $P_1$ | $P_2$ | $P_3$ | $P_4$ | $L_1$ | $L_2$ | $L_3$ | $L_4$ | | | | |
| 1 | 150 | 660 | 440 | 990 | 2,0 | 1,4 | 1,3 | 2,3 | 200 | 1,5 | 1,5 | 1 |
| 2 | 620 | 700 | 920 | 130 | 3,1 | 2,2 | 1,5 | 1,9 | 240 | 2,0 | 2,0 | 2 |
| 3 | 600 | 880 | 170 | 200 | 2,4 | 3,0 | 2,3 | 1,6 | 280 | 2,5 | 2,5 | 3 |
| 4 | 80 | 130 | 600 | 610 | 1,6 | 2,9 | 1,7 | 2,4 | 320 | 3,0 | 3,0 | 4 |
| 5 | 990 | 380 | 630 | 390 | 2,8 | 1,8 | 2,5 | 1,7 | 360 | 1,5 | 3,5 | 5 |
| 6 | 290 | 570 | 170 | 900 | 1,9 | 2,6 | 2,7 | 1,3 | 400 | 2,0 | 1,5 | 6 |
| 7 | 920 | 630 | 160 | 740 | 2,7 | 2,0 | 2,6 | 1,4 | 440 | 2,5 | 2,0 | 7 |
| 8 | 840 | 500 | 490 | 550 | 1,5 | 2,8 | 2,1 | 2,5 | 480 | 3,0 | 2,5 | 8 |
| 9 | 990 | 110 | 90 | 470 | 1,6 | 2,4 | 2,9 | 2,2 | 520 | 1,5 | 3,0 | 9 |
| 10 | 340 | 390 | 890 | 330 | 1,7 | 2,3 | 2,3 | 3,0 | 560 | 2,0 | 3,5 | 10 |
| 11 | 820 | 290 | 800 | 90 | 2,2 | 2,4 | 3,1 | 1,8 | 600 | 2,5 | 1,5 | 11 |
| 12 | 380 | 720 | 720 | 850 | 2,5 | 3,2 | 2,1 | 1,9 | 200 | 3,0 | 2,0 | 12 |
| 13 | 960 | 630 | 580 | 800 | 3,3 | 2,6 | 2,0 | 1,3 | 240 | 1,5 | 2,5 | 13 |
| 14 | 360 | 940 | 300 | 530 | 1,4 | 1,4 | 2,7 | 1,9 | 280 | 2,0 | 3,0 | 14 |
| 15 | 70 | 590 | 790 | 800 | 1,5 | 1,8 | 1,5 | 2,8 | 320 | 2,5 | 3,5 | 15 |
| 16 | 460 | 510 | 960 | 840 | 1,6 | 1,7 | 2,9 | 1,6 | 360 | 3,0 | 1,5 | 16 |
| 17 | 680 | 630 | 740 | 680 | 1,6 | 3,0 | 1,7 | 1,7 | 400 | 1,5 | 2,0 | 17 |
| 18 | 670 | 880 | 30 | 270 | 3,1 | 1,8 | 1,5 | 1,8 | 440 | 2,0 | 2,5 | 18 |
| 19 | 380 | 200 | 760 | 370 | 1,9 | 3,2 | 1,4 | 1,9 | 480 | 2,5 | 3,0 | 19 |
| 20 | 770 | 510 | 830 | 260 | 2,0 | 2,0 | 3,3 | 1,3 | 520 | 3,0 | 3,5 | 20 |
| 21 | 760 | 750 | 160 | 190 | 2,2 | 3,3 | 2,1 | 1,4 | 560 | 1,5 | 1,5 | 21 |
| 22 | 320 | 840 | 670 | 440 | 2,2 | 3,2 | 1,5 | 2,2 | 600 | 2,0 | 2,0 | 22 |
| 23 | 390 | 720 | 270 | 960 | 2,3 | 1,6 | 2,3 | 3,1 | 200 | 2,5 | 2,5 | 23 |
| 24 | 910 | 310 | 870 | 470 | 1,7 | 2,4 | 3,0 | 2,4 | 240 | 3,0 | 3,0 | 24 |
| 25 | 840 | 540 | 380 | 810 | 2,5 | 1,8 | 2,9 | 2,5 | 280 | 1,5 | 3,5 | 25 |
| 26 | 160 | 350 | 720 | 470 | 2,5 | 2,6 | 1,9 | 2,8 | 320 | 2,0 | 1,5 | 26 |
| 27 | 660 | 660 | 800 | 510 | 2,6 | 2,7 | 2,7 | 2,0 | 360 | 2,5 | 2,0 | 1 |
| 28 | 450 | 410 | 540 | 420 | 1,5 | 2,4 | 3,6 | 1,8 | 400 | 1,5 | 1,5 | 1 |
| 29 | 430 | 510 | 840 | 350 | 1,9 | 2,8 | 3,5 | 1,7 | 440 | 2,0 | 2,0 | 2 |

Окончание табл. 1

| № п/п | Сила, кН | | | | Длина участка, м | | | | $\sigma_т$, МПа | $n_т$ | $k = S_m/S_x$ | Номер схемы |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $P_1$ | $P_2$ | $P_3$ | $P_4$ | $L_1$ | $L_2$ | $L_3$ | $L_4$ | | | | |
| 30 | 520 | 900 | 620 | 820 | 2,3 | 2,4 | 3,0 | 2,2 | 480 | 2,5 | 2,5 | 3 |
| 31 | 690 | 500 | 790 | 740 | 2,7 | 2,0 | 2,6 | 2,6 | 520 | 3,0 | 3,0 | 4 |
| 32 | 860 | 240 | 260 | 490 | 3,1 | 1,6 | 2,3 | 2,4 | 560 | 1,5 | 3,5 | 5 |
| 33 | 990 | 60 | 930 | 580 | 3,5 | 2,1 | 2,7 | 1,8 | 600 | 2,0 | 1,5 | 6 |
| 34 | 30 | 870 | 740 | 280 | 2,9 | 2,7 | 1,9 | 2,3 | 200 | 2,5 | 2,0 | 7 |
| 35 | 900 | 610 | 570 | 60 | 2,3 | 2,1 | 1,3 | 1,7 | 240 | 3,0 | 2,5 | 8 |
| 36 | 360 | 200 | 350 | 470 | 2,5 | 1,6 | 2,9 | 2,3 | 280 | 1,5 | 3,0 | 9 |
| 37 | 940 | 560 | 980 | 660 | 1,8 | 2,5 | 1,9 | 2,0 | 320 | 2,0 | 3,5 | 10 |
| 38 | 990 | 620 | 370 | 840 | 2,7 | 2,4 | 3,2 | 1,6 | 360 | 2,5 | 1,5 | 11 |
| 39 | 650 | 310 | 430 | 890 | 3,0 | 1,7 | 1,8 | 2,4 | 400 | 3,0 | 2,0 | 12 |
| 40 | 870 | 560 | 80 | 360 | 1,6 | 1,6 | 2,2 | 2,2 | 440 | 1,5 | 2,5 | 13 |
| 41 | 580 | 280 | 210 | 540 | 2,8 | 2,1 | 2,0 | 3,3 | 480 | 2,0 | 3,0 | 14 |
| 42 | 720 | 410 | 750 | 290 | 1,5 | 2,4 | 2,7 | 1,8 | 520 | 2,5 | 3,5 | 15 |
| 43 | 240 | 860 | 590 | 420 | 1,9 | 2,4 | 2,3 | 2,6 | 560 | 3,0 | 1,5 | 16 |
| 44 | 70 | 570 | 650 | 450 | 2,0 | 3,1 | 2,5 | 1,9 | 600 | 1,5 | 2,0 | 17 |
| 45 | 160 | 450 | 830 | 680 | 1,4 | 2,1 | 2,3 | 2,5 | 200 | 2,0 | 2,5 | 18 |
| 46 | 450 | 430 | 400 | 470 | 3,2 | 2,2 | 2,6 | 2,1 | 240 | 2,5 | 3,0 | 19 |
| 47 | 870 | 440 | 190 | 330 | 3,0 | 1,4 | 2,3 | 2,2 | 280 | 3,0 | 3,5 | 20 |
| 48 | 370 | 390 | 190 | 740 | 2,2 | 1,7 | 1,8 | 2,4 | 320 | 1,5 | 1,5 | 21 |
| 49 | 890 | 210 | 920 | 260 | 2,2 | 2,4 | 2,5 | 1,6 | 360 | 2,0 | 2,0 | 22 |
| 50 | 350 | 820 | 330 | 210 | 2,7 | 2,3 | 2,3 | 2,6 | 200 | 2,5 | 2,5 | 23 |
| 51 | 710 | 150 | 300 | 570 | 1,5 | 2,6 | 2,4 | 2,2 | 240 | 3,0 | 3,0 | 24 |
| 52 | 900 | 110 | 730 | 680 | 2,4 | 2,7 | 2,1 | 2,5 | 280 | 1,5 | 3,5 | 25 |
| 53 | 860 | 630 | 550 | 730 | 2,8 | 2,0 | 2,6 | 2,3 | 320 | 2,0 | 1,5 | 26 |
| 54 | 520 | 40 | 640 | 600 | 1,9 | 2,7 | 2,9 | 2,2 | 360 | 2,5 | 2,0 | 13 |
| 55 | 830 | 760 | 920 | 820 | 2,8 | 1,8 | 3,0 | 2,1 | 400 | 3,0 | 2,5 | 14 |
| 56 | 720 | 730 | 300 | 250 | 2,0 | 2,9 | 1,7 | 3,1 | 440 | 1,5 | 3,0 | 1 |
| 57 | 120 | 860 | 670 | 500 | 1,9 | 3,2 | 3,0 | 1,6 | 480 | 2,0 | 3,5 | 2 |
| 58 | 980 | 80 | 940 | 390 | 2,8 | 3,3 | 1,5 | 3,1 | 520 | 2,5 | 1,5 | 3 |
| 59 | 240 | 60 | 20 | 540 | 2,4 | 1,4 | 3,2 | 2,6 | 560 | 3,0 | 2,0 | 4 |
| 60 | 820 | 300 | 790 | 130 | 1,3 | 3,3 | 2,5 | 2,7 | 600 | 1,5 | 2,5 | 5 |
| 61 | 450 | 340 | 220 | 210 | 2,7 | 2,3 | 2,3 | 2,6 | 200 | 2,5 | 2,5 | 23 |
| 62 | 440 | 360 | 240 | 570 | 1,5 | 2,6 | 2,4 | 2,2 | 240 | 3,0 | 3,0 | 24 |
| 63 | 470 | 370 | 260 | 680 | 2,4 | 2,7 | 2,1 | 2,5 | 280 | 1,5 | 3,5 | 25 |
| 64 | 580 | 380 | 270 | 730 | 2,8 | 2,0 | 2,6 | 2,3 | 320 | 2,0 | 1,5 | 26 |
| 65 | 600 | 390 | 280 | 600 | 1,9 | 2,7 | 2,9 | 2,2 | 360 | 2,5 | 2,0 | 13 |
| 66 | 670 | 450 | 290 | 820 | 2,8 | 1,8 | 3,0 | 2,1 | 400 | 3,0 | 2,5 | 14 |
| 67 | 770 | 550 | 300 | 250 | 2,0 | 2,9 | 1,7 | 3,1 | 440 | 1,5 | 3,0 | 1 |
| 68 | 800 | 570 | 310 | 500 | 1,9 | 3,2 | 3,0 | 1,6 | 480 | 2,0 | 3,5 | 2 |
| 69 | 870 | 580 | 320 | 390 | 2,8 | 3,3 | 1,5 | 3,1 | 520 | 2,5 | 1,5 | 3 |
| 70 | 900 | 590 | 330 | 540 | 2,4 | 1,4 | 3,2 | 2,6 | 560 | 3,0 | 2,0 | 4 |
| 71 | 340 | 600 | 390 | 130 | 1,3 | 3,3 | 2,5 | 2,7 | 600 | 1,5 | 2,5 | 5 |

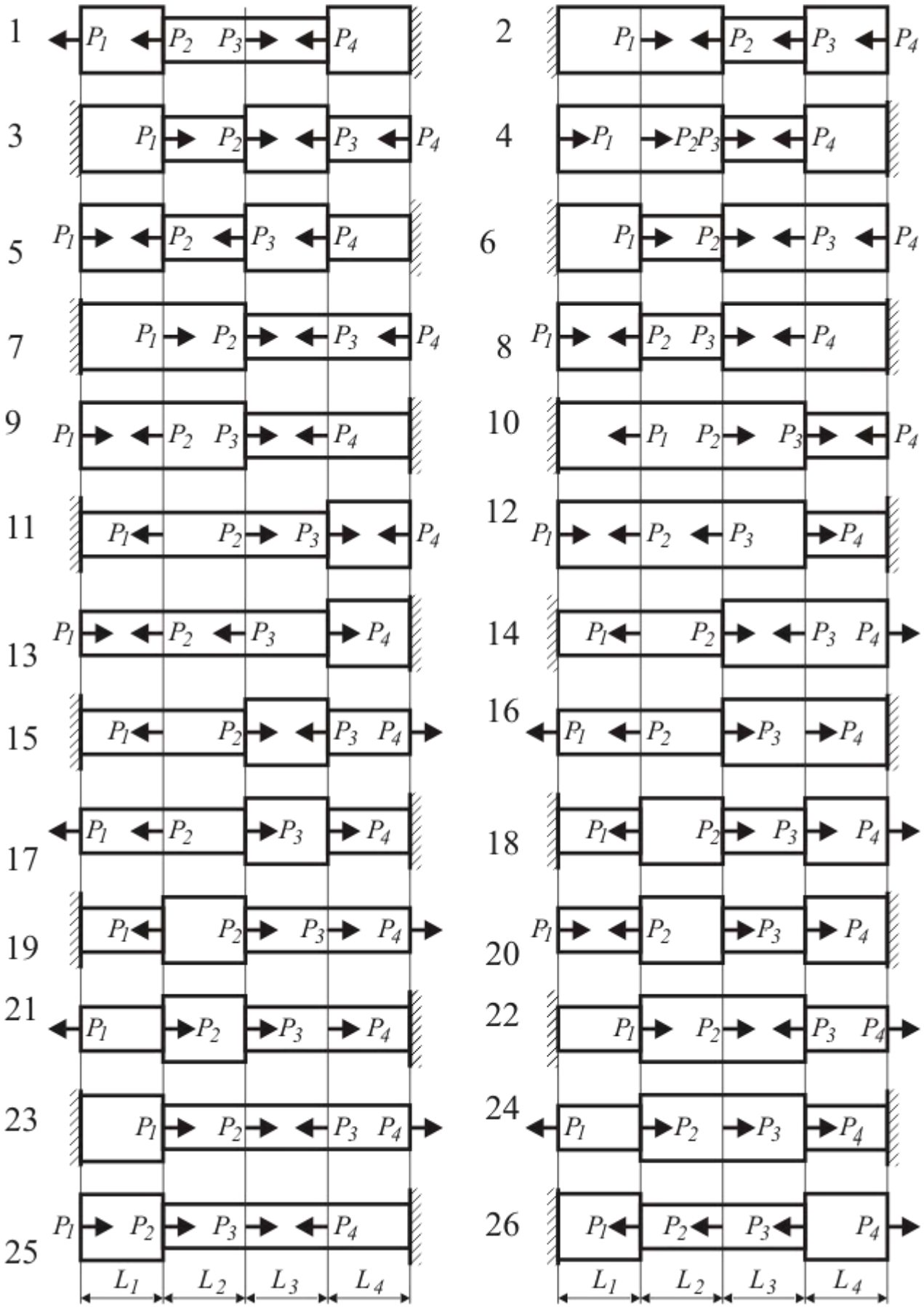



Рис. 1. Расчетная схема стержня

## ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ № 1

Стальной стержень нагружен в сечениях 1 – 4 осевыми силами $P_1 = 600$ кН, $P_2 = 900$ кН, $P_3 = 600$ кН, $P_4 = 900$ кН и заделан в сечении 5 (рис. 2, *а*). Длины участков равны: $L_1 = 0{,}75$ м, $L_2 = 1{,}25$ м, $L_3 = 1{,}75$ м, $L_4 = 2{,}25$ м. Выбрать из условия прочности площади поперечных сечений при дополнительном (конструктивно-технологическом) требовании, чтобы отношение площадей толстого и худого участков равнялось $k = S_m/S_x = 2{,}5$. Построить эпюры: осевой силы *N*; нормальных напряжений σ и продольных перемещений Δ. Модуль упругости *E* = 200000 МПа. Предел текучести стали $\sigma_m = 360$ МПа. Коэффициент запаса прочности по пределу текучести $n_m = 1{,}5$.

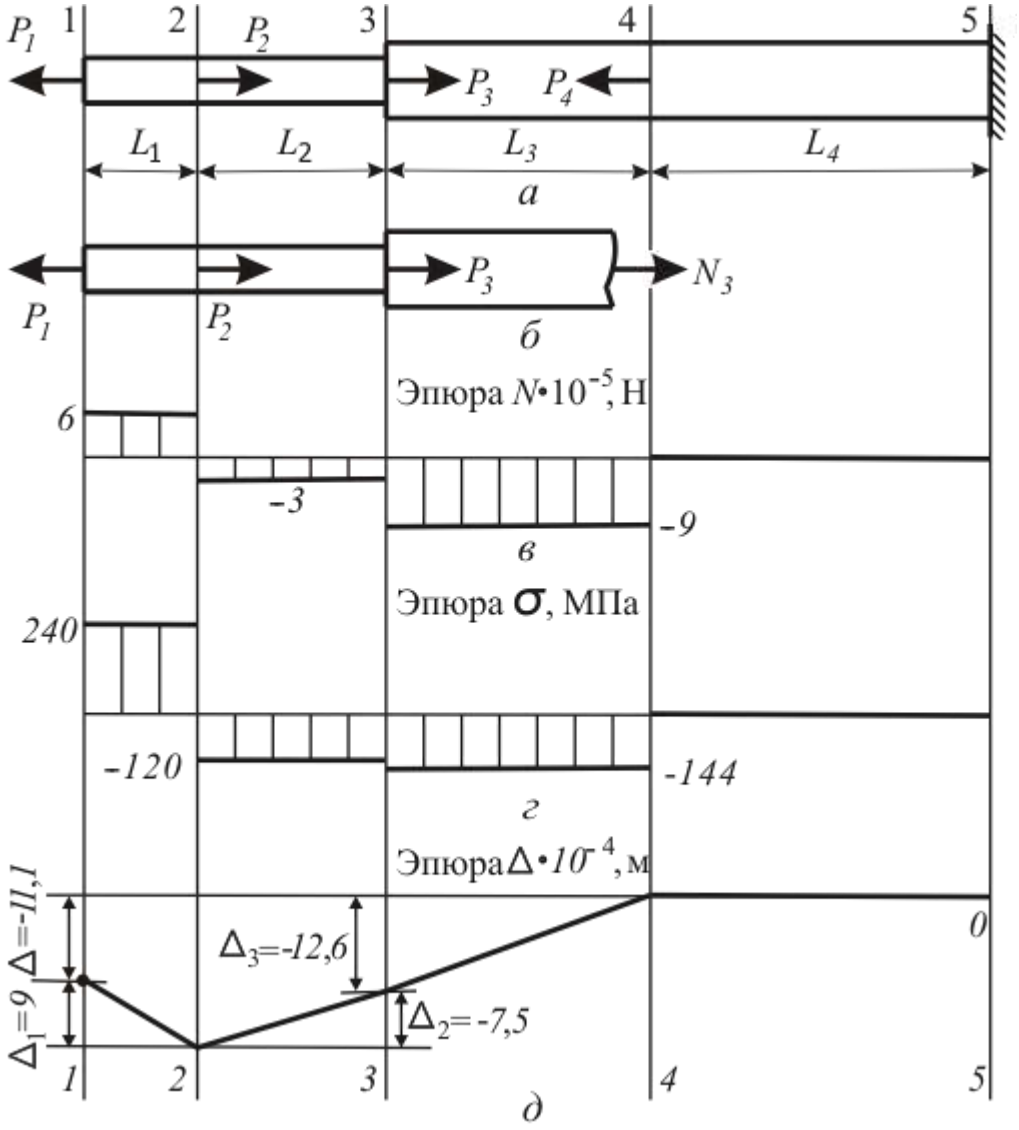



Рис. 2. Эпюры продольных сил, напряжений и перемещений

## РЕШЕНИЕ

1. Силы переводим в ньютоны [Н]: $P_1 = 6 \cdot 10^5$; $N_2 = 9 \cdot 10^5$; $N_3 = 6 \cdot 10^5$; $N_4 = 9 \cdot 10^5$.

2. Модуль упругости $E$ и предел текучести $\sigma_m$ переводим в паскали [Па]:

$$E = 2 \cdot 10^{11}\,; \sigma_m = 3{,}6 \cdot 10^8.$$

3. Допускаемые напряжения [σ]:

$$[\sigma] = \sigma_m / n_m = 3{,}6 \cdot 10^8 / 1{,}5 = \ 2{,}4 \cdot 10^8 \text{ [Па]}.$$

4. Строим эпюру осевых сил методом сечений. Разрезаем стержень на участке $i$. Из двух полученных кусков выбираем свободный незакреплённый. В нашем случае свободен левый кусок. В разрезанном сечении прикладываем положительную растягивающую осевую силу $N_i$. Положительная осевая сила направлена наружу из отрезанного куска. Величину $N_i$ находим из условия равенства нулю алгебраической суммы $N_i$ и сил $P_i$, приложенных к левому куску разрезанного стержня.

Пусть $i = 3$. На левый кусок действуют силы $P_1$ – $P_3$ и осевая сила $N_3$, приложенная в сечении (рис. 2, *б*). Из уравнения равновесия левого куска $N_3 + P_3 + P_2 - P_1 = 0$, находим $N_3 = -P_3 - P_2 + P_1 = -6 \cdot 10^5 - 9 \cdot 10^5 + 6 \cdot 10^5 = -9 \cdot 10^5$ [Н]. Знак «минус» указывает, что сила $N_3$ направлена внутрь куска (в сторону, обратную изначально выбранной). Участок 3 сжат. Найденное значение осевой силы откладываем на эпюре осевых сил. Для этого: отмечаем на оси абсцисс координату сечения, через неё проводим нормаль, и на нормали откладываем в выбранном масштабе значение $N_3 = -9 \cdot 10^5$ [Н] (рис. 2, *в*). Уравнение равновесия левого куска не зависит от положения сечения, в котором разрезан участок 3. Следовательно, осевая сила сохраняет постоянное значение в любом нормальном сечении участка 3. Через точку с ординатой $N_3 = -9 \cdot 10^5$ между вертикалями 3 и 4 проводим прямую, параллельную оси стержня.

5. Для других участков получаем: $N_1 = 6 \cdot 10^5$ [Н]; $N_2 = -3 \cdot 10^5$ [Н]; $N_3 = -9 \cdot 10^5$ [Н]; $N_4 = 0$ [Н]. Эпюра осевых сил дана на рис. 2, *г*.

6. По эпюре осевых сил находим наибольшие по модулю осевые силы, действующие на толстом и тонком участках

$$N_m = \max\{|N_3|, N_4\} = \max\{|-9 \cdot 10^5|, 0\} = 9 \cdot 10^5 \text{ [Н]},$$
$$N_x = \max\{N_1, |N_2|\} = \max\{6 \cdot 10^5, |-3 \cdot 10^5|\} = 6 \cdot 10^5 \text{ [Н]}.$$

7. Необходимая по условию прочности площадь толстого участка

$$S_{\sigma m} = N_m / [\sigma] = \ 9 \cdot 10^5 / 2{,}4 \cdot 10^8 = 3{,}75 \cdot 10^{-3} \text{ [м}^2\text{]},$$

необходимая по условию прочности площадь тонкого участка

$$S_{\sigma x} = N_x / [\sigma] = \ 6 \cdot 10^5 / 2{,}4 \cdot 10^8 = 2{,}5 \cdot 10^{-3} \text{ [м}^2\text{]}.$$

8. Выполнить конструктивные требования можно двумя способами:

*способ 1:* для толстого участка взять площадь $S_{\sigma m}$, необходимую по условию прочности, для тонкого участка взять площадь толстого, уменьшенную в $k$ раз, $S_{kx} = S_{\sigma m}/k = 3{,}75 \cdot 10^{-3}/2{,}5 = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ [м$^2$];

*способ 2:* для тонкого участка взять площадь $S_{\sigma x}$, необходимую по условию прочности, для толстого участка взять площадь тонкого, увеличенную в $k$ раз, $S_{km} = k\,S_{\sigma x} = 2{,}5 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-3} = 6{,}25 \cdot 10^{-3}$ [м$^2$].

В первом случае площадь тонкого участка, взятая из конструктивных требований, меньше площади, необходимой по условию прочности.

$$S_{kx} = 1{,}5 \cdot 10^{-3} < S_{\sigma x} = 2{,}5 \cdot 10^{-3}.$$

При первом способе не выполнено условие прочности для тонкого участка. Во втором случае конструктивная площадь толстого участка больше площади, необходимой по условию прочности

$$S_{km} = k\,S_{\sigma x} = 2{,}5 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-3} > S_{\sigma m} = 6{,}25 \cdot 10^{-3}.$$

При втором способе условие прочности выполнено. Назначаем площади

$$S_x = 2{,}5 \cdot 10^{-3}\ [\text{м}^2];\ S_m = 6{,}25 \cdot 10^{-3}\ [\text{м}^2].$$

9. Напряжения, действующие на участке $i$, определяем по формуле

$$\sigma_i = N_i/S_{x(m)}.$$

где $N_i$ – значение осевой силы на участке $i$, взятое со своим знаком с эпюры $N$ (рис. 2, *г*) ; $S_{x(m)}$ – назначенная площадь участка.

Пусть $i = 3$, $N_3 = -9 \cdot 10^5$ [Н], $S_m = 6{,}25 \cdot 10^{-3}$ [м$^2$]. Напряжения равны

$$\sigma_3 = N_3/S_ж = -9 \cdot 10^5/6{,}25^{-3} = -1{,}44 \cdot 10^8\ [\text{Н/м}^2].$$

10. На остальных участках напряжения равны:

$$\sigma_1 = N_1/S_x = 6 \cdot 10^5/(2{,}5 \cdot 10^{-3}) = 2{,}4 \cdot 10^8\ [\text{Н/м}^2];$$
$$\sigma_2 = N_2/S_x = -3 \cdot 10^5/6{,}25^{-3} = -1{,}2 \cdot 10^8\ [\text{Н/м}^2];$$
$$\sigma_4 = N_4/S_ж = 0/6{,}25^{-3} = 0\ [\text{Н/м}^2].$$

Эпюра напряжений построена на рис. 2, *д*.

11. Удлинение $\Delta_i$ [м] участка $i$ определяем по формуле

$$\Delta_i = N_i\,L_i/(E\,S_{x(m)}).$$

Получаем:

$$\Delta_1 = N_1\,L_1/(E\,S_x) = 6 \cdot 10^5 \cdot 0{,}75/(2 \cdot 10^{11} \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-3}) = 9{,}00 \cdot 10^{-4};$$
$$\Delta_2 = N_2\,L_2/(E\,S_x) = -3 \cdot 10^5 \cdot 1{,}25/(2 \cdot 10^{11} \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-3}) = -7{,}50 \cdot 10^{-4};$$
$$\Delta_3 = N_3\,L_3/(E\,S_ж) = -9 \cdot 10^5 \cdot 1{,}75/(2 \cdot 10^{11} \cdot 6{,}25 \cdot 10^{-3}) = -1{,}26 \cdot 10^{-3};$$
$$\Delta_4 = N_4\,L_4/(E\,S_ж) = 0 \cdot 1{,}75/(2 \cdot 10^{11} \cdot 6{,}25 \cdot 10^{-3}) = 0.$$

12. Строим эпюру перемещений. Сечение 5, в котором стержень защемлён, неподвижно. Проводим ось стержня $Z$ и отмечаем как 0 точку её пересечения с вертикалью 5. На вертикали 4 следует отложить вверх в принятом масштабе удлинение $\Delta_4$ участка 4. Поскольку $\Delta_4 = 0$, сечение 4 не смещается. Отмечаем точку пересечения оси $Z$ с вертикалью 4. Соединяем

жирной линией нули вертикалей 5 и 4.

Участок 3 сжался на $\Delta_3 = -1{,}26 \cdot 10^{-3}$ м. На вертикали 3 откладываем вниз из точки её пересечения с осью $Z$ отрезок $\Delta_3$. Соединяем конец этого отрезка с нулём вертикали 4.

Участок 2 укоротился на $\Delta_2 = -7{,}5 \cdot 10^{-4}$. На вертикали 2 из точки с ординатой $\Delta_3$ откладываем вниз отрезок $\Delta_2$. Ордината полученного отрезка равна $\Delta_2 + \Delta_3 = -7{,}5 \cdot 10^{-4} - 1{,}26 \cdot 10^{-3} = -2{,}01 \cdot 10^{-3}$ м. Соединяем прямой концы отрезков, отложенных на вертикалях 2 и 3.

Участок 1 удлинился на $\Delta_1 = 9{,}00 \cdot 10^{-4}$. Проектируем на вертикаль 1 отрезок, построенный на вертикали 2, из конца проекции откладываем вверх отрезок $\Delta_1$. Длина отрезка, построенного на вертикали 1, будет $\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 = 9 \cdot 10^{-4} - 7{,}5 \cdot 10^{-4} - 1{,}26 \cdot 10^{-3} + 0 = -1{,}11 \cdot 10^{-3}$. Соединяем между собой концы отрезков, построенных на вертикалях 1 и 2 (рис. 2, *д*).

## Задача № 2. Расчёт вала на кручение и жёсткость

Стальной вал, на котором жестко закреплены 5 шкивов (рис. 3, *а*), вращается со скоростью $n$ [об/мин]. Нумерация шкивов – слева направо. Участку вала между шкивами присвоен номер левого шкива. Участки 1 и 4 имеют одинаковое круглое поперечное сечение, участки 2 и 3 — кольцевое. Отношение внутреннего диаметра кольца к наружному равно $\delta = 0{,}65$. На шкив 3 подана мощность $N_3$ [кВт]. Шкивы 1, 2, 4, 5 отбирают мощности (кВт): $N_1, N_2, N_4, N_5$. Выбрать диаметры участков стального вала из условия прочности по допускаемому касательному напряжению $[\tau]$ и условия жёсткости по допускаемому относительному углу закручивания $[\theta^\circ]$. Построить эпюру углов закручивания вала. Длины участков ($L_1 - L_4$,) в [м] заданы. Модуль сдвига стали равен $G = 80000$ МПа.

Таблица 2

**Исходные данные к задаче № 2**

| № п/п | $n$, $\frac{\text{об}}{\text{мин}}$ | $\delta$ | Мощность, кВт | | | | | Длина участка, м | | | | $[\tau]$, МПа | $[\theta^\circ]$, $\frac{\text{град}}{\text{м}}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $N_1$ | $N_2$ | $N_3$ | $N_4$ | $N_5$ | $L_1$ | $L_2$ | $L_3$ | $L_4$ | | |
| 1 | 120 | 0,40 | 3 | 5 | 15 | 4 | 3 | 0,75 | 2,00 | 0,75 | 2,00 | 30 | 0,25 |
| 2 | 160 | 0,45 | 4 | 7 | 20 | 6 | 3 | 1,00 | 2,25 | 1,00 | 1,75 | 40 | 0,50 |
| 3 | 200 | 0,50 | 4 | 7 | 25 | 8 | 6 | 1,25 | 2,50 | 1,25 | 1,50 | 50 | 0,75 |
| 4 | 240 | 0,55 | 7 | 8 | 30 | 9 | 6 | 1,50 | 0,75 | 1,50 | 1,25 | 60 | 1,00 |
| 5 | 280 | 0,60 | 8 | 11 | 35 | 9 | 7 | 1,75 | 1,00 | 1,75 | 1,00 | 70 | 1,25 |
| 6 | 320 | 0,65 | 8 | 13 | 40 | 10 | 9 | 2,00 | 1,25 | 2,00 | 0,75 | 80 | 1,50 |
| 7 | 360 | 0,70 | 9 | 15 | 45 | 13 | 8 | 2,25 | 1,50 | 0,75 | 2,00 | 90 | 1,75 |
| 8 | 400 | 0,75 | 9 | 16 | 50 | 17 | 8 | 2,50 | 1,75 | 1,00 | 1,75 | 100 | 2,00 |
| 9 | 440 | 0,80 | 10 | 17 | 55 | 16 | 12 | 2,75 | 2,00 | 1,25 | 1,50 | 110 | 2,25 |
| 10 | 480 | 0,85 | 12 | 18 | 60 | 22 | 8 | 0,75 | 2,25 | 1,50 | 1,25 | 120 | 2,50 |
| 11 | 520 | 0,90 | 12 | 24 | 65 | 16 | 13 | 1,00 | 2,50 | 1,75 | 1,00 | 130 | 2,75 |
| 12 | 560 | 0,95 | 16 | 22 | 70 | 19 | 13 | 1,25 | 0,75 | 2,00 | 0,75 | 30 | 3,00 |
| 13 | 600 | 0,40 | 18 | 25 | 75 | 20 | 12 | 1,50 | 1,00 | 2,25 | 2,00 | 40 | 3,25 |
| 14 | 640 | 0,45 | 16 | 22 | 80 | 28 | 14 | 1,75 | 1,25 | 0,75 | 1,75 | 50 | 3,50 |
| 15 | 680 | 0,50 | 18 | 26 | 85 | 24 | 17 | 2,00 | 1,50 | 1,00 | 1,50 | 60 | 3,75 |
| 16 | 120 | 0,55 | 18 | 30 | 90 | 25 | 17 | 2,25 | 1,75 | 1,25 | 1,25 | 70 | 4,00 |
| 17 | 160 | 0,60 | 19 | 30 | 95 | 25 | 21 | 2,50 | 2,00 | 1,50 | 1,00 | 80 | 0,25 |
| 18 | 200 | 0,65 | 3 | 5 | 15 | 4 | 3 | 2,75 | 2,25 | 1,75 | 0,75 | 90 | 0,50 |
| 19 | 240 | 0,70 | 4 | 7 | 20 | 6 | 3 | 0,75 | 2,50 | 2,00 | 2,00 | 100 | 0,75 |
| 20 | 280 | 0,75 | 4 | 7 | 25 | 8 | 6 | 1,00 | 0,75 | 2,25 | 1,75 | 110 | 1,00 |
| 21 | 320 | 0,80 | 7 | 8 | 30 | 9 | 6 | 1,25 | 1,00 | 0,75 | 1,50 | 120 | 1,25 |
| 22 | 360 | 0,85 | 8 | 11 | 35 | 9 | 7 | 1,50 | 1,25 | 1,00 | 1,25 | 130 | 1,50 |
| 23 | 400 | 0,90 | 8 | 13 | 40 | 10 | 9 | 1,75 | 1,50 | 1,25 | 1,00 | 30 | 1,75 |
| 24 | 440 | 0,95 | 9 | 15 | 45 | 13 | 8 | 2,00 | 1,75 | 1,50 | 0,75 | 40 | 2,00 |
| 25 | 480 | 0,40 | 9 | 16 | 50 | 17 | 8 | 2,25 | 2,00 | 1,75 | 2,00 | 50 | 2,25 |
| 26 | 520 | 0,45 | 10 | 17 | 55 | 16 | 12 | 2,50 | 2,25 | 2,00 | 1,75 | 60 | 2,50 |

Окончание табл. 2

| № п/п | $n$, об/мин | δ | Мощность, кВт | | | | | Длина участка, м | | | | [τ], МПа | $[\theta^{\circ}]$, град/м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $N_1$ | $N_2$ | $N_3$ | $N_4$ | $N_5$ | $L_1$ | $L_2$ | $L_3$ | $L_4$ | | |
| 27 | 560 | 0,50 | 12 | 18 | 60 | 22 | 8 | 2,75 | 2,50 | 2,25 | 1,50 | 70 | 2,75 |
| 28 | 600 | 0,55 | 12 | 24 | 65 | 16 | 13 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 1,25 | 80 | 3,00 |
| 29 | 640 | 0,60 | 16 | 22 | 70 | 19 | 13 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 90 | 3,25 |
| 30 | 680 | 0,65 | 18 | 25 | 75 | 20 | 12 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 0,75 | 100 | 3,50 |
| 31 | 120 | 0,70 | 16 | 22 | 80 | 28 | 14 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 2,00 | 110 | 3,75 |
| 32 | 160 | 0,75 | 18 | 26 | 85 | 24 | 17 | 1,75 | 1,75 | 1,75 | 1,75 | 120 | 4,00 |
| 33 | 200 | 0,80 | 18 | 30 | 90 | 25 | 17 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 1,50 | 130 | 0,25 |
| 34 | 240 | 0,85 | 19 | 30 | 95 | 25 | 21 | 2,25 | 2,25 | 2,25 | 1,25 | 30 | 0,50 |
| 35 | 280 | 0,90 | 3 | 5 | 15 | 4 | 3 | 2,50 | 2,50 | 0,75 | 1,00 | 40 | 0,75 |
| 36 | 320 | 0,95 | 4 | 7 | 20 | 6 | 3 | 2,75 | 0,75 | 1,00 | 0,75 | 50 | 1,00 |
| 37 | 360 | 0,40 | 4 | 7 | 25 | 8 | 6 | 0,75 | 1,00 | 1,25 | 2,00 | 60 | 1,25 |
| 38 | 400 | 0,45 | 7 | 8 | 30 | 9 | 6 | 1,00 | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 70 | 1,50 |
| 39 | 440 | 0,50 | 8 | 11 | 35 | 9 | 7 | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 1,50 | 80 | 1,75 |
| 40 | 480 | 0,55 | 8 | 13 | 40 | 10 | 9 | 1,50 | 1,75 | 2,00 | 1,25 | 90 | 2,00 |
| 41 | 520 | 0,60 | 9 | 15 | 45 | 13 | 8 | 1,75 | 2,00 | 2,25 | 1,00 | 100 | 2,25 |
| 42 | 560 | 0,65 | 9 | 16 | 50 | 17 | 8 | 2,00 | 2,25 | 0,75 | 0,75 | 110 | 2,50 |
| 43 | 600 | 0,70 | 10 | 17 | 55 | 16 | 12 | 2,25 | 2,50 | 1,00 | 2,00 | 120 | 2,75 |
| 44 | 640 | 0,75 | 12 | 18 | 60 | 22 | 8 | 2,50 | 0,75 | 1,25 | 1,75 | 130 | 3,00 |
| 45 | 680 | 0,80 | 12 | 24 | 65 | 16 | 13 | 2,75 | 1,00 | 1,50 | 1,50 | 30 | 3,25 |
| 46 | 120 | 0,85 | 16 | 22 | 70 | 19 | 13 | 0,75 | 1,25 | 1,75 | 1,25 | 40 | 3,50 |
| 47 | 160 | 0,90 | 18 | 25 | 75 | 20 | 12 | 1,00 | 1,50 | 2,00 | 1,00 | 50 | 3,75 |
| 48 | 200 | 0,95 | 16 | 22 | 80 | 28 | 14 | 1,25 | 1,75 | 2,25 | 0,75 | 60 | 4,00 |
| 49 | 240 | 0,40 | 18 | 26 | 85 | 24 | 17 | 1,50 | 2,00 | 0,75 | 2,00 | 70 | 0,25 |
| 50 | 280 | 0,45 | 18 | 30 | 90 | 25 | 17 | 1,75 | 2,25 | 1,00 | 1,75 | 80 | 0,50 |
| 51 | 320 | 0,50 | 19 | 30 | 95 | 25 | 21 | 2,00 | 2,50 | 1,25 | 1,50 | 90 | 0,75 |
| 52 | 360 | 0,55 | 3 | 5 | 15 | 4 | 3 | 2,25 | 0,75 | 1,50 | 1,25 | 100 | 1,00 |
| 53 | 400 | 0,60 | 4 | 7 | 20 | 6 | 3 | 2,50 | 1,00 | 1,75 | 1,00 | 110 | 1,25 |
| 54 | 440 | 0,65 | 4 | 7 | 25 | 8 | 6 | 2,75 | 1,25 | 2,00 | 0,75 | 120 | 1,50 |
| 55 | 480 | 0,70 | 7 | 8 | 30 | 9 | 6 | 0,75 | 1,50 | 2,25 | 2,00 | 130 | 1,75 |
| 56 | 520 | 0,75 | 8 | 11 | 35 | 9 | 7 | 1,00 | 1,75 | 0,75 | 1,75 | 30 | 2,00 |
| 57 | 560 | 0,80 | 8 | 13 | 40 | 10 | 9 | 1,25 | 2,00 | 1,00 | 1,50 | 40 | 2,25 |
| 58 | 600 | 0,85 | 9 | 15 | 45 | 13 | 8 | 1,50 | 2,25 | 1,25 | 1,25 | 50 | 2,50 |
| 59 | 640 | 0,90 | 9 | 16 | 50 | 17 | 8 | 1,75 | 2,50 | 1,50 | 1,00 | 60 | 2,75 |
| 60 | 680 | 0,95 | 10 | 17 | 55 | 16 | 12 | 2,00 | 0,75 | 1,75 | 0,75 | 70 | 3,00 |
| 61 | 120 | 0,40 | 13 | 22 | 60 | 16 | 9 | 2,00 | 2,25 | 1,00 | 2,25 | 80 | 3,25 |
| 62 | 160 | 0,45 | 11 | 21 | 65 | 23 | 10 | 1,75 | 2,50 | 1,25 | 0,75 | 90 | 3,50 |
| 63 | 200 | 0,50 | 15 | 19 | 70 | 23 | 13 | 1,50 | 2,75 | 1,50 | 1,00 | 100 | 3,75 |
| 64 | 240 | 0,55 | 14 | 21 | 75 | 25 | 15 | 1,25 | 0,75 | 1,75 | 1,25 | 110 | 4,00 |

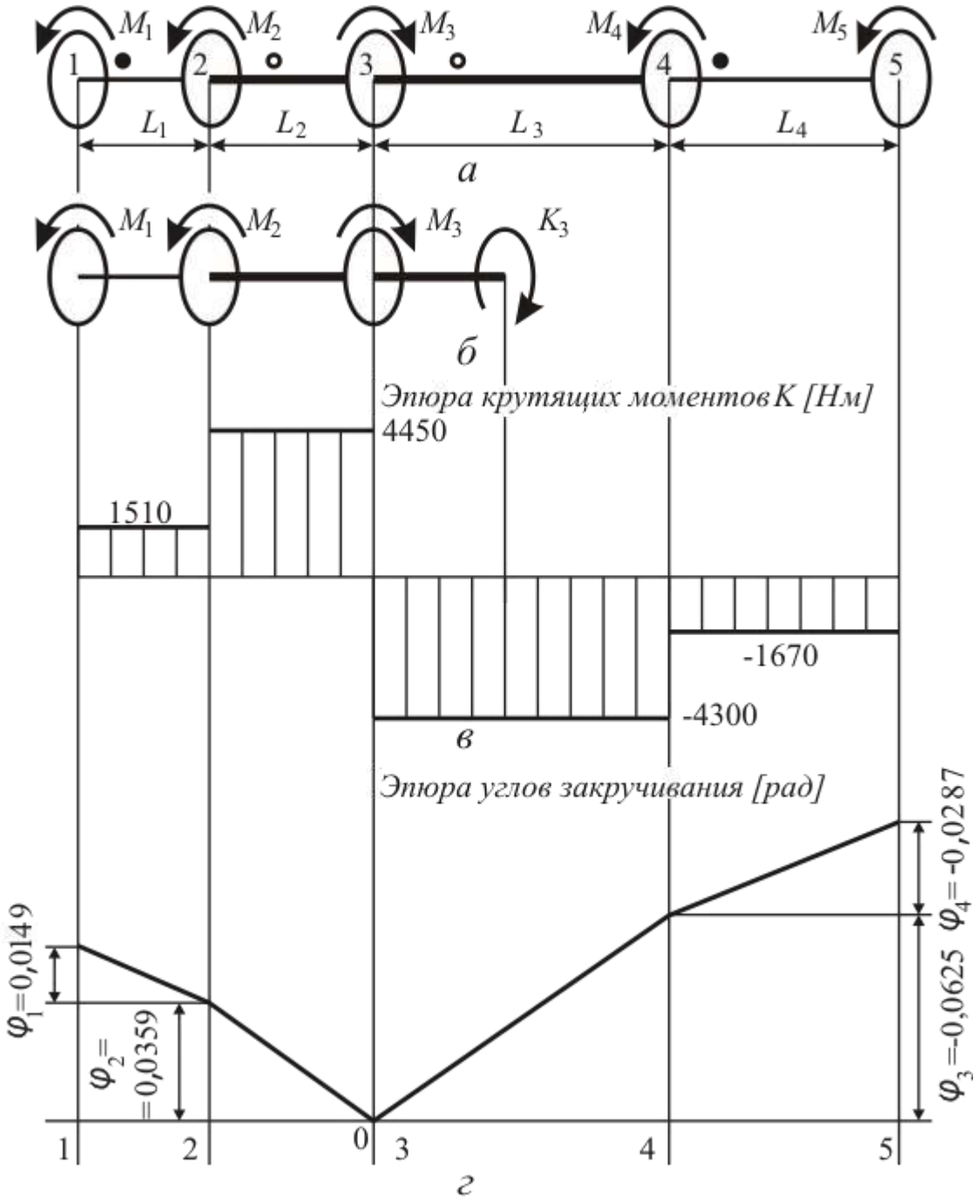



Рис. 3. Расчетная схема вала, эпюры момента и углов закручивания

## ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ № 2

Стальной вал, несущий 5 шкивов (см.рис. 3, *а*), вращается со скоростью $n = 360$ об/мин. Шкивы пронумерованы слева направо. Участку вала между шкивами присвоен номер левого шкива. Участки 1 и 4 имеют одинаковое круглое сечение, участки 2 и 3 — кольцевое. Отношение внутреннего диаметра кольца к наружному равно $\delta = 0{,}65$. На шкив 3 подана мощность $N_3 = 110$ кВт. Шкивы 1, 2, 4, 5 отбирают мощности [кВт]: $N_1 = 19$, $N_2 = 37$, $N_4 = 33$, $N_5 = 21$. Выбрать диаметры участков вала из условий прочности и жёсткости, если допускаемые касательные напряжения $[\tau] = 70$ МПа, а допускаемый

относительный угол закручивания $[\theta^{\circ}] = 1{,}75$ град/м. Построить эпюру углов закручивания вала. Длины участков [м]: $L_1 = 1{,}00$; $L_2 = 1{,}25$; $L_3 = 2{,}25$; $L_4 = 1{,}75$. Модуль сдвига стали $G = 80000$ МПа.

**РЕШЕНИЕ**

1. Мощности переводим в ватты [Вт]: $N_1 = 1{,}9 \cdot 10^4$; $N_2 = 3{,}7 \cdot 10^4$; $N_3 = 1{,}1 \cdot 10^5$; $N_4 = 3{,}3 \cdot 10^4$; $N_5 = 2{,}1 \cdot 10^4$.

2. Модуль сдвига $G$ и допускаемые касательные напряжения $[\tau]$ переводим в паскали [Па]: $G = 8 \cdot 10^{10}$; $[\tau] = 7 \cdot 10^7$.

3. Допускаемый относительный угол закручивания $[\theta^{\circ}]$ задаём в [рад/м]

$$[\theta] = \pi/180\ [\theta^{\circ}] = 3{,}14/180 \cdot 1{,}75 = 0{,}0305.$$

4. Угловая скорость вала:

$$\omega = 2\pi n/60 = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 360/60 = 12{,}6 \text{ [рад/с]}.$$

5.Моменты [Н · м], приложенные к шкивам, находим по формуле

$$M_i = N_i/\omega,\ (i = 1,2,\ldots,5).$$

Получаем: $M_1 = 1510$, $M_2 = 2940$, $M_3 = -8750$, $M_4 = 2630$, $M_5 = 1670$.

6.Строим эпюру крутящих моментов методом сечений. Разрезаем вал на участке $i$, выбираем левый кусок и прикладываем в разрезанном сечении крутящий момент $K_i$, вращающий вал по ходу стрелок часов. Величину $K_i$ находим из условия равенства нулю алгебраической суммы момента $K_i$ и моментов $M_i$, приложенных к шкивам, находящимся на левом куске вала.

Пусть $i = 3$. На левый кусок действуют момент $K_3$ и моменты $M_1 - M_3$, приложенные к шкивам 1 – 3 (рис. 3, *б*). Из уравнения равновесия куска

$$K_3 + M_3 - M_2 - M_1 = 0$$

получаем

$$K_3 = -M_3 + M_2 + M_1 = -8750 + 2940 + 1510 = -4300..\text{Н} \cdot \text{м}].$$

Найденное значение крутящего момента откладываем на эпюре крутящих моментов $K$. Для этого отмечаем на оси абсцисс координату сечения и из отмеченной точки откладываем вниз перпендикулярно оси (в выбранном масштабе) значение $K_3 = -4300$. Участок 3 разрезан произвольно, поэтому полученный результат справедлив для любого выбранного на участке 3 сечения. Между вертикалями 3 и 4 через построенную точку $K_3$ проводим прямую, параллельную оси вала (рис. 3, *в*).

7. Расчётный момент для подбора диаметра круглого вала из условия прочности..$M_к = \max\{K_1, |K_4|\} = \max\{1510, |-1670|\} = 1670$..[Н· м].

Расчётный момент для подбора диаметра кольцевого вала из условия прочности..$M_m = \max\{K_2, |K_3|\} = \max\{4450, |-4300|\} = 4450$ [Н· м].

8. Диаметр круглого вала из условия прочности

$$D_{к\tau} = \sqrt[3]{16\,M_к/(\pi\,[\tau])} = (16\cdot 1670/(3{,}14\cdot 7\cdot 10^7))^{1/3} = 0{,}0576\,[\text{м}].$$

9.Диаметр круглого вала из условия жёсткости

$$D_{к\theta} = \sqrt[4]{32\,M_к/(\pi\,G\,[\theta])} = \sqrt[4]{32\cdot/(3{,}14\cdot 8\cdot 10^{10}\cdot 0{,}0305} = 0{,}0575[\text{м}].$$

Выбираем большее из чисел $D_{к\tau}$ и $D_{к\theta}$, переводим в миллиметры и округляем в большую сторону до стандартного (кратного 5 мм) значения. $D_{к\tau}\cdot 10^3 = 0{,}0576\cdot 10^3 < 60$ мм. Диаметр участков 1 и 4 выбираем равным $D_к = 60{,}0\,[\text{мм}] = 0{,}06\,[\text{м}]$.

10. Ищем полярный момент инерции круглого вала

$$J_{рк} = \pi\,D_к^4/32 = 3{,}14\cdot 0{,}06^4/32 = 1{,}27\cdot 10^{-6}\,[\text{м}^4].$$

11. Вычисляем углы закручивания [рад] участков 1 и 4 по формуле

$$\varphi_i = M_i\cdot L_i/(G\cdot J_{рк}),\quad (i = 1{,}4).$$

Получаем:

$$\varphi_1 = M_i\cdot L_i/(G\cdot J_{рк}) = 1510\cdot 1{,}00/(8\cdot 10^{10}\cdot 1{,}27\cdot 10^{-6}) = 0{,}0149,$$
$$\varphi_4 = M_1\cdot L_1/(G\cdot J_{рк}) = -1670\cdot 1{,}75/(8\cdot 10^{10}\cdot 1{,}27\cdot 10^{-6}) = -0{,}0287.$$

12. Диаметр вала кольцевого сечения из условия прочности

$$D_{m\tau} = \sqrt[3]{16\,M_m/\left(\pi\,[\tau]\left(1-\delta^4\right)\right)} =$$
$$= \left(16\cdot 4450/\left(3{,}14\cdot 7\cdot 10^7\cdot\left(1-0{,}65^4\right)\right)\right)^{1/3} = 0{,}0687\,[\text{м}].$$

13. Диаметр вала кольцевого сечения из условия жёсткости:

$$D_{m\theta} = \sqrt[4]{32\,M_m/\left(\pi\,G[\theta]\left(1-\delta^4\right)\right)} =$$
$$= \sqrt[4]{32\cdot 4450/\left(3{,}14\cdot 8\cdot 10^{10}\cdot 0{,}0305\cdot\left(1-0{,}65^4\right)\right)} = 0{,}0689\ [\text{м}].$$

14. Большее из значений $D_{m\tau}$ и $D_{m\theta}$ переводим в миллиметры и округляем в большую сторону до стандартного (кратного 5 мм) значения. $D_{m\theta}\cdot 1000 = 0{,}0689\cdot 1000 = 68{,}9 < 70$ мм. Наружный диаметр вала кольцевого сечения назначаем равным $D_m = 70{,}0\,[\text{мм}] = 0{,}07\,[\text{м}]$.

15. Внутренний диаметр кольцевого сечения вала

$$d_m = \delta\,D_m = 0{,}65\cdot 0{,}07 = 0{,}0455\,[\text{мм}].$$

16. Ищем полярный момент инерции кольцевого сечения

$$J_{pm} = \pi\,D_m^4\,(1-\delta^4)/32 = 3{,}14\cdot 0{,}07^4\cdot(1-0{,}65^4)/32 = 1{,}94\cdot 10^{-6}\,[\text{м}^4].$$

17. Вычисляем углы закручивания [рад] участков 2 и 3:

$$\varphi_2 = M_2 \cdot L_2/(G \cdot J_{p\,кр}) = 4450 \cdot 1{,}25/(8 \cdot 10^{10} \cdot 1{,}94 \cdot 10^{-6}) = 0{,}0359;$$
$$\varphi_3 = M_3 \cdot L_3/(G \cdot J_{p\,кр}) = -4300 \cdot 2{,}25/(8 \cdot 10^{10} \cdot 1{,}94 \cdot 10^{-6}) = -0{,}0625.$$

18. Строим эпюру углов закручивания вала. Вал равномерно вращается. Ведущий шкив 3 считаем условно неподвижным. Проводим ось вала $Z$ и точку её пересечения с вертикалью 3 отмечаем как 0.

На вертикали 2 откладываем вверх в принятом масштабе величину $\varphi_2$. Соединяем прямой линией точки с ординатами 0 и $\varphi_2$. На этот угол повернулся шкив 2 относительно ведущего шкива 3. Вместе со шкивом 2 на тот же угол повернулся как целое участок 1 – 2 вала со шкивом 1.

Поворот шкива 1 относительно ведущего шкива 3 складывается из поворота участка вала 1 – 2 как жёсткого целого плюс поворот из-за деформации участка 1 – 2. Проектируем на вертикаль 1 отрезок $\varphi_2$ и из его конца откладываем отрезок $\varphi_1$. Расстояние $\varphi_1 + \varphi_2$ от оси Z до конца суммарного отрезка, построенного на вертикали 1, пропорционально углу поворота шкива 1 относительно шкива 3. Концы отрезков, построенных на вертикалях 1 и 2, соединяем прямой.

Построение углов поворота дисков 4 и 5 относительно диска 3 подобно приведённому. На вертикали 4 откладываем вниз отрезок $\varphi_3$ – пропорциональный углу закручивания участка 3 – 4 вала. Конец этого отрезка соединяем прямой с нулём вертикали 3. Проектируем отрезок $\varphi_3$ на вертикаль 5 и из конца проекции откладываем вниз отрезок $\varphi_4$, пропорциональный углу закручивания участка 4 – 5 вала. Отрезок $\varphi_3 + \varphi_4$ представляет угол поворота шкива 5 относительно ведущего шкива 3. Концы отрезков на вертикалях 4 и 5 соединяем прямой. Эпюра углов закручивания вала дана на рис. 3, *г*.

## Задача № 3. Расчёт балки на прочность при изгибе

Двутавровая балка закреплена на двух опорах: подвижной в осевом направлении – правой и неподвижной – левой (рис. 4.1 – 4.4). Балка нагружена сосредоточенной нагрузкой $P$, изгибающим моментом $M$ и равномерно распределенной нагрузкой $q$. Балка работает на изгиб. Построить эпюры поперечных сил, изгибающих моментов и по заданным допускаемым напряжениям [σ] подобрать стандартный двутавр и брус прямоугольного сечения с соотношением сторон 1:2 (высота в 2 раза больше ширины). Сравнить массы 1 м двутавра и прямоугольного бруса.

Таблица 3

**Исходные данные к задаче № 3**

| Номер схемы | Нагрузка | | | Длина участка, м | | | | [σ], МПа |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $P$, кН | $M$, кН · м | $q$, кН/м | $L_0$ | $L_1$ | $L_2$ | $L_3$ | |
| 1 | 75,0 | 125 | 20 | 0 | 2,0 | 1,4 | 1,3 | 200 |
| 2 | 65,0 | 215 | 60 | 0 | 3,1 | 2,2 | 1,5 | 240 |
| 3 | 60,0 | 130 | 40 | 0 | 2,4 | 3,0 | 2,3 | 280 |
| 4 | 80,0 | 220 | 24 | 0 | 2,6 | 2,9 | 1,7 | 320 |
| 5 | 90,0 | 135 | 56 | 0 | 2,8 | 1,8 | 2,5 | 360 |
| 6 | 95,0 | 225 | 38 | 0 | 2,9 | 2,6 | 2,7 | 400 |
| 7 | 95,0 | 140 | 28 | 0 | 2,7 | 2,0 | 2,6 | 440 |
| 8 | 85,0 | 220 | 52 | 0 | 2,5 | 2,8 | 2,1 | 480 |
| 9 | 90,0 | 145 | 36 | 0 | 2,6 | 2,4 | 2,9 | 520 |
| 10 | 35,0 | 215 | 32 | 0 | 2,7 | 2,3 | 2,3 | 560 |
| 11 | 82,0 | 150 | 48 | 0 | 2,2 | 2,4 | 3,1 | 600 |
| 12 | 38,0 | 210 | 34 | 0 | 2,5 | 3,2 | 2,1 | 640 |
| 13 | 96,0 | 155 | 36 | 0 | 3,3 | 2,6 | 2,0 | 680 |
| 14 | 36,0 | 205 | 44 | 0 | 2,4 | 1,4 | 2,7 | 200 |
| 15 | 70,0 | 160 | 32 | 0 | 2,5 | 1,8 | 1,5 | 240 |
| 16 | 46,0 | 200 | 40 | 0 | 2,6 | 1,7 | 2,9 | 280 |
| 17 | 68,0 | 165 | 40 | 0 | 2,6 | 3,0 | 1,7 | 320 |
| 18 | 67,0 | 195 | 30 | 0 | 3,1 | 1,8 | 1,5 | 360 |
| 19 | 38,0 | 170 | 44 | 0 | 2,9 | 3,2 | 1,4 | 400 |
| 20 | 43,0 | 215 | 56 | 0 | 2,9 | 2,8 | 3,0 | 240 |
| 21 | 76,0 | 175 | 28 | 0 | 2,2 | 3,3 | 2,1 | 480 |
| 22 | 32,0 | 185 | 48 | 0 | 2,2 | 3,2 | 1,5 | 520 |
| 23 | 39,0 | 180 | 32 | 0 | 2,3 | 1,6 | 2,3 | 560 |
| 24 | 91,0 | 225 | 26 | 0 | 2,7 | 2,4 | 3,0 | 600 |
| 25 | 68,0 | 125 | 52 | 0 | 2,5 | 2,6 | 2,5 | 640 |
| 26 | 66,0 | 220 | 26 | 0 | 2,6 | 2,7 | 3,2 | 680 |
| 27 | 45,0 | 130 | 24 | 0 | 2,5 | 2,4 | 1,5 | 200 |
| 28 | 43,0 | 215 | 56 | 0 | 2,9 | 2,8 | 3,0 | 240 |
| 29 | 52,0 | 135 | 22 | 0 | 2,3 | 2,4 | 1,7 | 280 |
| 30 | 69,0 | 210 | 22 | 0 | 2,7 | 2,0 | 3,0 | 320 |
| 31 | 86,0 | 140 | 60 | 0 | 3,1 | 1,6 | 2,9 | 360 |

Окончание табл. 3

| Номер схемы | Нагрузка | | | Длина участка, м | | | | [σ], МПа |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $P$, кН | $M$, кН · м | $q$, кН/м | $L_0$ | $L_1$ | $L_2$ | $L_3$ | |
| 32 | 99,0 | 205 | 18 | 1,6 | 3,5 | 2,1 | 2,6 | 400 |
| 33 | 30,0 | 145 | 20 | 1,8 | 2,9 | 2,7 | 2,1 | 440 |
| 34 | 90,0 | 200 | 58 | 2,0 | 2,3 | 2,1 | 2,4 | 480 |
| 35 | 36,0 | 150 | 60 | 2,2 | 2,5 | 1,6 | 2,3 | 520 |
| 36 | 94,0 | 195 | 40 | 2,4 | 2,8 | 2,5 | 2,5 | 560 |
| 37 | 99,0 | 155 | 54 | 2,6 | 2,7 | 2,4 | 1,8 | 600 |
| 38 | 65,0 | 190 | 55 | 2,8 | 3,0 | 1,7 | 2,3 | 640 |
| 39 | 87,0 | 160 | 42 | 3,0 | 2,6 | 1,6 | 2,6 | 680 |
| 40 | 58,0 | 185 | 50 | 3,0 | 2,8 | 2,1 | 2,3 | 200 |
| 41 | 72,0 | 165 | 50 | 2,8 | 2,5 | 2,4 | 2,5 | 240 |
| 42 | 24,0 | 180 | 44 | 2,6 | 1,9 | 2,4 | 2,3 | 280 |
| 43 | 70,0 | 170 | 46 | 2,4 | 2,0 | 3,1 | 2,7 | 320 |
| 44 | 46,0 | 175 | 45 | 2,2 | 2,4 | 2,1 | 2,0 | 360 |
| 45 | 45,0 | 175 | 46 | 2,0 | 3,2 | 2,2 | 2,2 | 400 |
| 46 | 87,0 | 165 | 42 | 1,8 | 3,0 | 1,4 | 1,8 | 440 |
| 47 | 37,0 | 180 | 40 | 1,6 | 2,2 | 1,7 | 3,2 | 480 |
| 48 | 89,0 | 160 | 48 | 1,6 | 2,2 | 2,4 | 1,9 | 520 |
| 49 | 35,0 | 185 | 38 | 1,8 | 2,7 | 2,3 | 2,9 | 560 |
| 50 | 71,0 | 155 | 35 | 2,0 | 2,5 | 2,6 | 1,3 | 600 |
| 51 | 90,0 | 190 | 50 | 2,2 | 2,4 | 2,7 | 1,9 | 640 |
| 52 | 86,0 | 150 | 34 | 2,4 | 2,8 | 2,0 | 2,7 | 680 |
| 53 | 52,0 | 195 | 30 | 2,6 | 2,9 | 2,7 | 2,3 | 200 |
| 54 | 83,0 | 145 | 52 | 2,8 | 2,8 | 1,8 | 2,6 | 240 |
| 55 | 72,0 | 200 | 30 | 3,0 | 2,0 | 2,9 | 3,0 | 280 |
| 56 | 82,0 | 140 | 25 | 3,0 | 2,9 | 3,2 | 3,5 | 320 |
| 57 | 98,0 | 205 | 54 | 2,8 | 2,8 | 3,3 | 3,6 | 360 |
| 58 | 47,0 | 135 | 26 | 2,6 | 2,4 | 1,4 | 2,7 | 400 |
| 59 | 82,0 | 210 | 22 | 2,4 | 2,3 | 3,3 | 1,9 | 440 |
| 60 | 65,0 | 130 | 30 | 3,2 | 2,5 | 1,7 | 2,3 | 480 |
| 61 | 46,0 | 175 | 26 | 2,6 | 2,4 | 1,9 | 2,1 | 520 |
| 62 | 69,0 | 140 | 45 | 2,0 | 2,4 | 2,2 | 1,4 | 560 |
| 63 | 34,0 | 200 | 38 | 2,2 | 2,8 | 2,6 | 1,8 | 600 |
| 64 | 68 | 215 | 32 | 1,8 | 3,0 | 2,4 | 1,8 | 640 |

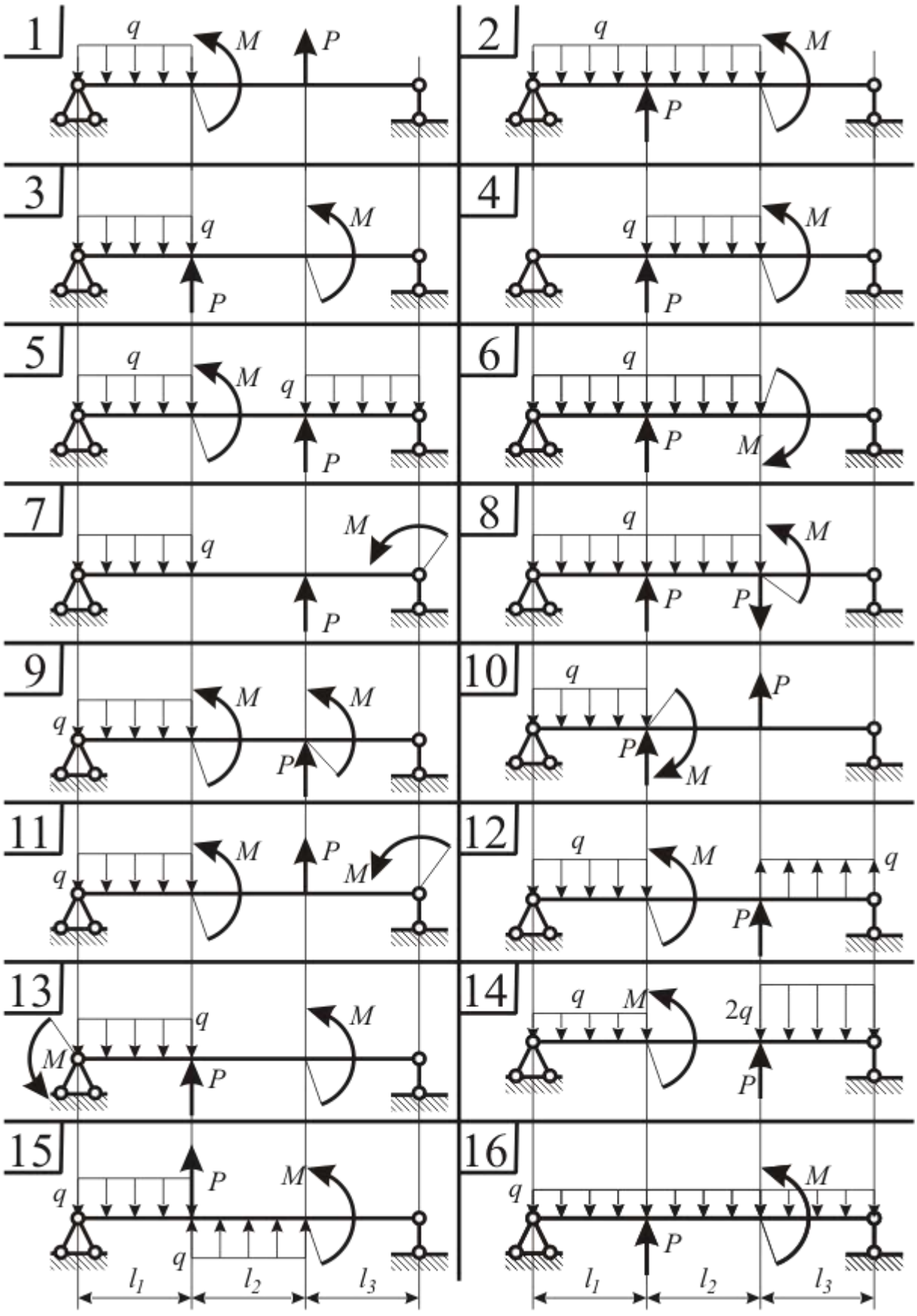



Рис. 4.1. Исходные данные к задачам 3, 4. Варианты 1 - 16

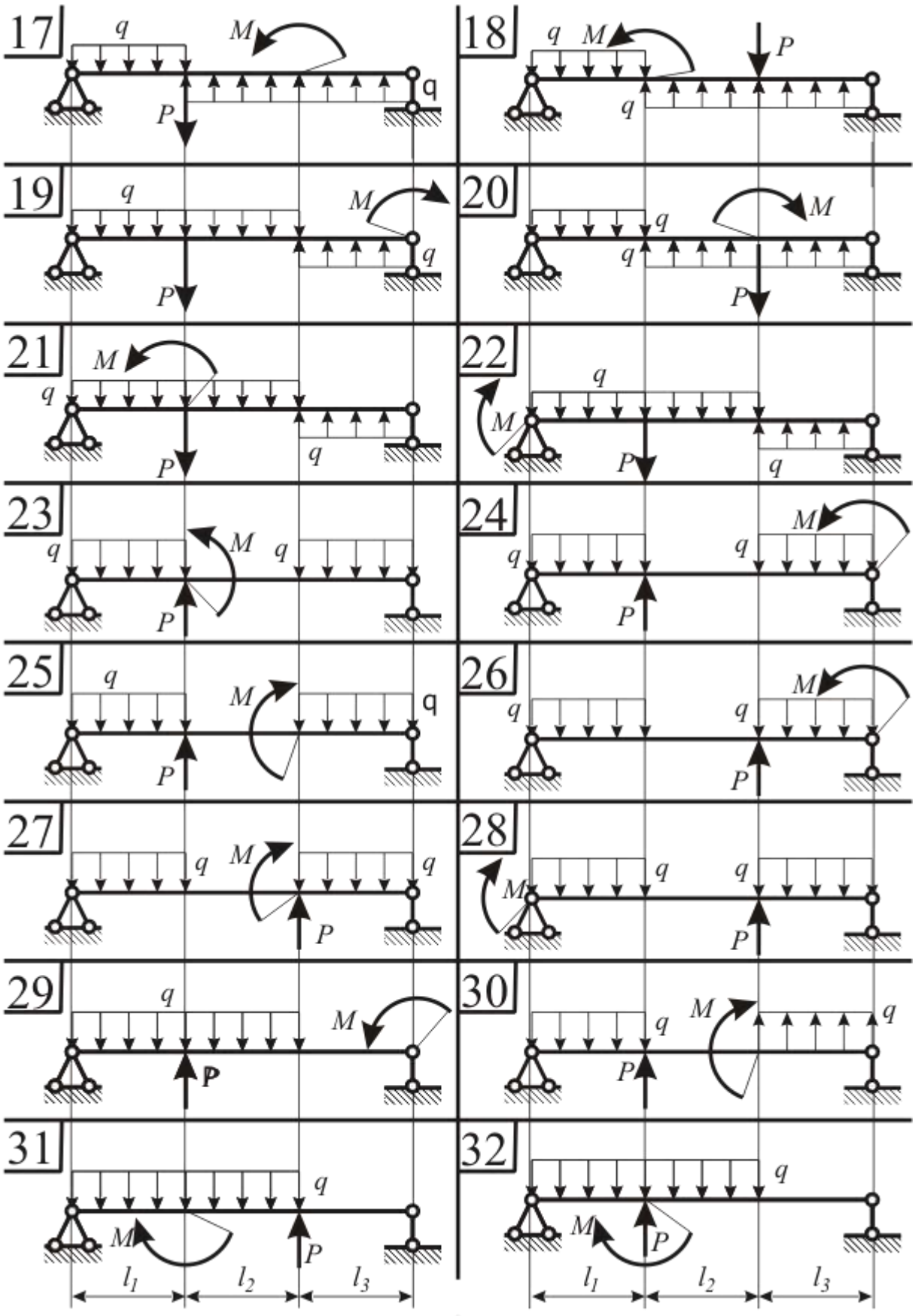



Рис. 4.2. Исходные данные к задачам 3, 4. Варианты 17 - 32

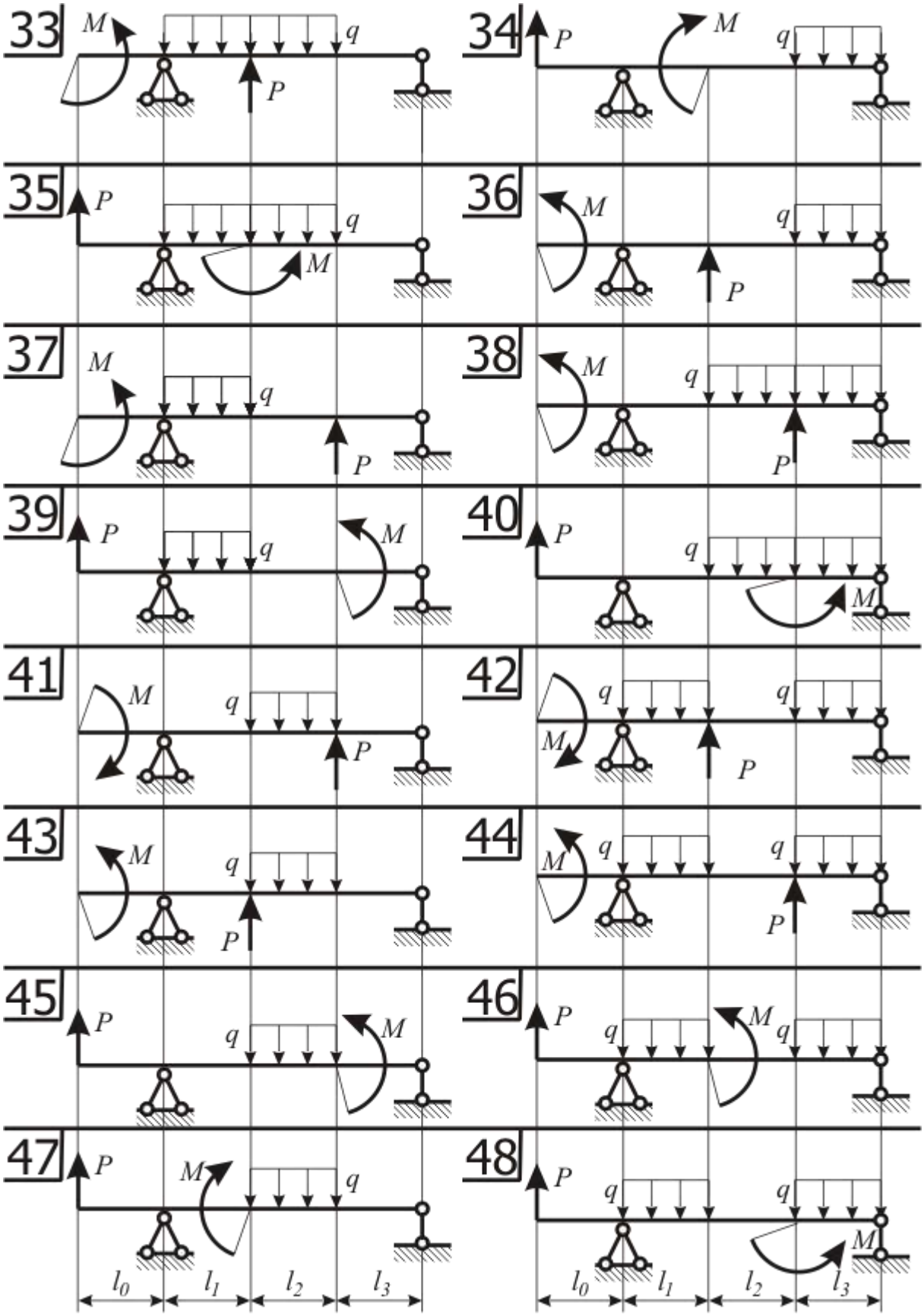



Рис. 4.3. Исходные данные к задачам 3, 4. Варианты 33 - 48

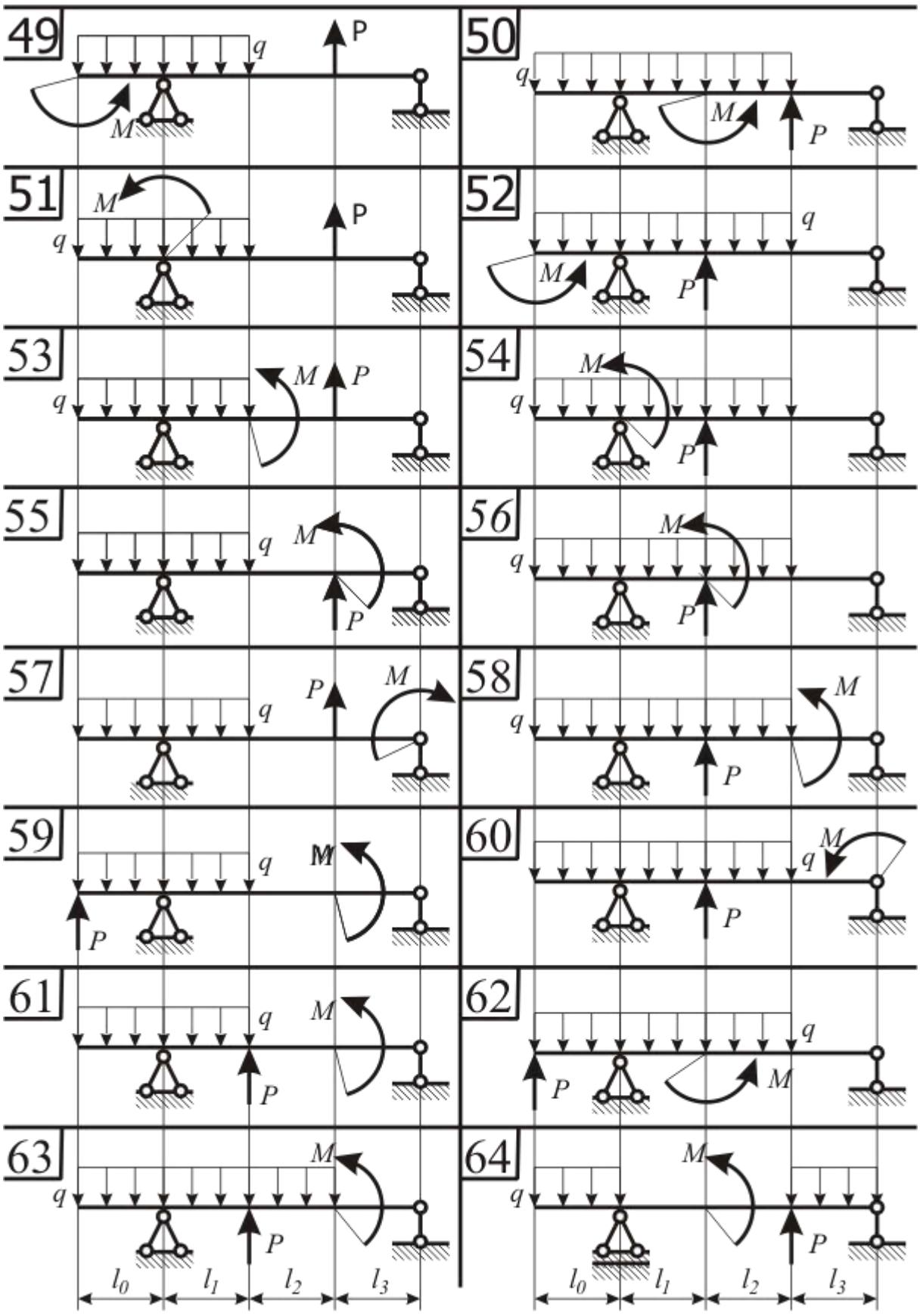



Рис. 4.4. Исходные данные к задачам 3, 4. Варианты 49 - 64

## Задача № 4. Расчёт балки на жёсткость

Двутавровая балка закреплена на двух опорах: подвижной в осевом направлении – правой и неподвижной – левой (рис. 4.1 – 4.4). Балка нагружена сосредоточенной силой $P$, изгибающим моментом $M$ и равномерно распределенной нагрузкой $q$. Балка работает на изгиб. По результатам расчетов задачи № 3, т. е. известному моменту инерции двутавровой балки, построить её изогнутую ось. Прогибы и углы поворота сечения балки определять в точках приложения сил реакций и внешних сил, моментов и по середине пролета, в котором приложена распределенная нагрузка. Найти максимальный прогиб и сравнить с допускаемым, который принят равным 1/200 длины максимального пролета (длины консоли или расстояния между опорами). Расчет производить методом начальных параметров. Исходные данные для решения задачи приведены в табл. 3.

## ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ № 3 и 4

Стальная двутавровая балка (рис. 4.5), шарнирно опёртая в крайних сечениях 1 и 5, нагружена: силами $P_1 = 40$ [кН], $P_2 = 40$ [кН], приложенными в сечениях 2, 3; изгибающим моментом $M = 50$ [кН·м], приложенным в сечении 4; нагрузкой интенсивности $q = 20$ [кН/м], равномерно распределённой на участке 1 – 4. Сечения, в которых приложены нагрузки, разбивают балку на 4 участка. Номер участка совпадает с номером левого сечения. Длины участков: $l_1 = 2$ [м], $l_2 = 2{,}5$ [м], $l_3 = 3{,}5$ [м], $l_4$= 3[м]. Допускаемое напряжение $[\sigma] = 200$ [МПа]. Подобрать из условия прочности двутавр по ГОСТ 8239-89.

Допустимый прогиб $L/200$, где $L = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 = 11$ [м] – длина пролёта. Найти упругую линию балки. Сравнить максимальный прогиб с допускаемым.

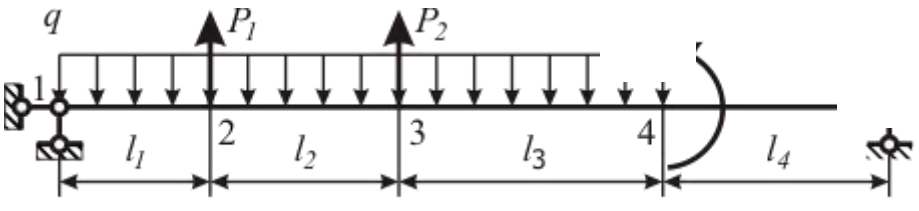



Рис. 4.5. Схема нагружения однопролетной балки

## РЕШЕНИЕ

1. Находим опорные реакции из уравнений моментов относительно опор: $\sum mom_1 = 0;\ \ \sum mom_5 = 0.$ Положительное направление реакций определяется правилом знаков (рис. 4.6).

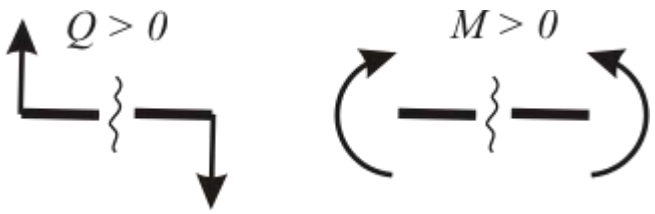



Рис. 4.6. Правило знаков для внутренних силовых факторов

Выбранные направления реакций показаны на рис. 4.7, *б*. Если получено отрицательное значение реакции, то её истинное направление противоположно выбранному.

$$R_5 L - q\,(l_1 + l_2 + l_3)^2/2 + P_1 l_1 + P_2(l_1 + l_2) + M = 0;$$
$$-R_1 L + q\,(l_1 + l_2 + l_3)((l_1 + l_2 + l_3)/2 + l_4) - P_1(l_2 + l_3 + l_4) - $$
$$-P_2(l_3 + l_4) + M = 0.$$

Решая уравнения, получаем:

$$R_5 = 1/L\ (q\ (l_1 + l_2 + l_3)^2/2 - P_1 l_1 - P_2\ (l_1 + l_2) - M) =$$
$$= 1/11\ \ (20\ \ (2 + 2{,}5 + 3{,}5)^2/2) - 40 \cdot 2 - 40\ \ (2 + 2{,}5) - 50)\ =\ 30\ \text{[кН]};$$
$$R_1 = 1/L\ (q\ (l_1 + l_2 + l_3)\ ((l_1 + l_2 + l_3)/2 + l_4) -$$
$$-P_1\ (l_2 + l_3 + l_4) - P_2\ (l_3 + l_4) + M) =$$
$$= 1/11\,(20\ \ (2 + 2{,}5 + 3{,}5)\ \ ((2 + 2{,}5 + 3{,}5)/2 + 3) -$$
$$-40\,(2{,}5 + 3{,}5 + 3) - 40\,(3{,}5 + 3) + 50) = 50\ \text{[кН]}.$$

2. Проверка – обязательный этап. Для проверки составляем уравнение моментов относительно любой точки или (что проще, но не всегда гарантирует правильность вычислений) уравнение суммы проекций всех сил на вертикаль. Запишем сумму моментов относительно точки 4:

$$\sum mom_4 = -R_0\ (l_0 + l_1 + l_2) -$$
$$-P_1\ \ (l_1 + l_2) - P_2 l_2 + q\ \ (l_0 + l_1 + l_2)^2/2 + M + R_4 l_3 =$$
$$= -50\,(2 + 2{,}5 + 3{,}5) - 40\,(2{,}5 + 3{,}5) - 40 \cdot 3{,}5 +$$
$$+20\ \ (2 + 2{,}5 + 3{,}5)^2/2 + 50 + 30 \cdot 3 = 0\ .$$

3. Строим эпюры поперечных сил и изгибающих моментов. Границами участков являются точки, в которых приложены силы и моменты, или начинаются участки с распределённой нагрузкой. Если участок разрезать в произвольной точке, полученный результат будет справедлив для любой точки сечения (по граничным точкам разрезать балку нельзя). Внешние нагрузки, приложенные к балке, и опорные реакции образуют уравновешенную систему сил. Разрезав балку, получим два куска, каждый из которых нагружен неуравновешенной системой сил. Мысленное разрезание не может нарушить равновесия кусков. Равновесие обеспечивают внутренние силы и моменты, действующие в разрезах. По третьему закону Ньютона силы, приложенные к полученным кускам, равны по величине и направлены в разные стороны.

Величины находим из условий равновесия любого из кусков. Для этого составляем сумму проекций нагрузок на вертикаль и сумму моментов нагрузок, приложенных к куску, относительно центра масс разреза.

3.1. Участок 4 (рис. 4.7, *в*). Рассматриваем равновесие правого куска. Правило знаков дано на рис. 4.6. Координату сечения отсчитываем от точки 4 (которая является границей разрезанного участка на правом куске). При этом выборе точки отсчёта координата сечения меняется в пределах длины исследуемого участка ($0 \le z_4 \le l_4 = 3$ [м]).

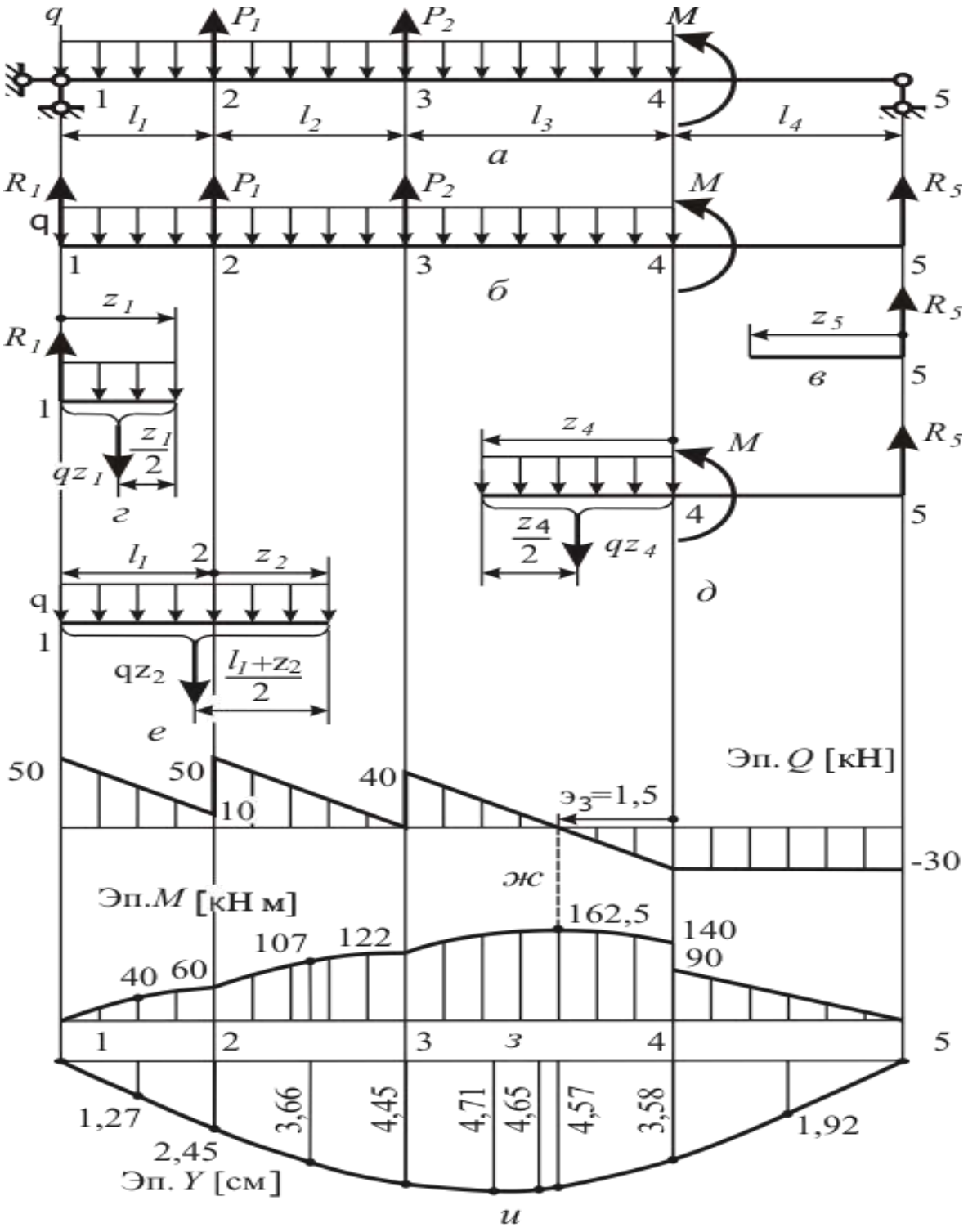



Рис. 4.7. Изгиб балки. Эпюры $Q, M, Y$

Получаем $Q_4(z_5) = -R_5$. Поперечная сила постоянна вдоль участка 4 (рис. 4.7, *ж*).

Изгибающий момент $M_4(z_5) = R_5\, z_5$. Он является линейной функцией координаты $z_5$. Вычисляем значения в начале и конце участка 4: $M_4(0) = R_5 \cdot 0 = 0$; $M_4(l_4) = R_5\, l_4 = 30 \cdot 3 = 90$ [кН·м]. Строим эпюру изгибающего момента (рис. 4.7, *з*).

3.2. Участок 1 (рис. 4.7, *г*). Рассматриваем равновесие левого куска. Правило знаков дано на рис. 4.6. Расстояние до разреза (координату сечения) отсчитываем от точки 1 ($0 \le z_1 \le l_1 = 2$ [м]). Получаем $Q_1(z_1) = R_1 - q\, z_1$. Поперечная сила меняется по линейному закону вдоль участка 1 (рис. 4.7, *ж*). Находим значения $Q_1(z_1)$ в начале и в конце участка

$$Q_1(0) = R_0 - q \cdot 0 = 50 \text{ [кН]};$$
$$Q_1(l_0) = R_0 - q\ l_0 = 50 - 20 \cdot 2 = 10 \text{ [кН]}.$$

Значение $z_0 = e_1$, при котором поперечная сила равна 0, находим решая уравнение $Q_1(e_1) = R_1 - q\, e_1 = 0$. Получим: $e_1 = R_1/q = 50/2 = 2{,}5$ [м]. Корень лежит вне участка 1. Функция $Q_1(z_1)$ не обращается в нуль на этом участке.

Изгибающий момент на участке 1 равен $M_1(z_1) = R_1 z_1 - q\, z_1^2/2$. Момент $M_1(z_1)$ является квадратичной функцией координаты $z_1$. Кривые вычерчивают по трём точкам. Вычисляем значения в начале и конце участка:

$$M_1(0) = R_1 0 - q\, 0^2/2 = 0;$$
$$M_1(l_1) = R_1 l_1 - q\, l_1^2/2 = 50 \cdot 2 - 20 \cdot 2^2/2 = 60 \text{ [кН·м]}.$$

В качестве третьей точки берут точку участка 1, в которой поперечная сила обращается в нуль. Если $Q_1 \ne 0$ на участке 1, ищем момент посередине участка: $M_1(l_1/2) = R_1\, l_1/2 - q\, (l_1/2)^2/2 = 50 \cdot 1 - 20 \cdot 1^2/2 = 40$ [кН·м]. Строим эпюру изгибающего момента (рис. 4.7, *з*).

3.3. Участок 3 (рис. 4.7, *д*). Разрезаем балку между сечениями 3 и 4. Рассматриваем равновесие правого куска балки. Расстояние до разреза отсчитываем от точки 4 (которая ограничивает участок 3 справа). При этом ($0 \le z_4 \le l_3 = 3{,}5$ [м]).

Поперечная сила $Q_3(z_4)$ изменяется вдоль участка 3 (рис. 4.7, *ж*) по линейному закону $Q_3(z_4) = -R_5 + q\ z_4$. На концах участка 3 получаем: $Q_3(0) = -R_5 + q \cdot 0 = -30$; $Q_3(l_3) = -R_5 + q\ l_3 = -30 + 20 \cdot 3{,}5 = 40$ кН. Поперечная сила $Q_3$ обращается в нуль в точке $e_3 = R_5/q = 30/20 = 1{,}5$ м.

Изгибающий момент на участке 3 равен

$$M_3(z_4) = M + R_5(z_4 + l_4) - q\, z_4^2/2.$$

Находим значения изгибающего момента на концах участка и в точке $e_3$:

$$M_3(0) = M + R_4(0 + l_4) - q\ \cdot 0^2/2 =$$
$$= 50 + 30\ (0 + 3) - 20 \cdot 0^2/2 = 140 \text{ [кН·м]};$$
$$M_3(l_3) = M + R_4(l_3 + l_4) - q\, l_3^2/2 =$$
$$= 50 + 30\ \ (3{,}5 + 3) - 20 \cdot 3{,}5^2/2 = 122 \text{ [кН·м]};$$

$$M_3(e_3) = M + R_4(e_3 + l_4) - q\ (e_3)^2/2 =$$
$$= 50 + 30\ (1{,}5 + 3) - 20 \cdot 1{,}5^2/2 = 162{,}5\ [\text{кН}\cdot\text{м}].$$

Момент в середине участка 3 практически не отличается от экстремального:

$$M_3(l_3/2) = M + R_4(l_3/2 + l_4) - q\ \ (l_3/2)^2/2 =$$
$$= 50 + 30\ \ (1{,}75 + 3) - 20 \cdot 1{,}75^2/2 = 161{,}9\ [\text{кН} \cdot \text{м}].$$

Строим эпюру изгибающего момента (рис. 4.7, *з*).

3.4. Участок 2 (рис. 4.7, *е*). Режем балку в любой точке, лежащей между точками 2 и 3. Рассматриваем равновесие левого куска. Расстояние до разреза (координату $z_2$) отсчитываем от точки 2 (границы участка на левом куске). При этом $0 \le z_2 \le l_2 = 2{,}5$ [м].

Поперечная сила $Q_2(z_2)$ меняется вдоль участка 2 (см. рис. 3.8, *ж*) по закону $Q_2(z_2) = R_1 + P_1 - q\ (l_1 + z_2)$.

Её значения на концах участка равны

$$Q_2(0) = R_1 + P_1 - q\ (l_1 + 0) = 50 + 40 - 20 \cdot 2 = 50[\text{кН}];$$
$$Q_2(l_2) = R_1 + P_1 - q\ (l_1 + l_2) = 50 + 40 - 20 \cdot (2 + 2{,}5) = 0[\text{кН}].$$

Поперечная сила $Q_2(z_2)$ обращается в нуль на правой границе участка 2:

$$e_2 = l_2 = 2{,}5\ [\text{м}].$$

Изгибающий момент $M_2(z_2)$ в точке $z_2$ участка 2 находим по формуле

$$M_2(z_2) = R_1 \cdot (z_2 + l_1) + P_1 \cdot z_2 - q\ (z_2 + l_1)^2/2.$$

Вычисляем значения момента на концах участка 2:

$$M_2(l_2) = R_1\ (l_1 + l_2) + P_1\ l_2 - q\ (l_1 + l_2)^2 = 50\ \ (2\ +\ 2{,}5) + 40\ \ 2{,}5 -$$
$$-20\ \ (2 + 2{,}5)^2/2 = 122$$

[кН ·м].

$$M_2(0) = R_1\ \ (0 + l_1) + P \cdot 0 - q\ \ (0 + l_1)^2/2 =$$
$$= 50\ \ (0 + 2) + 40 \cdot 0 - 20\ \ (0 + 2)^2/2 = 60\ [\text{кН} \cdot \text{м}];$$
$$M_2(l_2) = R_1\ \ (l_1 + l_2) + P_1 \cdot l_2 - q\ \ (l_1 + l_2)^2 =$$
$$= 50 \cdot (2 + 2{,}5) + 40 \cdot 2{,}5 - 20 \cdot (2 + 2{,}5)^2/2 = 122\ [\text{кН} \cdot \text{м}].$$

Точка экстремума $e_2 = 2{,}5$ [м] совпадает с правой границей участка 2. Момент в ней уже найден, поэтому в качестве третьей точки при построении эпюры $M_2(z_2)$ берём середину участка $z_2 = l_2/2 = 2{,}5/2 = 1{,}25$ [м].

Получаем

$$M_2(l_2/2) = R_1\ \ (l_2/2 + l_1) + P_1\ l_2/2 - q\ \ (l_2/2 + l_1)^2/2 =$$
$$= 50\ \ (1{,}25 + 2) + 40 \cdot 1{,}25 - 20\ \ (1{,}25 + 2)^2/2 = 107\ [\text{кН} \cdot \text{м}].$$

Строим эпюру изгибающего момента (рис. 4.7, *з*).

4. Выбор двутавра из условия прочности $\sigma_m = M_m/W \le [\sigma]$.

Здесь: $M_m = 162{,}5$ [кН ·м] $= 1{,}625 \cdot 10^5$ [Н ·м] – наибольший по модулю изгибающий момент в балке (найденный в п. 3);

$[\sigma] = 200$ [МПа] $= 2 \cdot 10^8$ [Н/м$^2$] – допускаемые напряжения.

Требуемый по условию прочности момент сопротивления изгибу $W = M_m/[\sigma] = 1{,}625 \cdot 10^5/2 \cdot 10^8 = 8{,}12 \cdot 10^{-4}$[м$^3$]$= 8{,}12 \cdot 10^2$[см$^3$].

По ГОСТ 8239-89 находим двутавр с ближайшим большим моментом

сопротивления изгибу: двутавр № 40, $W_x = 953{,}0$ [см$^3$]. Его момент инерции $J_x = 19062$ [см$^4$].

5. Находим максимальные напряжения изгиба $\sigma_{max} = M_{max}/W_x = 1{,}625 \cdot 10^5/9{,}53 \cdot 10^{-4} = 1{,}71 \cdot 10^8$ [Н/м$^2$] $= 171$ [МПа]. Определяем коэффициент запаса прочности по допускаемым напряжениям

$$k_{[\sigma]} = [\sigma]/\sigma_{max} = 2 \cdot 10^8/1{,}71 \cdot 10^8 = 1{,}17.$$

6. Уравнение упругой линии балки $y(z)$:

$$Y(z) = \theta_0 \cdot z + R_1 \cdot z^3/(6 \cdot E \cdot J_x) - \\ - q \cdot z^4/(24 \cdot E \cdot J_x) + P_1(z - l_1)^3/(6 \cdot E \cdot J_x) \cdot H(z - l_1) + \\ + P_2 \cdot (z - l_1 - l_2)^3/(6 \cdot E \cdot J_x) \cdot H(z - l_1 - l_2) - \\ - M(z - l_1 - l_2 - l_3)^2/(2 \cdot E \cdot J_x) \cdot H(z - l_1 - l_2 - l_3) + \\ + q(z - l_1 - l_2 - l_3)^4/(6 \cdot E \cdot J_x) \cdot H(z - l_1 - l_2 - l_3),$$

где $\theta_0$ – неизвестный угол поворота балки на левой опоре; $H(z)$ – функция Хевисайда. $H(z) = \begin{cases} 0, & при\ z < 0 \\ 1, & при\ z \geq 0 \end{cases}$. Её график приведён на рис. 4.8.

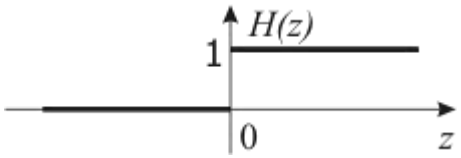


Рис. 4.8. Функция Хевисайда

Начало координат взято на левой опоре.

7. Угол $\theta_0$ поворота на левой опоре находим из условия отсутствия прогиба на правой опоре:

$$Y(L) = \theta_0 \cdot L + R_1 \cdot L^3/(6 \cdot E \cdot J_x) - \\ - q \cdot L^4/(24 \cdot E \cdot J_x) + P_1(L - l_1)^3/(6 \cdot E \cdot J_x) \cdot H(L - l_1) + \\ + P_2(L - l_1 - l_2)^3/(6 \cdot E \cdot J_x) \cdot H(L - l_1 - l_2) - \\ - M(L - l_1 - l_2 - l_3)^2/(2 \cdot E \cdot J_x) \cdot H(L - l_1 - l_2 - l_3) + \\ + q(L - l_1 - l_2 - l_3)^4/(24 \cdot E \cdot J_x) \cdot H(L - l_1 - l_2 - l_3) = 0.$$

Решаем линейное уравнение относительно неизвестного угла $\theta_0$:

$$\theta_0 = (-R_1 L^3/(6EJ_x) + qL^4/(24EJ_x) - P_1(L - l_1)^3/(6EJ_x) - \\ - P_2(L - l_1 - l_2)^3/(6EJ_x) + M(L - l_1 - l_2 - l_3)^2/(2EJ_x) - \\ - q(L - l_1 - l_2 - l_3)^4/(24EJ_x))/L = \\ = (-50 \cdot 10^3 \cdot 11^3/(6 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 1{,}9062 \cdot 10^{-4}) + \\ + 20 \cdot 10^3 \cdot 11^4/(24 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 1{,}9062 \cdot 10^{-4}) - \\ - 40 \cdot 10^3(11 - 2)^3/(6 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 1{,}9062 \cdot 10^{-4}) - \\ - 40 \cdot 10^3(11 - 2 - 2{,}5)^3/(6 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 1{,}9062 \cdot 10^{-4}) + \\ + 50 \cdot 10^3(11 - 2 - 2{,}5 - 3{,}5)^3/(2 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 1{,}9062 \cdot 10^{-4}) - \\ - 20 \cdot 10^3(11 - 2 - 2{,}5 - 3{,}5)^4/(24 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 1{,}9062 \cdot 10^{-4}))/11 = \\ = -0{,}0129 \text{ [рад]}.$$

8. Находим упругую линию. Вычисляем жёсткость при изгибе

$$EJ_x = 2 \cdot 10^{11} \cdot 1{,}9062 \cdot 10^{-4} = 3{,}81 \cdot 10^7 \quad [\text{Н·м}^2].$$

Чтобы найти прогиб в середине участка 3, подставим в уравнение упругой линии координату этой середины

$$z = l_1 + l_2 + l_3/2 = 2 + 2{,}5 + 3{,}5/2 = 6{,}25 \text{ [м]}.$$

Получаем

$$Y(6{,}25) = -0{,}0129 \cdot 6{,}25 + 50 \cdot 10^3 \cdot 6{,}25^3/(6 \cdot 3{,}81 \cdot 10^7) - \\ -20 \cdot 10^3 \cdot 6{,}25^4/(24 \cdot 3{,}81 \cdot 10^7) + \\ +40 \cdot 10^3(6{,}25-2)^3/(6 \cdot 3{,}81 \cdot 10^7) \cdot H(6{,}25-2) + \\ +40 \cdot 10^3(6{,}25-2-2{,}5)^3/(6 \cdot 3{,}81 \cdot 10^7) \cdot H(6{,}25-2-2{,}5) = \\ = 0{,}0465 \text{ [м]}.$$

В двух последних членах уравнения упругой линии аргументы функции $H(z)$ отрицательны и $H(z) = 0$. Подобные вычисления проведены для границ и середин всех участков. Упругая линия построена на рис. 4.7, *и*. Величина максимального прогиба 4,71 [см] и не превышает допустимый прогиб, равный $L|200 = 1100/200 = 5{,}5$ [см]. Следовательно, жесткость данной балки достаточна.

## Задача № 5. Геометрические характеристики плоского симметричного сечения

Для симметричного сечения, составленного из прокатных профилей, найти площадь, осевые моменты инерции, моменты сопротивления изгибу и радиусы инерции сечения относительно главных центральных осей. Схемы сечений приведены на рис. 5.1, номера прокатных профилей и размеры поперечных сечений указаны в табл. 5.1.

Совместная работа прокатных профилей в составных сечениях, данных на схемах I, II, III и IX рис. 5.1, обеспечена соединительными планками, показанными пунктиром.

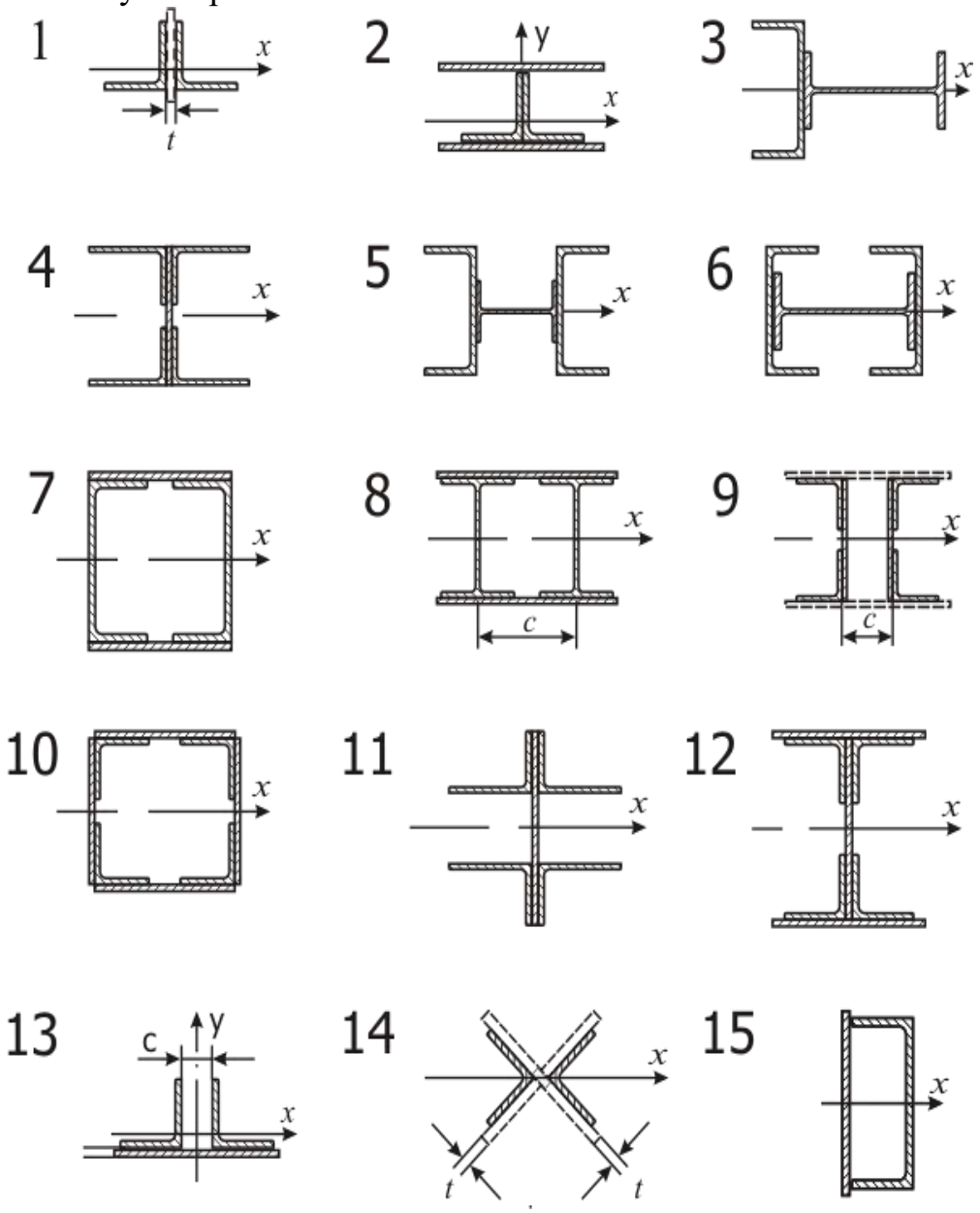



Рис. 5.1. Схемы поперечных сечений 1 – 15

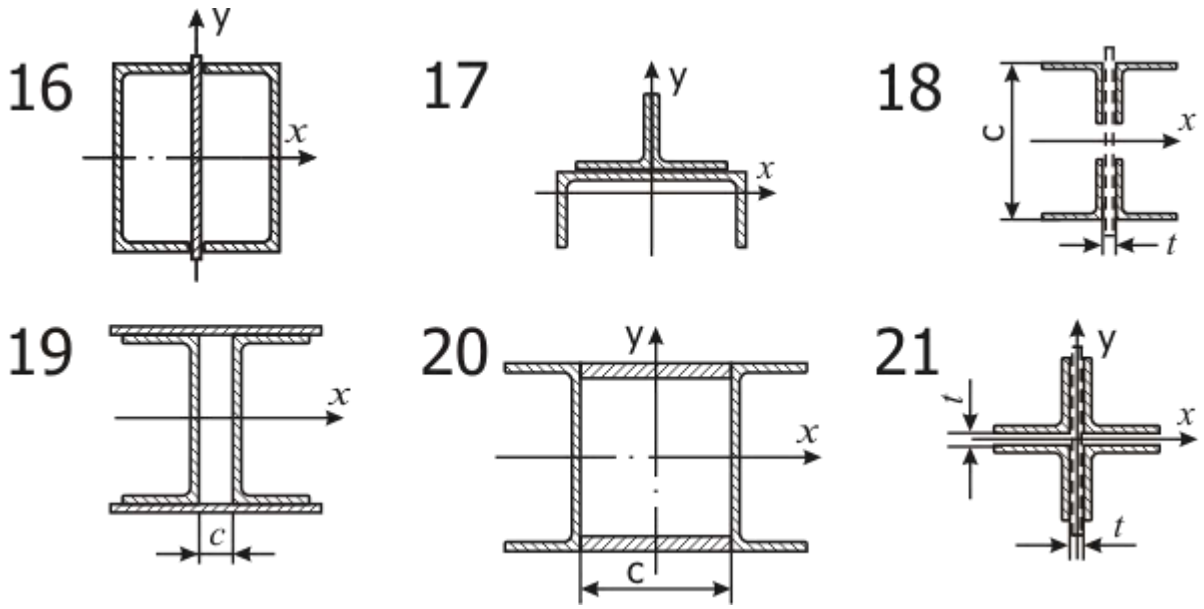



Рис. 5.2. Схемы поперечных сечений 16– 21

Исходные данные к задаче 5 Табл. 5.1

| Схема 1 | | | |
|---|---|---|---|
| Задание номер | 1 | 22 | 43 |
| Состав сечения | 2 уголка 100х100х10 $t = 10$ | 2 уголка 80х80х8 $t = 8$ | 2 уголка 180х180х12 $t = 12$ |
| Схема 1 | | | |
| Задание номер | 64 | – | – |
| Состав сечения | 2 уголка 125х125х10 Планка $t = 10$ | – | – |
| Схема 2 | | | |
| Задание номер | 2 | 23 | 44 |
| Состав сечения | 2 уголка 100х100х10 2 листа 250х10 | 2 уголка 125х125х9 2 листа 200х8 | 2 уголка 180х180х12 2 листа 300х12 |
| Схема 3 | | | |
| Задание номер | 3 | 24 | 45 |
| Состав сечения | Швеллер № 18 Двутавр № 20 | Швеллер № 14 Двутавр № 16 | Швеллер № 24 Двутавр № 27 |
| Схема 4 | | | |
| Задание номер | 4 | 25 | 46 |
| Состав сечения | 4 уголка 140х90х10 Лист 240х12 | 4 уголка 110х70х8 Лист 200х10 | 4 уголка 200х125х14 Лист 240х12 |
| Схема 5 | | | |
| Задание номер | 5 | 26 | 47 |
| Состав сечения | 2 швеллера № 36 Двутавр № 16 | 2 швеллера № 30 Двутавр № 14 | 2 швеллера № 24 Двутавр № 12 |

| Схема 6 | | | |
|---|---|---|---|
| Задание номер | 6 | 27 | 48 |
| Состав сечения | 2 швеллера № 33<br>Двутавр № 16 | 2 швеллера № 27<br>Двутавр № 14 | 2 швеллера № 22<br>Двутавр № 12 |

Продолжение табл. 5.1

| Схема 6 | | | |
|---|---|---|---|
| Задание номер | 6 | 27 | 48 |
| Состав сечения | 2 швеллера № 33<br>Двутавр № 16 | 2 швеллера № 27<br>Двутавр № 14 | 2 швеллера № 22<br>Двутавр № 12 |
| Схема 7 | | | |
| Задание номер | 7 | 28 | 49 |
| Состав сечения | 2 швеллера № 36<br>2 листа 300х12 | 2 швеллера № 30<br>2 листа 250х10 | 2 швеллера № 24<br>2 листа 200х8 |
| Схема 8 | | | |
| Задание номер | 8 | 29 | 50 |
| Состав сечения | 2 двутавра № 36<br>2 листа 300х12<br>$c = 180$ | 2 двутавра № 30<br>2 листа 250х10<br>$c = 150$ | 2 двутавра № 24<br>2 листа 200х8<br>$c = 120$ |
| Схема 9 | | | |
| Задание номер | 9 | 30 | 51 |
| Состав сечения | 4 уголка 50х50х5<br>2 листа 200х6<br>$c = 130$ | 4 уголка 90х90х8<br>2 листа 350х10<br>$c = 160$ | 4 уголка<br>125х125х10<br>2 листа 450х12<br>$c = 180$ |
| Схема 10 | | | |
| Задание номер | 10 | 31 | 52 |
| Состав сечения | 4 уголка 70х70х6<br>4 листа 200х6 | 4 уголка<br>100х100х10<br>4 листа 250х10 | 4 уголка<br>125х125х12<br>4 листа 300х6 |
| Схема 11 | | | |
| Задание номер | 11 | 32 | 53 |
| Состав сечения | 4 уголка 75х50х5<br>Лист 200х5 | 4 уголка 100х63х8<br>Лист 250х10 | 4 уголка<br>160х100х12<br>Лист 300х12 |
| Схема 12 | | | |
| Задание номер | 12 | 33 | 54 |
| Состав сечения | 4 уголка 80х80х7<br>2 полки 250х10<br>Стенка 600х8 | 4 уголка 100х100х8<br>2 полки 300х12<br>Стенка 900х8 | 4 уголка 100х100х8<br>2 полки 350х12<br>Стенка 1200х10 |
| Схема 13 | | | |
| Задание номер | 13 | 34 | 55 |
| Состав сечения | 2 уголка 80х80х7<br>Лист 220х8<br>$c = 40$ | 2 уголка 75х75х7<br>Лист 175х8<br>$c = 40$ | 2 уголка<br>125х125х10<br>Лист 320х12<br>$c = 50$ |
| Схема 14 | | | |
| Задание номер | 14 | 35 | 56 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Состав сечения | 2 уголка 180х180х12 Планка $t = 10$ | 2 уголка 125х125х9 Планка $t = 10$ | 2 уголка 100х100х8 Планка $t = 10$ |
| Схема 15 | | | |
| Задание номер | 15 | 36 | 57 |
| Состав сечения | Швеллер № 14 Лист 150х5 | Швеллер № 20 Лист 210х7 | Швеллер № 33 Лист 340х8 |

Продолжение табл. 5.1

| | | | |
|---|---|---|---|
| Схема 16 | | | |
| Задание номер | 16 | 37 | 58 |
| Состав сечения | 2 швеллера № 16 Лист 170х5 | 2 швеллера № 20 Лист 210х6 | 2 швеллера № 27 Лист 280х6 |
| Схема 17 | | | |
| Задание номер | 17 | 38 | 59 |
| Состав сечения | Швеллер № 12 2 уголка № 6,5 | Швеллер № 18 2 уголка № 8 | Швеллер № 27 2 уголка № 12,5 |
| Схема 18 | | | |
| Задание номер | 18 | 39 | 60 |
| Состав сечения | 4 уголка 80х80х7 $c$ =320; $t = 8$ | 4 уголка 110х110х8 $c$ =650; $t = 10$ | 4 уголка 140х140х12 $c = 950$; $t = 12$ |
| Схема 19 | | | |
| Задание номер | 19 | 40 | 61 |
| Состав сечения | 2 швеллера № 16 2 листа 80х8; $c = 80$ | 2 швеллера № 24 2 листа 120х10; $c = 120$ | 2 швеллера № 36 2 листа 160х10; $c = 160$ |
| Схема 20 | | | |
| Задание номер | 20 | 41 | 62 |
| Состав сечения | 2 швеллера № 16 2 листа 80х8; $c = 80$ | 2 швеллера № 24 2 листа 120х10; $c = 120$ | 2 швеллера № 36 2 листа 160х10; $c = 160$ |
| Схема 21 | | | |
| Задание номер | 21 | 42 | 63 |
| Состав сечения | 4 уголка 160х160х14 $t = 12$ | 4 уголка 63х63х5 $t = 6$ | 4 уголка 110х110х8 $t = 10$ |

## ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ № 5

Найти главные оси сечения, составленного из уголков стальных горячекатанных равнополочных 75 х 75 х 8 ГОСТ 8509 – 93 и двух уголков стальных горячекатанных неравнополочных 100 х 63 х 8 ГОСТ 8510 – 86

(рис. 5.2). Высота сечения $h = 300 = 30{,}0$ см. Толщина соединительной планки $\delta = 8 = 0{,}8$см. Вычислить относительно этих осей главные моменты инерции, моменты сопротивления и радиусы инерции.

Для работы составного сечения как жёсткого целого, уголки соединены планками, показанными на рис. 5.2 пунктиром. Расстояние между планками выбирается равным $40\, i_{min}$. При вычислении геометрических характеристик составного сечения соединительные планки не учитываются.

## РЕШЕНИЕ

1.Вычерчиваем поперечное сечение в масштабе (рис. 5.3). Прокатные радиусы и сварные швы на рис. 5.2 не указываем.

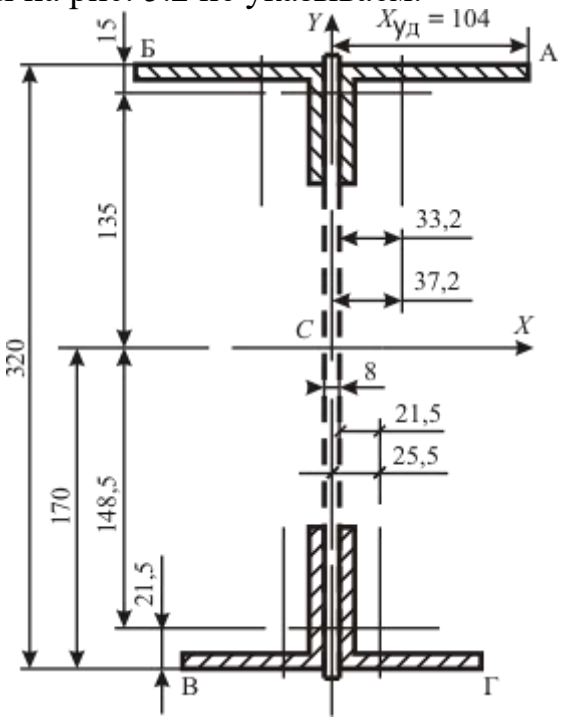



Рис. 5.3. Сечение составной балки

2. Приводим чертёжи прокатных профилей, взятые из ГОСТ 8509-93 «Уголки стальные горячекатаные равнополочные. Сортамент» (рис. 5.4,а) и ГОСТ 8510-86 «Уголки стальные горячекатаные не равнополочные. Сортамент» (рис. 5.4,б).

На рис. 5.4 внесены следующие изменения по сравнению с чертежами ГОСТ: не указаны прокатные радиусы $R$ и $r$ уголков; главные оси равнополочного уголка обозначены $u, v$ вместо $x_0, y_0$; размеры, оси, координаты центра масс, относящиеся к равнополочному уголку, помечены нижним индексом 1, а к неравнополочному уголку – нижним индексом 2, соответственно.

Выписываем из ГОСТ длины и толщины полок уголков. Размеры переводим из миллиметров в сантиметры.

Уголок равнополочный: ширина полки – $b_1 = 75$мм $= 7{,}5$см, толщина – $t_1 = 0{,}8$ см, расстояние от внешней грани полки до центра масс – $x_0 = 2{,}15$ см,

площадь – $F_1 = 11{,}50$ см$^2$, моменты инерции относительно центральных осей $x_1$ и $y_1$, параллельных полкам – $J_{x1} = 59{,}84$ см$^4$.

Уголок неравнополочный: ширина длинной полки – $B = 100 = 10$ см, ширина короткой полки – $b_2 = 63$ мм $= 6{,}3$ см, толщина полок – $t = 8$ мм $= 0{,}8$ см, расстояние от внешней грани длинной полки до центра масс – $x_0 = 1{,}50$ см, расстояние от внешней грани короткой полки до центра масс – $y_0 = 3{,}32$ см,площадь сечения – $F_2 = 12{,}57$ см$^2$, момент инерции сечения относительно оси $x$– $J_{x2} = 126{,}96$ см$^4$,момент инерции сечения относительно оси $J_{y2} = 39{,}21$ см$^4$.

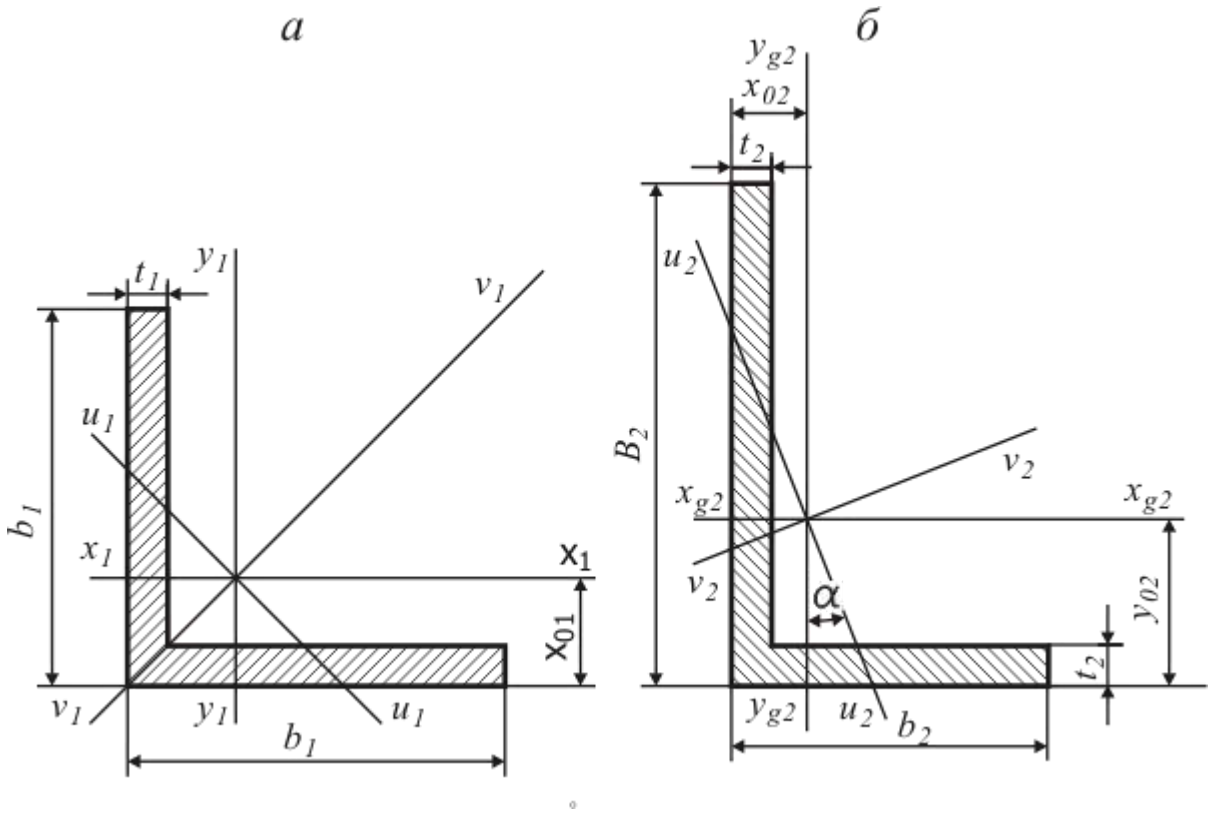



Рис. 5.4. Составные части поперечного сечения балки: а – равнополочный уголок ГОСТ 8509-93; б – неравнополочный уголок ГОСТ 8510-86.

В сопротивлении материалов расчёты выполняют с точностью 5%. Эту точность обеспечивают три первых значащих цифры. Значащими цифрами числа называются все цифры в его записи, начиная с первой ненулевой слева. Отсчёт начинают с первой, отличной от нуля. Для $J_{x2}$ достаточно принять $J_{x2} = 127$, но при оформлении расчётов величины нужно записывать так, как они заданы в официальных документах $J_{x2} = 126{,}96$.

3. Площадь поперечного сечения равна

$$F = k_1F_1 + k_2F_2 = 2 \cdot 11{,}50 + 2 \cdot 12{,}57 = 48{,}1 \text{ см}^2.$$

4. Ищем координаты центра масс сечения. Вертикальная ось $CY$ является осью симметрии сечения. Любая ось симметрии сечения является его главной осью. Центр масс лежит на оси симметрии, следовательно, $X_c = 0$. Статический момент сечения относительно горизонтальной оси $X_H$, проходящей через нижнюю грань равнополочного уголка, равен

$$S_{XH} = k_1 \cdot F_1 \cdot x_{01} + k_2 \cdot F_2 \cdot (h - x_{02}) =$$
$$= 2 \cdot 11{,}50 \cdot 2{,}15 + 2 \cdot 12{,}57 \cdot (30 - 1{,}50) = 816 \text{ см}^3.$$

Расстояние от нижней грани равнополочного уголка до центра масс сечения равно $Y_c = S_{XH}/F = 816/48{,}1$=17,0 см. Центр масс сечения обозначаем буквой $C$ и указываем на рис. 5.3.

5. Строим главные центральные оси сечения. Для этого, через точку $C$ проводим ось $CX$, перпендикулярную оси $CY$. В качестве положительного на оси $CX$ выберем направление слева направо, а на оси $CY$ положительным будем считать направление снизу вверх. Оси $CXY$являются главными центральными осями сечения.

Расстояние от верхних граней неравнополочных уголков до оси $CX$ равно $Y_в = h - Y_c = 30 - 17{,}0 = 13{,}0$ см. Крайние точки Л и П длинных полок неравнополочных уголков удалены от оси $CY$ на расстояние $|X_л| = X_п = = \delta/2 + B = 0{,}8/2 + 10{,}0 = 10{,}4$ см.

Координаты центров масс уголков в системе осей $CXY$ :

$$Y_1 = -Y_C + x_{01} = -17{,}0 + 2{,}15 = -14{,}8 \text{ см},$$

$$Y_2 = h - Y_C - x_{02} = 30{,}0 - 17{,}0 - 1{,}50 = 13{,}5 \text{ см},$$

$$X_1 = \delta/2 + x_{01} = 0{,}8/2 + 2{,}15 = 2{,}55 \text{ см},$$

$$X_2 = \delta/2 + x_{02} = 0{,}8/2 + 3{,}32 = 3{,}72 \text{см}.$$

6. Осевые моменты инерции сечения вычисляем по формуле Гюйгенса

$$J_X = \sum_{i=1}^{K} \left(J_{xi} + F_i \cdot a_i^2\right),$$

где $K$ – количество элементов в сечении; $J_{xi}$ – момент инерции относительно центральной оси элемента $i$, параллельной оси $X$; $F_i$ – площадь элемента $i$; $a_i$ – расстояние между осью $X$ и параллельной ей центральной осью элемента $i$.

Учитываем, что неравнополочный уголок повёрнут относительно изображения, показанного на на рис. 5.4, на 90° (или 270°) относительно чертежа из ГОСТ. Параллельной для оси *CX* является местная центральная ось $\boldsymbol{y_2}$, а для оси *CY* параллельной будет местная центральная ось $\boldsymbol{x_2}$.
Получаем:

$$J_X = k_1 \cdot (J_{x1} + F_1 \cdot Y_1^2) + k_2 \cdot \left(J_{y2} + F_2 \cdot Y_2^2\right) = 2 \cdot (59{,}84 + 11{,}50 \cdot ((-14{,}8)^2) +$$

$$+2 \cdot (39{,}21 + 12{,}57 \cdot 13{,}5^2) = 9850 \text{ см}^4;$$

$$J_Y = k_1 \cdot \left(J_{y1} + F_1 X_1^2\right) + k_2 \cdot (J_{x2} + F_2 X_2^2) = 2 \cdot (59{,}84 + 11{,}50 \cdot 2{,}55^2) +$$

$$2 \cdot (126{,}96 + 12{,}57 \cdot 3{,}72\text{^}2) = 871 \text{ см}^4.$$

7.Ось $\boldsymbol{CY}$ является осью симметрии сечения. Осевой момент сопротивления для оси $\boldsymbol{CY}$ равен $\boldsymbol{W_Y = J_Y / X_{max} = 871/10{,}4 = 83{,}8}$ см$^3$.

Здесь $\boldsymbol{X_{max} = |X_л| = |X_л| = X_п = 10{,}4}$ см – расстояние до оси $\boldsymbol{CY}$ от крайних левых и правых волокон.

Главная ось $\boldsymbol{CX}$ не является осью симметрии. Момент сопротивления изгибу для нижних волокон $\boldsymbol{W_{Xн} = J/Y_н = 9850/17{,}0 = 581}$ см$^3$ . Для верхних волокон получаем $\boldsymbol{W_{Xв} = J_X / Y_в = 9850/13{,}0 = 655}$ см$^3$.

8. Радиус инерции сечения относительно оси определяется по формуле

$$\boldsymbol{i = \sqrt{J/F}}.$$

Для заданного сечения получаем $\boldsymbol{i_X = \sqrt{J_X/F = \sqrt{9850/48{,}1 = 14{,}3}}}$ см,

$\boldsymbol{i_Y = \sqrt{J_Y/F = \sqrt{871/48{,}1 = 4{,}25}}}$ см.

## Задача № 6. Расчёт статически неопределимых стержневых систем

Для заданной статически неопределимой системы определить допускаемое значение силы $P$ при допускаемом напряжении для стальных стержней $[\sigma]=160$ МПа.

Плита BC схемы (рис.6.1) абсолютно жесткая.

На рисунке 6.1 изображена абсолютно жесткая балка $BC$, нагруженная посередине силой $P$. Балка удерживается в горизонтальном положении шарнирно – подвижной опорой $C$ и тремя стальными стержнями. Заданы площади сечений стержней $A_1$= 4 см$^2$; $A_2$ = 3 см$^2$; $A_3$ = 2 см$^2$. Определить допускаемое значение силы $P$ , если допускаемое напряжение для материала стержней, равное $[\sigma]$ = 160МПа , одинаково при растяжении и сжатии.

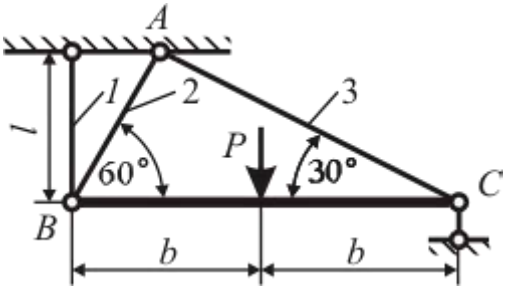



Рис.6.1. Статически неопределимая система

### РЕШЕНИЕ

Допускаемая нагрузка (сила $P$) определяется по условию прочности наиболее напряженного стержня. Полагая значение силы $P$ известным, найдем напряжения в сечениях стержней системы, выразив их через силу $P$. Исходные данные для решения задач приведены в табл.6.1 и рис.6.

Мысленно рассекаем стержни и, полагая стержни растянутыми, изображаем силы, приложенные к отсеченной части (рис. 1.5).

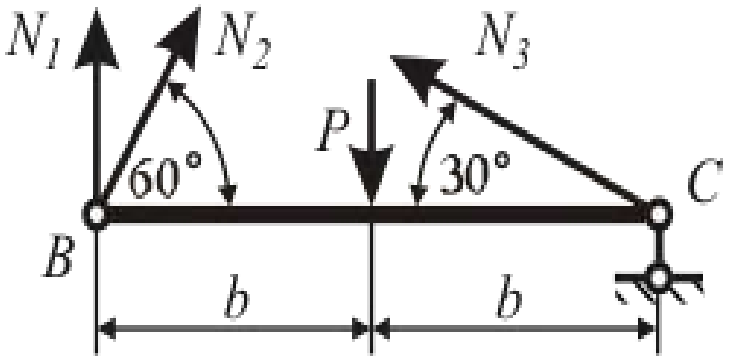



Рис.6.2. Уравновешенная система сил

Уравнения равновесия

$$\begin{aligned} &\Sigma X_i = 0; \quad N_2 \cos 60^\circ - N_3 \cos 30^\circ = 0. \\ &\Sigma Y_i = 0; \quad N_1 + N_2 \sin 60^\circ + N_3 \sin 30^\circ + Y_C - P = 0. \\ &\Sigma m_c = 0; \quad N_1 \cdot 2\hat{a} + N_2 \cdot 2\hat{a} \sin 60^\circ - P\hat{a} = 0. \end{aligned} \qquad (6.1)$$

Система (6.1) содержит 4 неизвестных величины: $N_1$, $N_2$, $N_3$ и $Y_c$. Лишь второе уравнение содержит реакцию опоры $C$, величина которой не влияет на значение допускаемой нагрузки, а потому ограничимся первым и третьим уравнениями.

Двух уравнений системы (6.1) недостаточно для определения трех продольных сил. Необходимо дополнить их уравнением совместности деформаций. По условию задачи брус $BC$ является абсолютно жестким. Значит, перемещение системы осуществляется лишь за счет деформации стержней. Опора $C$ допускает только горизонтальное смещение узла $C$. Следует учесть, что истинные перемещения точек $B$ и $C$ в сотни раз меньше размеров бруса $BC$. Поэтому перемещения точек стержней при их поворотах изображены не дугами окружностей, а прямыми отрезками, перпендикулярными стержням. Заметим, что стержень 3 по предположению растянут, но на рисунке изображено его укорочение, значит изображенная деформация его не $\Delta l_3$, а – $\Delta l_3$.

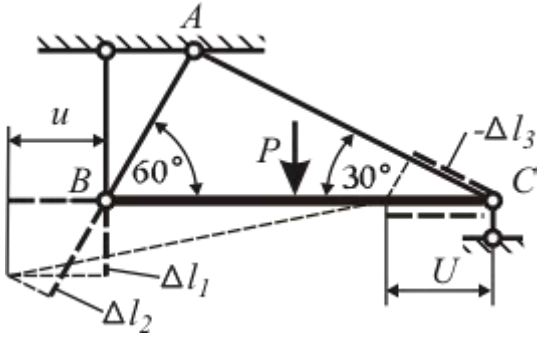



Рис.6.3. Деформации и перемещения

По рисунку 6.3

$$\Delta l_2 = \Delta l_1 \cos 30^\circ + u \cos 60^\circ .$$

При $u = -\Delta l_3 / \cos 30^\circ$ получаем геометрическую связь деформаций

$$\Delta l_2 = \Delta l_1 \cos 30^\circ - \Delta l_3 tg 30^\circ . \qquad (6.2)$$

В соответствии с законом Гука

$$\Delta l_1 = \frac{N_1 l_1}{EA_1} = \frac{N_1 l}{EA_1},$$

$$\Delta l_2 = \frac{N_2 l_2}{EA_2} = \frac{N_2 l}{EA_2 \sin 60^\circ}, \qquad (6.3)$$

$$\Delta l_3 = \frac{N_3 l_3}{EA_3} = \frac{N_3 l}{EA_3 \sin 30^\circ}.$$

Подстановкой выражений (6.3) в равенство (6.2) получим уравнение, дополняющее систему(6.1).

$$\frac{N_2 l}{EA_2 \sin 60^\circ} = \frac{N_1 l}{EA_1} \cos 30^\circ - \frac{N_3 l}{EA_3 \sin 30^\circ} tg 30^\circ. \qquad (6.4)$$

После подстановки значений $A_1$, $A_2$, $A_3$и упрощения уравнений (6.1) и (6.3) получим систему

$$\begin{aligned} &N_2 - 1,732 N_3 = 0; \\ &N_1 + 0,866 N_2 = 0,5P; \\ &9N_1 - 16N_2 - 24N_3 = 0. \end{aligned} \qquad (6.5)$$

Решение уравнений (6.5)

$N_1 = 0,396P$, $N_2 = 0,119P$, $N_3 = 0,069P$.

При заданных сечениях стержней

$$\sigma_1 = \frac{N_1}{A_1} = \frac{0,396P}{4} = 0,0991P;$$

$$\sigma_2 = \frac{N_2}{A_2} = \frac{0,119P}{3} = 0,0398P;$$

$$\sigma_3 = \frac{N_3}{A_3} = \frac{0,069P}{2} = 0,0395P.$$

Наибольшее напряжение

$$\sigma_{\max} = \sigma_1 = 0,0991P.$$

По условию прочности $\sigma_{\max} \le [\sigma]$ допускаемая нагрузка

$$[P] = \frac{[\sigma]}{0,0991} = \frac{16}{0,0991} = 161 \text{ кН}.$$

$$[P] = 161 \text{ кН}.$$

Исходные данные сведены в табл. 6.1, расчетные схемы даны на рис.6.4.

Таблица 6.1.

Исходные данные для задачи №6

| № | Площадь сечения стержней, см$^2$ | | | Номер схемы | № | Площадь сечения стержней, см$^2$ | | | Номер схемы |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ | | | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 26 | 4 | 2 | 1 | 6 |
| 2 | 3 | 4 | 2 | 2 | 27 | 6 | 3 | 2 | 5 |
| 3 | 5 | 6 | 7 | 3 | 28 | 8 | 4 | 3 | 4 |
| 4 | 6 | 7 | 5 | 4 | 29 | 10 | 5 | 4 | 3 |
| 5 | 3 | 17 | 1 | 5 | 30 | 1 | 6 | 5 | 2 |
| 6 | 4 | 1 | 2 | 6 | 31 | 2 | 7 | 6 | 1 |
| 7 | 5 | 6 | 3 | 7 | 32 | 12 | 8 | 7 | 2 |
| 8 | 6 | 15 | 4 | 8 | 33 | 14 | 9 | 8 | 4 |
| 9 | 7 | 15 | 5 | 9 | 34 | 16 | 16 | 9 | 6 |
| 10 | 8 | 14 | 6 | 10 | 35 | 3 | 16 | 10 | 8 |
| 11 | 9 | 13 | 7 | 2 | 36 | 5 | 15 | 11 | 10 |
| 12 | 10 | 12 | 8 | 4 | 37 | 7 | 14 | 12 | 9 |
| 13 | 11 | 8 | 9 | 6 | 38 | 9 | 13 | 13 | 7 |
| 14 | 12 | 9 | 10 | 8 | 39 | 11 | 12 | 14 | 5 |
| 15 | 13 | 7 | 11 | 10 | 40 | 13 | 11 | 15 | 3 |
| 16 | 14 | 6 | 12 | 1 | 41 | 15 | 10 | 16 | 1 |
| 17 | 15 | 5 | 13 | 3 | 42 | 7 | 9 | 14 | 10 |
| 18 | 16 | 4 | 17 | 5 | 43 | 5 | 8 | 13 | 9 |
| 19 | 3 | 12 | 16 | 7 | 44 | 3 | 7 | 12 | 8 |
| 20 | 4 | 11 | 15 | 9 | 45 | 1 | 6 | 11 | 7 |
| 21 | 5 | 12 | 14 | 10 | 46 | 2 | 5 | 10 | 6 |
| 22 | 6 | 13 | 13 | 9 | 46 | 6 | 4 | 9 | 5 |
| 23 | 6 | 14 | 12 | 8 | 48 | 8 | 3 | 8 | 4 |
| 24 | 7 | 15 | 11 | 7 | 49 | 4 | 2 | 7 | 3 |
| 25 | 9 | 12 | 10 | 3 | 50 | 4 | 25 | 11 | 6 |

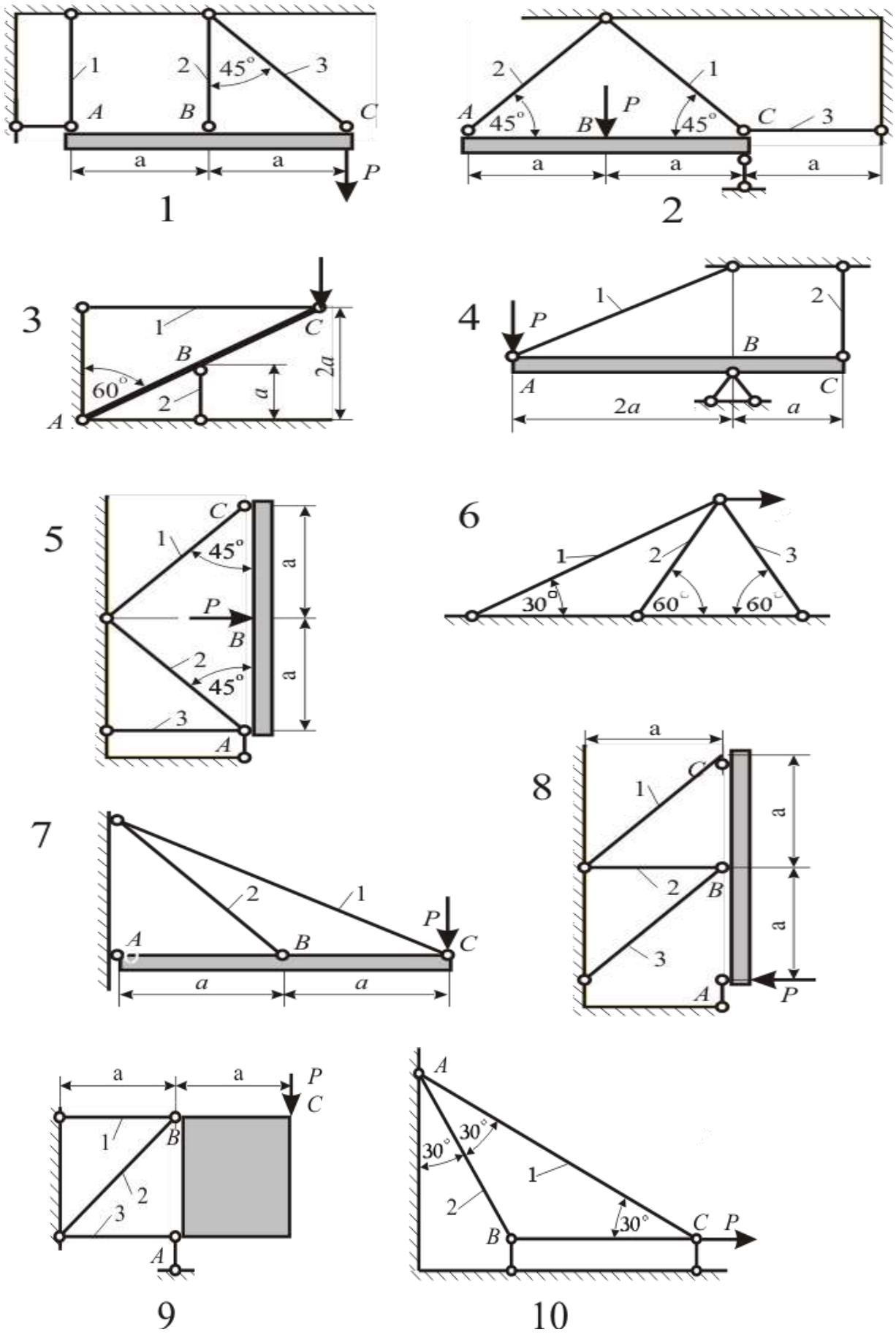



Рис.6.4. Схемы 1 – 10 стержневых систем

## Задача № 7.Расчет статически неопределимых балок

Подобрать из условия прочности сечение многопролётной неразрезной балки (рис. 7.1 – 7.4). Сечение – двутавр ГОСТ 8239-89. Допускаемые напряжения стали $\sigma = 200$ [МПа]. Данные для расчёта взять из табл. 7.

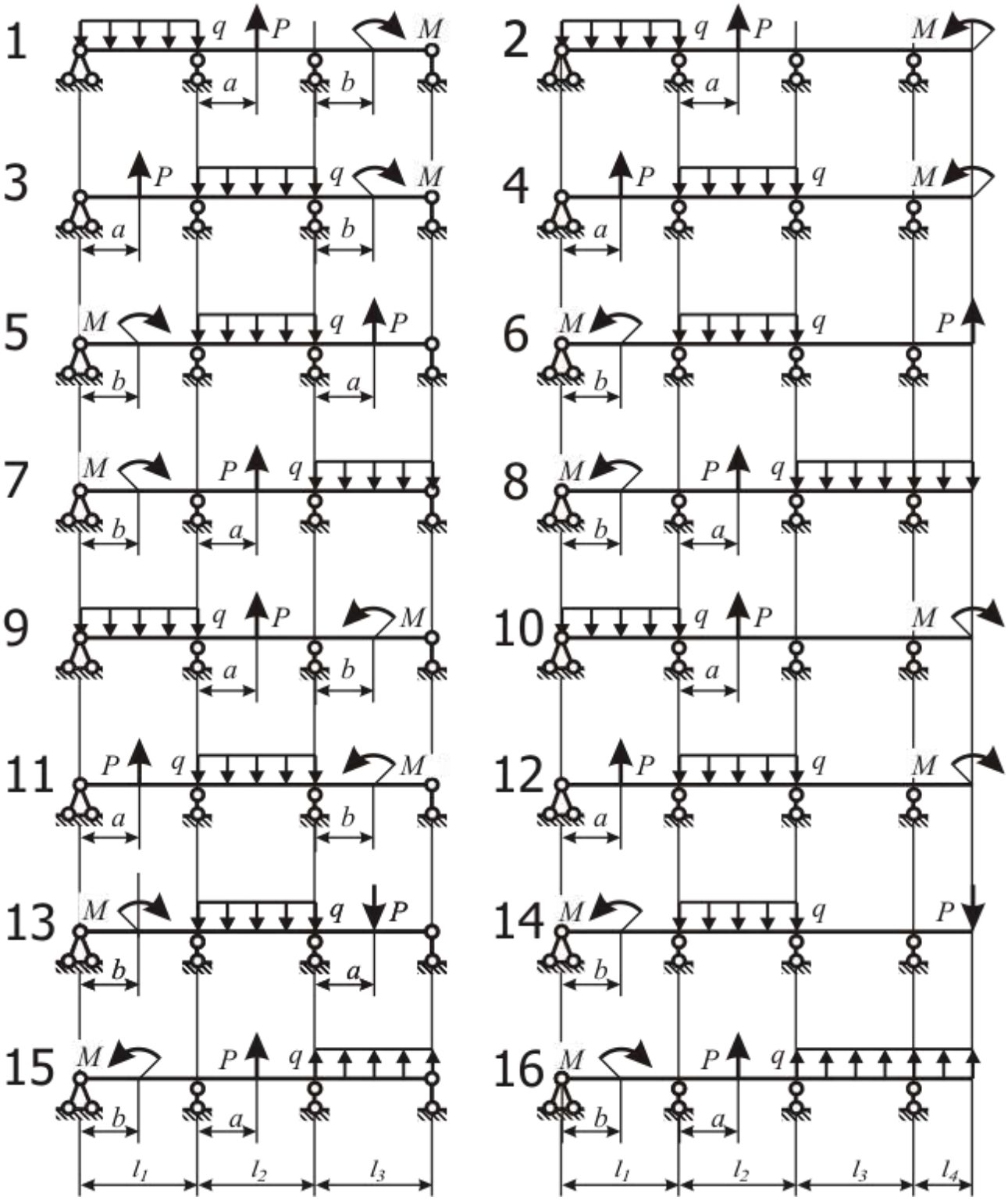



Рис. 7.1. Многопролётная неразрезная балка (варианты 1 – 16)

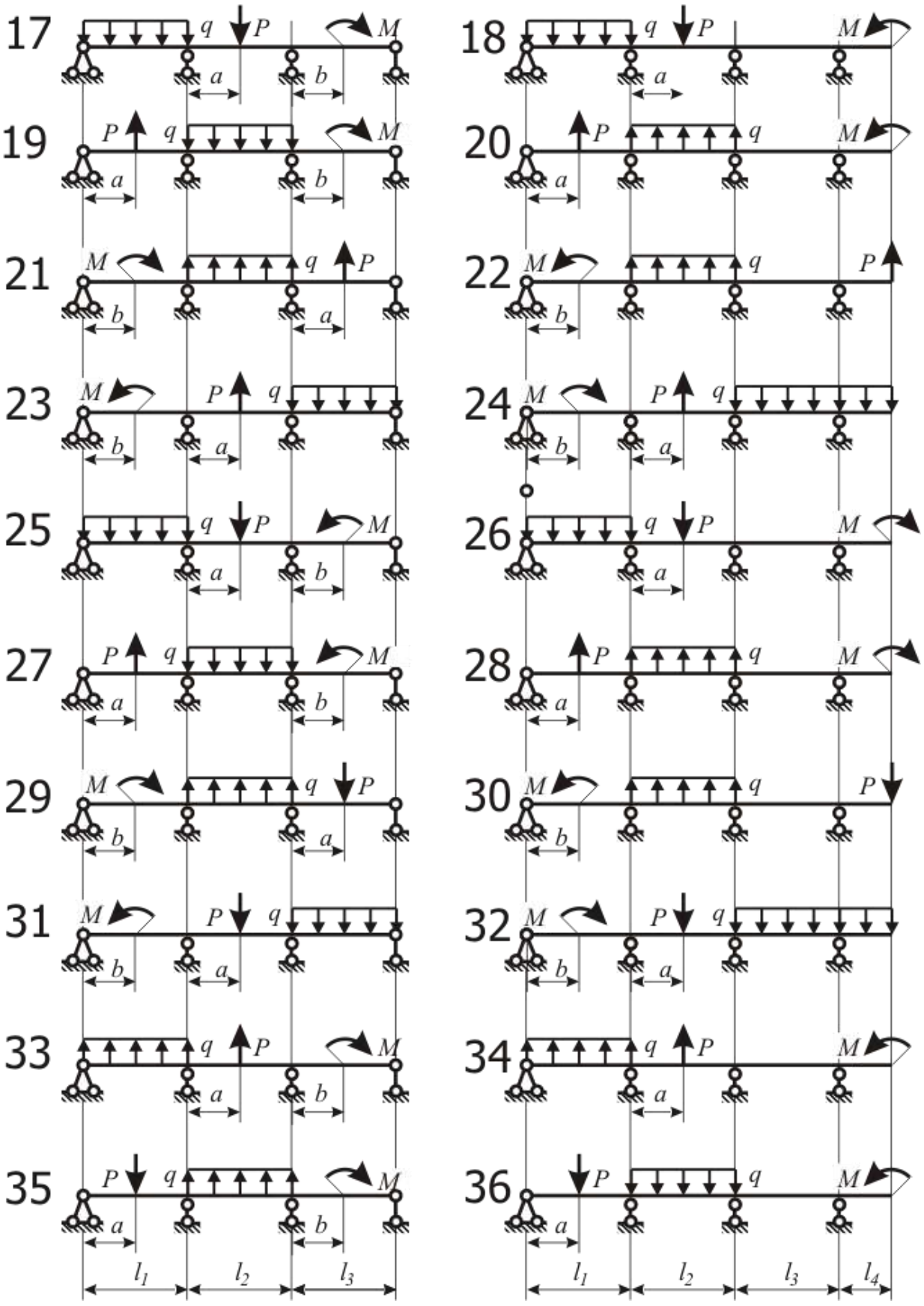



Рис. 7.2. Многопролётная неразрезная балка (варианты 17 – 36)

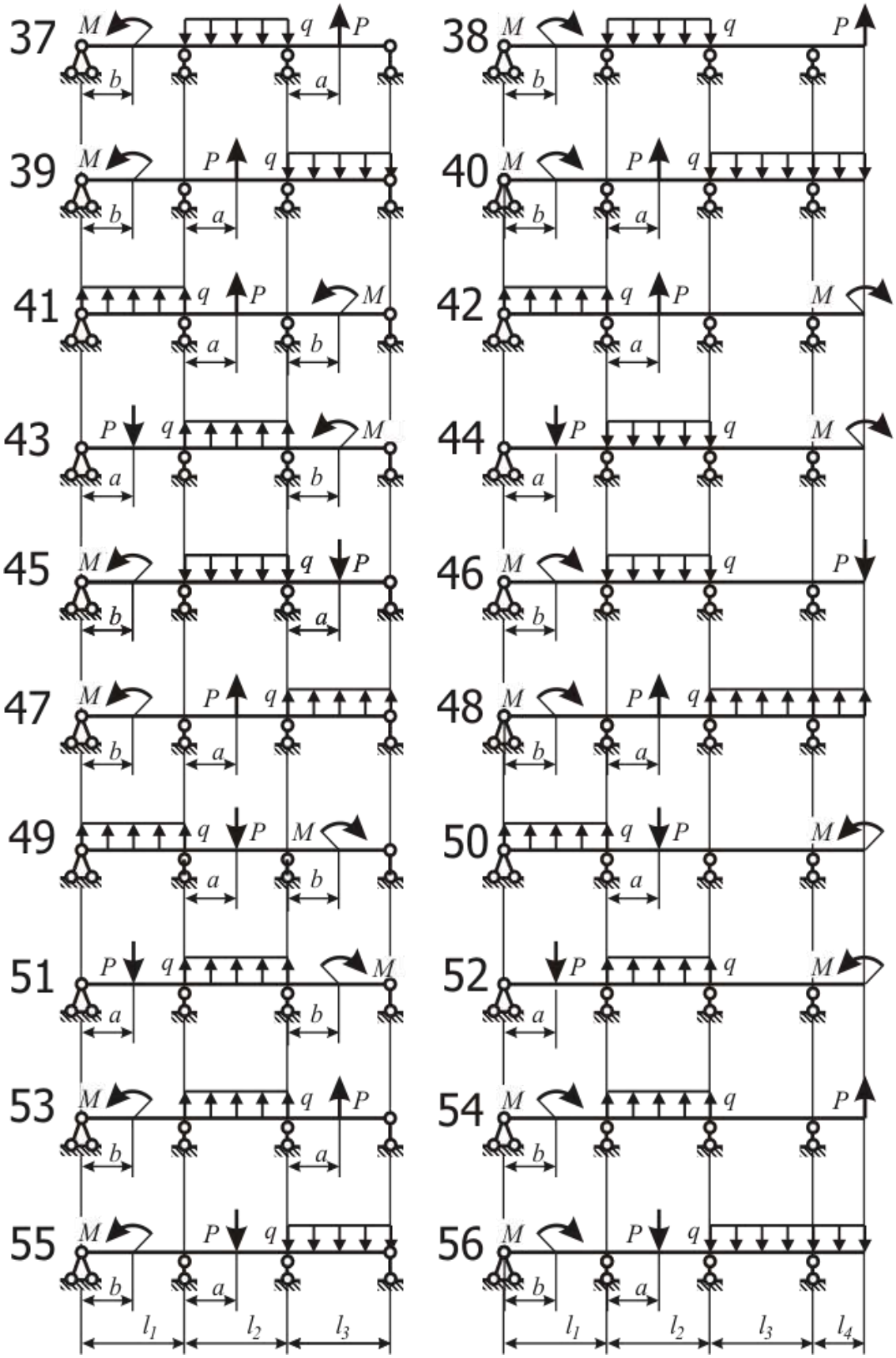



Рис. 7.3. Многопролётная неразрезная балка (варианты 37 – 56)

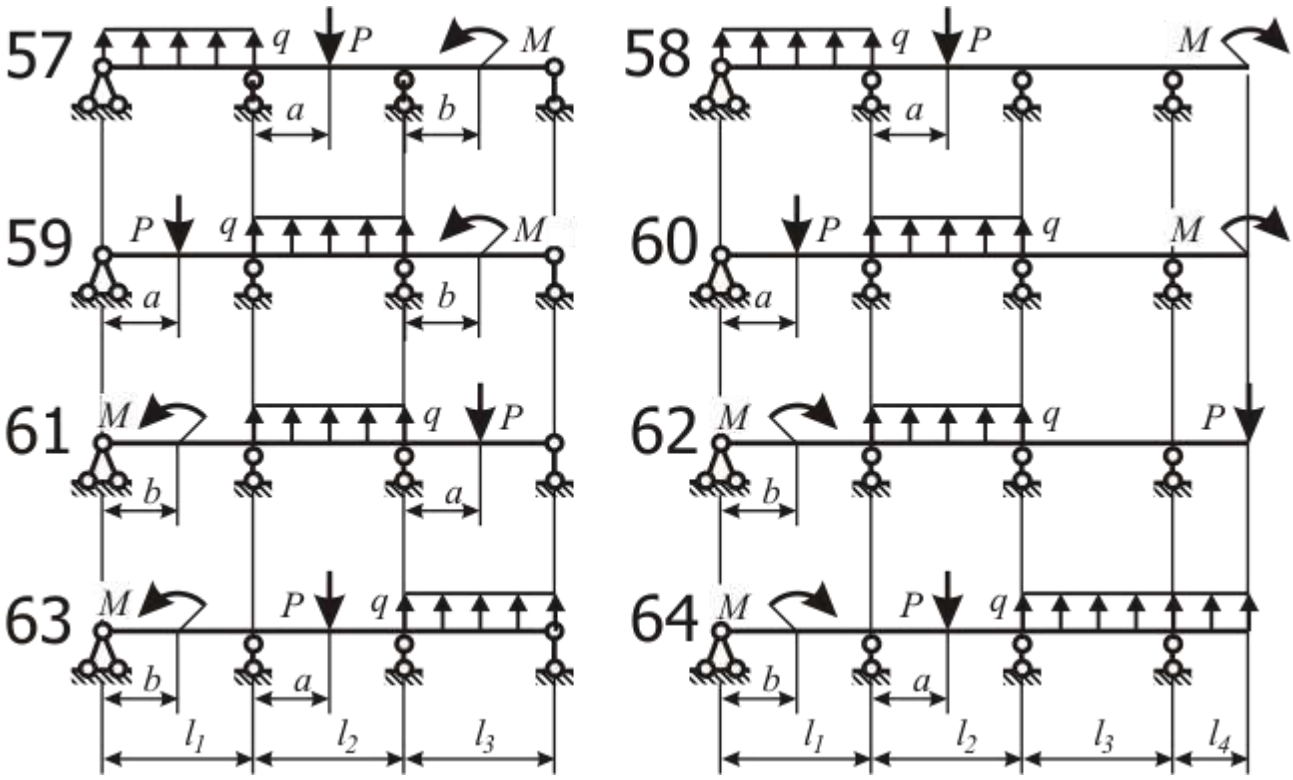



Рис. 7.4. Многопролётная неразрезная балка (варианты 57 – 64)

Исходные данные к задаче 7 Таблица 7

| Номер задания | Длина участка, м | | | | Нагрузка | | | Координата точки приложения, м | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $l_1$ | $l_2$ | $l_3$ | $l_4$ | $P$, кН | $M$, кН·м | $q$, $^{Н}/_{м}$ | силы, $a$ | момента, $b$ |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | 4,0 | 5,0 | 3,0 | – | 80 | 165 | 20 | 3,0 | 2,0 |
| 2 | 3,5 | 5,5 | 3,5 | 1,5 | 90 | 175 | 25 | 2,0 | – |
| 3 | 3,0 | 6,0 | 4,0 | – | 90 | 185 | 30 | 1,5 | 2,0 |
| 4 | 3,0 | 6,0 | 4,5 | 2,0 | 80 | 195 | 35 | 2,0 | – |
| 5 | 3,5 | 5,5 | 5,0 | – | 70 | 105 | 30 | 2,0 | 1,5 |
| 6 | 4,0 | 5,0 | 5,5 | 2,5 | 60 | 115 | 30 | – | 2,0 |
| 7 | 4,5 | 4,5 | 6,0 | – | 50 | 125 | 25 | 3,0 | 2,5 |
| 8 | 5,0 | 4,0 | 6,0 | 3,0 | 40 | 135 | 25 | 2,5 | 3,0 |
| 9 | 5,5 | 3,5 | 5,5 | – | 40 | 145 | 20 | 2,0 | 2,5 |
| 10 | 6,0 | 3,5 | 5,0 | 3,0 | 59 | 155 | 20 | 1,5 | – |
| 11 | 6,0 | 4,0 | 4,5 | – | 60 | 165 | 25 | 4,0 | 3,0 |
| 12 | 5,5 | 4,5 | 4,0 | 2,5 | 70 | 175 | 20 | 3,5 | – |
| 13 | 5,0 | 5,0 | 3,5 | – | 80 | 185 | 35 | 1,5 | 3,5 |
| 14 | 4,5 | 5,5 | 3,0 | 2,0 | 90 | 195 | 35 | – | 1,5 |
| 15 | 4,0 | 6,0 | 3,0 | – | 90 | 105 | 15 | 4,0 | 2,0 |
| 16 | 3,5 | 6,0 | 3,5 | 1,5 | 80 | 115 | 20 | 3,5 | 1,5 |
| 17 | 3,5 | 5,5 | 4,0 | – | 70 | 125 | 25 | 3,0 | 1,5 |
| 18 | 4,0 | 5,0 | 4,5 | 1,5 | 60 | 135 | 30 | 2,5 | – |
| 19 | 4,5 | 4,5 | 5,0 | – | 50 | 145 | 35 | 3,0 | 2,0 |

Продолжение табл. 7

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 5,0 | 4,0 | 5,5 | 2,0 | 40 | 155 | 35 | 2,0 | – |
| 21 | 5,5 | 3,5 | 6,0 | – | 40 | 165 | 30 | 3,5 | 4,5 |
| 22 | 6,0 | 3,5 | 6,0 | 2,5 | 59 | 175 | 25 | – | 4,0 |
| 23 | 6,0 | 4,0 | 5,5 | – | 60 | 185 | 20 | 3,0 | 3,5 |
| 24 | 5,5 | 4,5 | 5,0 | 3,0 | 70 | 195 | 15 | 2,5 | 3,0 |
| 25 | 5,0 | 5,0 | 4,5 | – | 80 | 105 | 15 | 2,0 | 2,5 |
| 26 | 4,5 | 5,5 | 4,0 | 3,0 | 90 | 115 | 20 | 1,5 | – |
| 27 | 4,0 | 6,0 | 3,5 | – | 90 | 125 | 25 | 1,5 | 2,0 |
| 28 | 3,5 | 6,0 | 3,0 | 2,5 | 80 | 135 | 30 | 2,0 | – |
| 29 | 3,5 | 5,5 | 3,0 | – | 70 | 145 | 35 | 1,5 | 2,5 |
| 30 | 4,0 | 5,0 | 3,5 | 2,0 | 60 | 155 | 35 | – | 2,0 |
| 31 | 4,5 | 4,5 | 4,0 | – | 50 | 165 | 30 | 3,0 | 1,5 |
| 32 | 5,0 | 4,0 | 4,5 | 1,5 | 40 | 175 | 25 | 2,5 | 3,5 |
| 33 | 5,5 | 3,5 | 5,0 | – | 40 | 185 | 20 | 2,0 | 3,5 |
| 34 | 6,0 | 3,5 | 5,5 | 1,5 | 59 | 195 | 15 | 1,5 | – |
| 35 | 6,0 | 4,0 | 6,0 | – | 60 | 105 | 15 | 4,5 | 4,0 |
| 36 | 5,5 | 4,5 | 6,0 | 2,0 | 70 | 115 | 20 | 4,0 | – |
| 37 | 5,0 | 5,0 | 5,5 | – | 80 | 125 | 25 | 3,0 | 2,5 |
| 38 | 4,5 | 5,5 | 5,0 | 2,5 | 90 | 135 | 30 | – | 2,0 |
| 39 | 4,0 | 6,0 | 4,5 | – | 90 | 145 | 35 | 4,5 | 1,5 |
| 40 | 3,5 | 6,0 | 4,0 | 3,0 | 80 | 155 | 35 | 4,0 | 2,0 |
| 41 | 3,5 | 5,5 | 3,5 | – | 70 | 165 | 30 | 3,5 | 1,5 |
| 42 | 4,0 | 5,0 | 3,0 | 3,0 | 60 | 175 | 25 | 3,0 | – |
| 43 | 4,5 | 4,5 | 3,0 | – | 50 | 185 | 20 | 3,5 | 2,0 |
| 44 | 5,0 | 4,0 | 3,5 | 2,5 | 40 | 195 | 15 | 3,0 | – |
| 45 | 5,5 | 3,5 | 4,0 | – | 40 | 105 | 15 | 2,5 | 3,0 |
| 46 | 6,0 | 3,5 | 4,5 | 2,0 | 59 | 115 | 20 | – | 2,5 |
| 47 | 6,0 | 4,0 | 5,0 | – | 60 | 125 | 25 | 2,5 | 2,0 |
| 48 | 5,5 | 4,5 | 5,5 | 1,5 | 70 | 135 | 30 | 2,0 | 1,5 |
| 49 | 5,0 | 5,0 | 6,0 | – | 80 | 145 | 35 | 1,5 | 2,5 |
| 50 | 4,5 | 5,5 | 6,0 | 1,5 | 90 | 155 | 35 | 4,0 | – |
| 51 | 4,0 | 6,0 | 5,5 | – | 90 | 165 | 30 | 2,5 | 3,0 |
| 52 | 3,5 | 6,0 | 5,0 | 2,0 | 80 | 175 | 25 | 2,0 | – |
| 53 | 3,5 | 5,5 | 4,5 | – | 70 | 185 | 20 | 2,0 | 3,5 |
| 54 | 4,0 | 5,0 | 4,0 | 2,5 | 60 | 195 | 15 | – | 3,0 |
| 55 | 4,5 | 4,5 | 3,5 | – | 50 | 105 | 15 | 3,5 | 2,5 |
| 56 | 5,0 | 4,0 | 3,0 | 3,0 | 40 | 115 | 20 | 3,0 | 2,0 |
| 57 | 5,5 | 3,5 | 3,0 | – | 40 | 125 | 25 | 2,5 | 1,5 |
| 58 | 6,0 | 3,5 | 3,5 | 3,0 | 59 | 135 | 30 | 2,0 | – |
| 59 | 6,0 | 4,0 | 4,0 | – | 60 | 145 | 35 | 1,5 | 2,0 |
| 60 | 5,5 | 4,5 | 4,5 | 2,5 | 70 | 155 | 35 | 4,5 | – |
| 61 | 5,0 | 5,0 | 5,0 | – | 80 | 165 | 30 | 1,5 | 3,0 |
| 62 | 4,5 | 5,5 | 5,0 | 2,0 | 90 | 175 | 25 | – | 2,5 |
| 63 | 4,0 | 6,0 | 5,5 | – | 90 | 185 | 20 | 4,5 | 2,0 |
| 64 | 3,5 | 6,0 | 6,0 | 1,5 | 80 | 195 | 15 | 4,0 | 1,5 |

## ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ № 7

Раскрыть статическую неопределимость неразрезной трёхпролётной балки (рис. 7.5). Нагрузки и длину пролёта принять равными: $P = 20$ кН; $M = 20{,}0$ кНм; $q = 10{,}0$кН/м; $L = 2{,}00$ м. Построить эпюры внутренних силовых факторов.

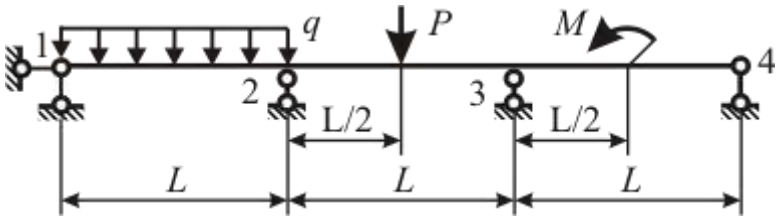



Рис. 7.5. Схема неразрезной балки

1. Чертим схему балки в масштабе (рис. 7.6, а). Нумеруем опорные узлы. Шарнирно неподвижную опору 1 изображаем в виде горизонтального и вертикального опорных стержней (1в) и (1г).

2. Находим степень статической неопределимости $N_{не}$ балки. Для этого определяем число опорных стержней $N_{ст} = 5$ (два опорных стержня в шарнирно неподвижной опоре 1 и по одному в шарнирно подвижных опорах 2, 3, 4). Из числа опорных стержней вычитаем число уравнений статики $N_{ур}$ (три – в рассматриваемом случае плоского изгиба балки).

Получаем $N_{не} = N_{ст} - N_{ур} = 5 - 3 = 2$.

Балка дважды статически неопределима.

3. Выбираем основную систему. Основная система должна быть статически определимой и неизменяемой. Чтобы балка (см. рис. 7.6, а) стала статически определимой, отбросим два любых вертикальных опорных стержня. Например, при удалении стержней 3 и 4 получаем основную систему, показанную на рис. 7.6, б. Если отбросить стержни 1в и 4, то основная система, примет вид, данный на рис. 7.6, в. Горизонтальный стержень 1г отбрасывать нельзя, так как при его удалении система становится изменяемой (рис. 7.6, г). Степень статической неопределимости системы можно понизить путём отбрасывания внутренних связей.

Выберем основную систему, указанную на рис. 7.6, б.

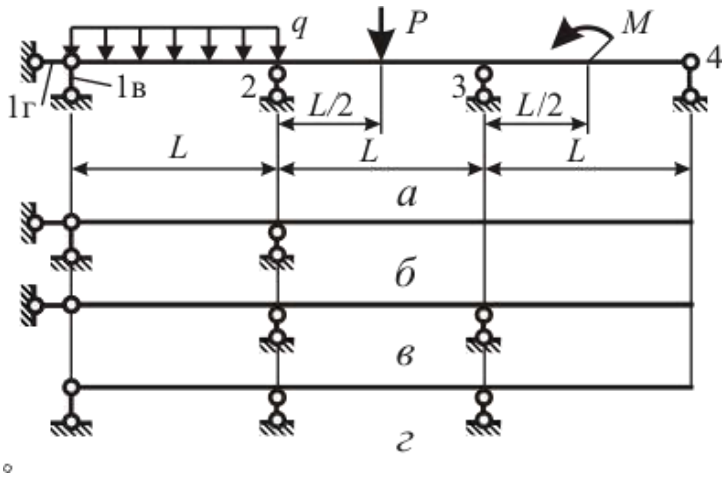



Рис. 7.6. К выбору основной системы

4. Эквивалентной системой называют основную систему, к которой приложены внешние нагрузки и неизвестные реакции отброшенных связей. Прикладываем неизвестные реакции $X_1$, $X_2$ в точках крепления отброшенных опорных стержней 4 и 3. Линии действия этих реакций совпадают с осями отброшенных стержней, направление реакций вдоль их линий действия выбираем произвольно. Если выбранное направление реакции не совпадёт с истинным, то полученное при раскрытии статической неопределимости значение избыточного неизвестного будет отрицательным. Эквивалентная система приведена на рис. 7.7.

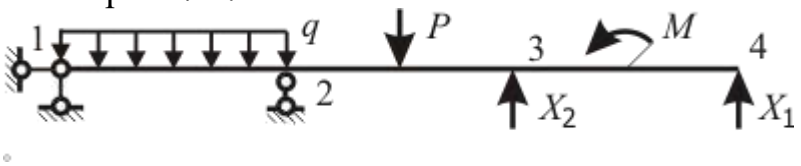



Рис. 7.7. Эквивалентная система

5. Идея раскрытия статической неопределимости методом сил состоит в следующем. Эквивалентная система деформируется так же, как исходная. Так как опорные стержни 3 и 4 являются абсолютно жёсткими, вертикальные перемещения точек 3 и 4 равны нулю. К уравнениям равновесия добавлены два дополнительных уравнения, из которых можно определить избыточные неизвестные $X_1$, $X_2$ (чаще их называют «лишними»).

$$\left.\begin{aligned} y_1 &= 0, \\ y_2 &= 0 \end{aligned}\right\} \qquad (7.1)$$

Используя принцип независимости действия сил, представим перемещение каждой точки как сумму трёх перемещений: от силы $X_1$, от силы $X_2$иот внешней нагрузки. Система уравнений примет вид (7.5). Первый индекс указывает номер отброшенной связи, второй индекс указывает причину, вызывающую смещение в направлении этой связи.

$$\left.\begin{aligned} y_{11} + y_{12} + y_{1\varepsilon} &= 0, \\ y_{21} + y_{22} + y_{2\varepsilon} &= 0 \end{aligned}\right\}. \qquad (7.2)$$

Перемещение $y_{i\varepsilon}$ по направлению отброшенной связи $i$, вызванное действующей на эквивалентную систему внешней нагрузкой, называют грузовым членом канонического уравнения и обозначают заглавной греческой буквой «дельта» $\Delta_i = y_{i\varepsilon}$ .Его определяют с помощью интеграла перемещений

$$\Delta_i = \int_0^{3L} ((M_\varepsilon(z)\overline{M_i}(z))/(EJ))dz, \qquad (7.3)$$

Где: 3L – длина балки; $M_\varepsilon(z)$ – грузовой момент в балке (момент от внешней нагрузки); $\overline{M_i}(z)$ – единичный момент (момент от единичной силы, совпадающей по направлению с силой $X_i$ и приложенной в той же точке $i$); $EJ$(z) – изгибная жёсткость балки.

6. Строим эпюру грузового момента в порядке, изложенном при рассмотрении задачи 3.

6.1. Отбрасываем опорные стержни, их действие заменяем опорными реакциями $R_{1\varepsilon}$ и $R_{2\varepsilon}$. Здесь и далее первый индекс указывает точку, в которой

приложена реакция, второй индекс указывает причину, вызвавшую реакцию. Выбранное направление реакций указано на рис. 7.8, б. Сумма проекций внешних нагрузок на горизонтальную ось $Oz$равна нулю. Следовательно горизонтальная реакция на опоре 1 (в стержне 1г) равна нулю и поэтому на рис. 7.8, б не указана.

6.2. Составляем уравнения равновесия моментов относительно опорных точек 1 и 2 (при таком выборе центров моментов система двух уравнений равновесия расщепляется на два независимых уравнения)

$$\left.\begin{aligned} L\,R_{2г} - (qL^2)/2 - 1{,}5\,LP + M = 0, \\ -L\,R_{1г} + (qL^2)/2 - 0{,}5\,LP + M = 0 \end{aligned}\right\}. \qquad (7.4)$$

6.3. Решаем систему

$$\left.\begin{aligned} R_{1г} = ((qL^2)/2 - 0{,}5\,LP + M)/L = 10\ кН, \\ R_{2г} = ((qL^2)/2 + 1{,}5\,LP - M)/L = 30\,кН \end{aligned}\right\}. \qquad (7.5)$$

6.4. Для проверки составляем уравнение моментов относительно точки Щ (середины пролёта 1-2)

$$-0{,}5\,L\,R_{1г} + 0{,}5\,L\,R_{2г} - L\,P + M = 0. \qquad (7.6)$$

$$-0{,}5 \cdot 2 \cdot 20 + 0{,}5 \cdot 2 \cdot 30 - 2 \cdot 20 + 20 = 0.$$

6.5. Запишем аналитическое выражение для эпюры грузового момента. Ось балки обозначим Oz и направим слева направо. Начало координат $z$ выберем в самой левой точке балки (опоре 1).

$$M_г(z) = R_{1г}z - (qz^2)/2 + (R_{2г}(z-l) + q(z-l)^2/2)\,H(z-l) -$$

$$-P \cdot \left(z - {}^3/_2\,l\right)H\left(z - {}^3/_2\,l\right) - MH(z - {}^5/_2\,l). \qquad (7.7)$$

Эпюра грузового момента может быть построена как методом сечений, так и путём вычислений по формуле (7.7). Эпюра грузового момента представлена на рис. 7.8, в.

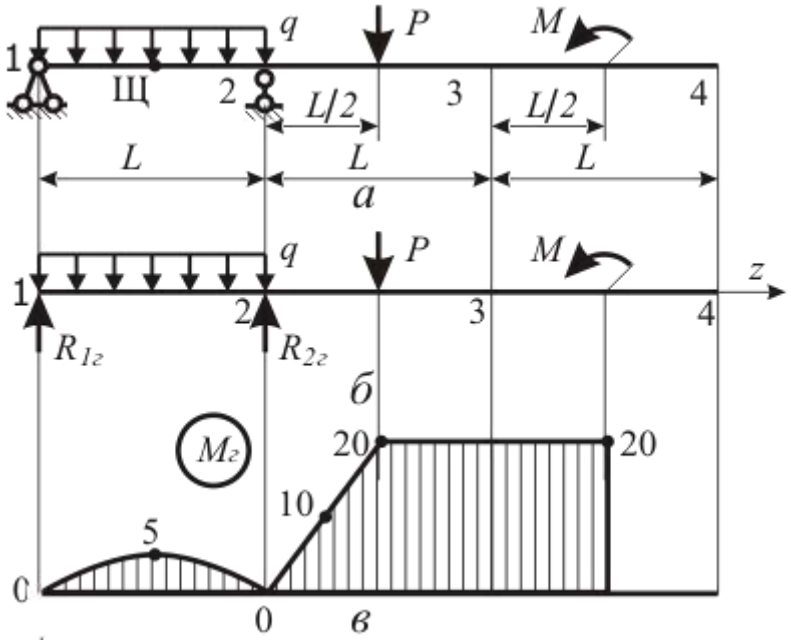



Рис. 7.8. К построению эпюры грузового момента $M_г$

7. Строим эпюру изгибающего момента от единичной силы, которая приложена в точке 4 и совпадает по направлению с избыточной неизвестной $X_1$ (полагаем неизвестную $X_1 = 1$). Момент от действия неизвестной $X_1 = 1$ называют единичным и выделяют надчёркиванием символа $M$. Построение эпюр изгибающих моментов рассмотрено в п. 6, а также в задаче 3. В случае консольной балки, нагруженной только на консоли, эпюру моментов можно построить без определения опорных реакций, Моменты на опоре 1 и в точке нагружения 4 (в которой к консоли приложена сила $X_1$) равны нулю: $\overline{M_1}(z_1) = 0$ , $\overline{M_1}(z_4) = 0$. Момент силы $X_1 = 1$ на опоре 2 равен $\overline{M_1}(z_2) = 2 \cdot L = 2 \cdot 2 = 4$ Н·м.

Проводим ось $Oz$. На вертикали 2 откладываем вверх (в выбранном масштабе) отрезок, равный значению $\overline{M_1}(z_2)$. Верхнюю точку отложенного отрезка соединяем прямыми с нулями точек 1 и 4 (рис. 7.9, в).

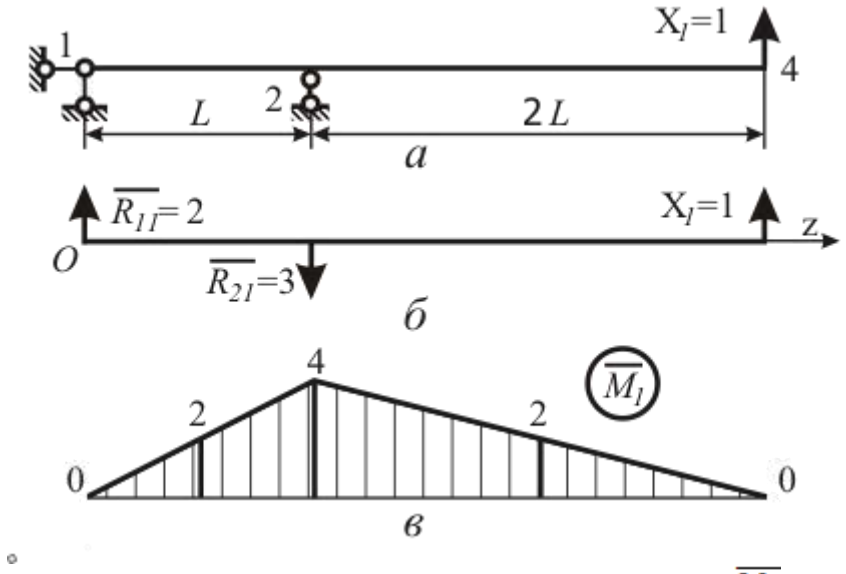



Рис. 7.9. К построению единичного момента $\overline{M_1}$

Аналитическое выражение для единичного момента запишем в виде

$$\overline{M_1(z)} = \overline{R_{11}}\, z - \overline{R_{21}}(z - L)\, H(z - L), \qquad (7.8)$$

где начало координат для оси $Oz$ взято в левом сечении балки (на опоре 1); реакции опор $\overline{R_{11}}$ и $\overline{R_{21}}$ от единичной силы $X_1 = 1$ найдены из уравнений равновесия моментов относительно опорных точек 2 и 1

$$\left.\begin{aligned} -L\,\overline{R_{11}} + 2\,L\,X_1 &= 0, \\ -L\,\overline{R_{21}} + 3\,l\,X_1 &= 0 \end{aligned}\right\}.$$

Получаем $\overline{R_{11}} = 2$ и $\overline{R_{21}} = 3$. Направления реакций указаны на рис. 7.9, б.

8. Построение эпюры единичного момента $\overline{M_2}$ от единичной силы, приложенной в точке 3 и совпадающей по направлению с избыточной неизвестной $X_2$ ($X_2 = 1$), схоже с построением $\overline{M_1}$ (см. рис. 7.9).

Моменты на опоре 1 и в точке 3 равны нулю: $\overline{M_2}(z_1) = \overline{M_2}(z_3) = 0$. Момент на опоре 2 от силы $X_2 = 1$ равен $\overline{M_2}(z_2) = 1 \cdot L = 2$. Проводим ось $Oz$. На вертикали 2 откладываем вверх (в выбранном масштабе) отрезок, равный

значению $\overline{M_2}(z_2)$. Верхнюю точку отложенного отрезка соединяем прямыми с нулями точек 1 и 3. Справа от точки 3 нагрузки отсутствуют, поэтому $\overline{M_2} \equiv 0$ на участке 3 - 4 (рис. 7.10, в).

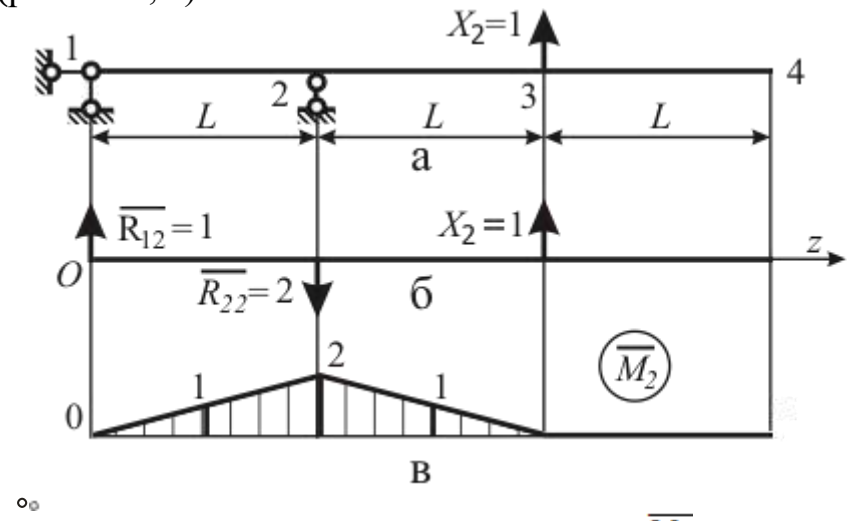



Рис. 7.10. К построению эпюры $\overline{M_2}$

Аналитическое выражение для единичного момента запишем в виде

$$\overline{M_2(z)} = \overline{R_{12}}\, z - \overline{R_{22}}(z-L)\, H(z-L) + 1 \cdot (z - 2L)\, H(z - 2L), \quad (7.9)$$

где начало координат для оси $Oz$ взято в левом сечении балки (на опоре 1); реакции опор $\overline{R_{12}}$ и $\overline{R_{22}}$ от единичной силы $X_1 = 1$ найдены из уравнений равновесия моментов относительно опорных точек 2 и 1

$$\left.\begin{aligned} -L\,\overline{R_{12}} + L\,X_2 &= 0, \\ -L\,\overline{R_{22}} + 2\,l\,X_2 &= 0 \end{aligned}\right\}.$$

Получаем $\overline{R_{12}} = 1$ и $\overline{R_{22}} = 2$. Направления реакций указаны на рис. 7.10, б.

9. Перемещение эквивалентной системы в направлении избыточного неизвестного $X_{1i}$ под действием внешней нагрузки (грузовой член $\Delta_i$ системы уравнений метода сил) вычисляем по формуле (7.6), в которую подставлены выражения моментов (7.8),(7.9),(7.12). В результате вычислений получаем

$$\Delta_1 = \int_0^{3L} M_e(z) \cdot \overline{M_1}(z)/(EJ) \cdot dz = 127/(EJ);$$

$$\Delta_2 = \int_0^{3L} M_e(z) \cdot \overline{M_2}(z)/(EJ) \cdot dz = 30.0/EJ.$$

Расчёты проведены с использованием системы аналитических вычислений «Математика 5». Отметим, что подобные вычисления могут быть сделаны с использованием других систем символьной математики (MATHCAD, MAPLE).

Вычислим грузовые коэффициенты применяя формулу Симпсона. Получаем

$$\Delta_1 = 2/(6EJ)(0\cdot 0 + 4\cdot 2\cdot 5 + 4\cdot 0) + 1/(6EJ)(4\cdot 0 + 4\cdot 3{,}5\cdot 10 + 3\cdot 20) +$$
$$+ 2/(6EJ)(3\cdot 20 + 4\cdot 2\cdot 20 + 1\cdot 20) + 1/(6EJ)(2\cdot 0 + 4\cdot 1\cdot 0 + 0\cdot 0) =$$
$$= 127/EJ\,.$$

$$\Delta_2 = 2/(6EJ)(0\cdot 0 + 4\cdot 1\cdot 5 + 2\cdot 0) + 1/(6EJ)(2\cdot 0 + 4\cdot 1{,}5\cdot 10 + 1\cdot 20) +$$
$$+ 1/(6EJ)(1\cdot 20 + 4\cdot 0{,}5\cdot 20 + 0\cdot 20) = 30{,}0/EJ\,.$$

10. При определении перемещения $y_{ij}$ эквивалентной системы в направлении избыточного неизвестного $X_{1i}$ под действием избыточного неизвестного $X_{1j}$ интеграл перемещений примет вид

$$y_{ij} = X_j \int_0^{3L} \overline{M_i}(z)\,\overline{M_j}(z)/(EJ)\,. \qquad (7.10)$$

Здесь используется принцип независимости действия сил (принцип суперпозиции). Изгибающий момент от избыточного неизвестного $X_j$ представлен как произведение модуля этого неизвестного на момент от единичной силы, приложенной в точке $j$и действующей по направлению силы $X_j$.

Интеграл в формуле (7.10) называют коэффициентом при неизвестном системы канонических уравнений метода сил и обозначают $\delta_{ij}$. Из свойств определённого интеграла вытекают следующие свойства матрицы коэффициентов при неизвестных системы канонических уравнений метода сил: матрица коэффициентов при неизвестных симметрична

$$\delta_{ij} = \delta_{ji};$$

диагональные члены матрицы коэффициентов при неизвестных положительны $\delta_{ii} > 0$.

Канонические уравнения метода сил примут вид с учётом принятых обозначений:

$$\left.\begin{aligned} \delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \Delta_1 = 0,\\ \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \Delta_2 = 0. \end{aligned}\right\} \qquad (7.11)$$

Коэффициенты при неизвестных вычислены по формуле Симпсона

$$\delta_{11} = L/(6EJ)(0 + 4\cdot 2^2 + 4^2) + 2\,L/(6EJ)(0 + 4\cdot 2^2 + 4^2) = 32/(EJ);$$

$$\delta_{22} = 2\cdot 2/(6EJ)\,(0 + 4\cdot 1 + 2^2)/(6EJ) = 5{,}33/(EJ);$$

$$\delta_{12} = 2/(6EJ)(0 + 4\cdot 2\cdot 1 + 4\cdot 2) + 2/(6EJ)(4\cdot 2 + 4\cdot 3\cdot 1 + 2\cdot 0) = 12/EJ\,.$$

11. Система канонических уравнений метода сил

$$\left.\begin{aligned} 32{,}0\,X_1 + 12{,}0\,X_2 + 127 = 0\,,\\ 12{,}0\,X_1 + 5{,}33\,X_2 + 30{,}0 = 0 \end{aligned}\right\}.$$

Корни этой системы равны $X_1 = -11{,}8$ , $X_1 = 21{,}0$. Избыточное неизвестное $X_1$ отрицательно, следовательное его направление и направление реакций $\overline{R_{11}}$и $\overline{R_{21}}$ обратно принятому на рис. 7.10, б.

12. Определяем опорные реакции. В соответствии с направлениями реакций (рис. 7.19, б – 7.10, б) получаем

$$R_1 = R_{1в} + X_1\overline{R_{11}} + X_2\overline{R_{12}} = 10{,}0 - 11{,}8\cdot 2 + 21{,}0\cdot 3 = 7{,}33;$$

$$R_2 = R_{2в} - X_1\overline{R_{21}} - X_2\overline{R_{22}} = 30 - (-11{,}8)\cdot 1 - 21{,}0\cdot 2 = 23{,}5.$$

Строим истинную эпюру поперечной силы $Q$ (рис. 7.11, ж).

13. Истинную эпюру изгибающих моментов, в неразрезной балке находим по формуле

$$M(z) = M_в(z) + X_1\overline{M_1}(z) + X_2\overline{M_2(z)}\,.$$

Эпюра изгибающего момента дана на рис. 7.11, з.

14. Выбор двутавра из условия прочности $\sigma_m = M_m/W \le [\sigma]$. Здесь: $M_m = 11{,}8$ [кН·м] $= 11{,}8\cdot 10^3$ [Н·м] – наибольший по модулю изгибающий

момент в балке (найденный в п. 3); $[\sigma] = 200$ [МПа] $= 2 \cdot 10^8$ [Н/м$^2$] – допускаемые напряжения.

Требуемый по условию прочности момент сопротивления изгибу $W = M_m/[\sigma] = 11{,}8 \cdot 10^3/2 \cdot 10^8 = 5{,}9 \cdot 10^{-5}$[м$^3$]$= 59$[см$^3$]. В ГОСТ 8239-89 находим двутавр с ближайшим большим моментом сопротивления изгибу: двутавр № 14, $W_x = 81{,}7{,}0$ [см$^3$]. Его момент инерции $J_x = 572$ [см$^4$].

15. Находим максимальные напряжения изгиба

$$\sigma_{max} = M_{max}/W_x = 11{,}8 \cdot 10^3/81{,}7 \cdot 10^{-6} = 1{,}45 \cdot 10^8 \text{ [Н/м}^2\text{]}.$$

Определяем коэффициент запаса прочности по допускаемым напряжениям $k_{[\sigma]} = [\sigma]/\sigma_{max} = 2 \cdot 10^8/1{,}45 \cdot 10^8 = 1{,}38$.

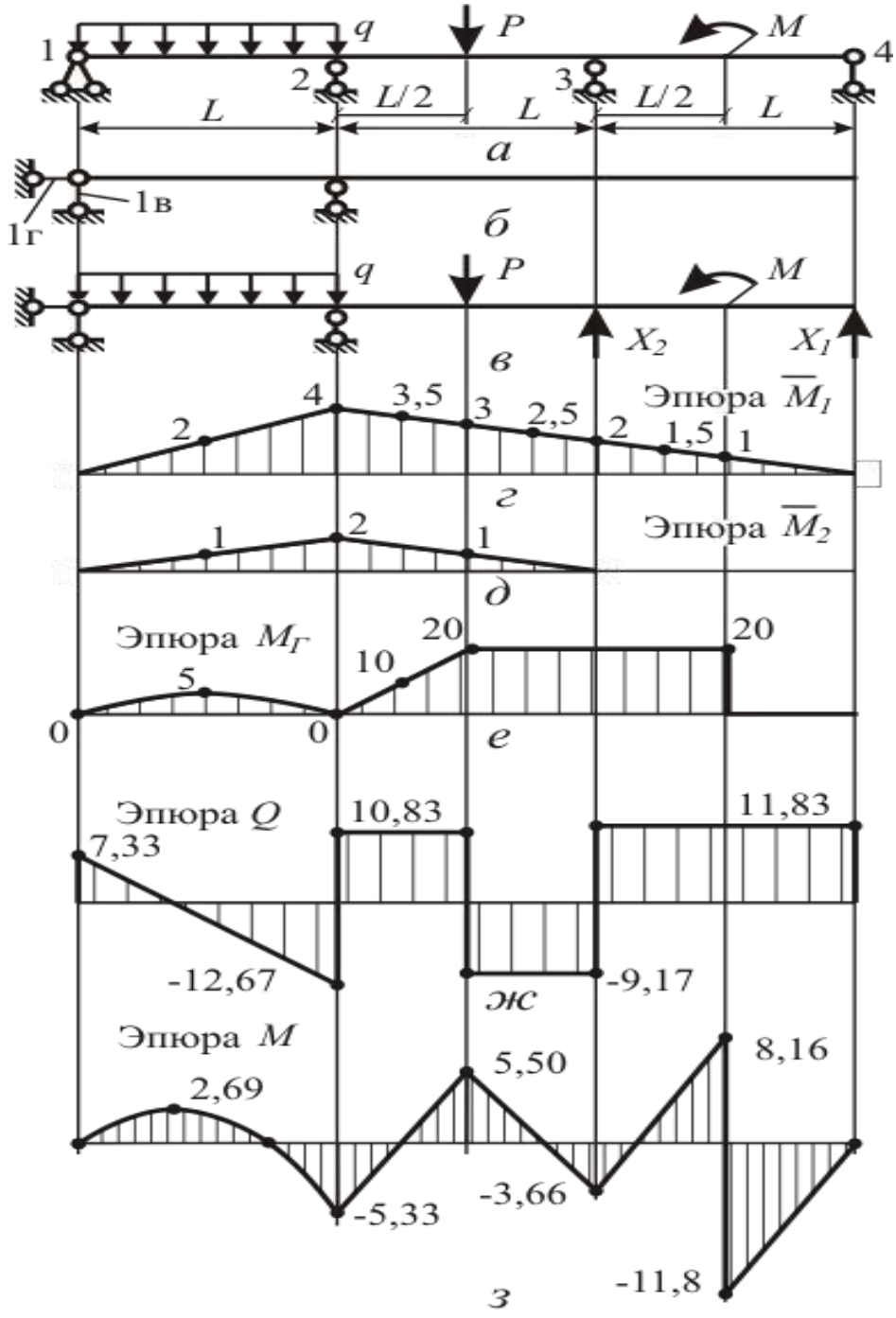



Рис. 7.11. Раскрытая методом сил статическая неопределимость

## Задача №8. Расчет стержней на устойчивость

Из расчёта на устойчивость подобрать размеры поперечного сечения стального стержня, сжатого осевой силой $P$. Способ закрепления стержня и коэффициент приведённой длины $\mu$ указаны на рис. 8.1. Схемы сечений даны на рис. 8.2 и 8.3. Данные для расчёта сведены в табл. 8.1. Коэффициент продольного изгиба Приведен в табл.8.2.

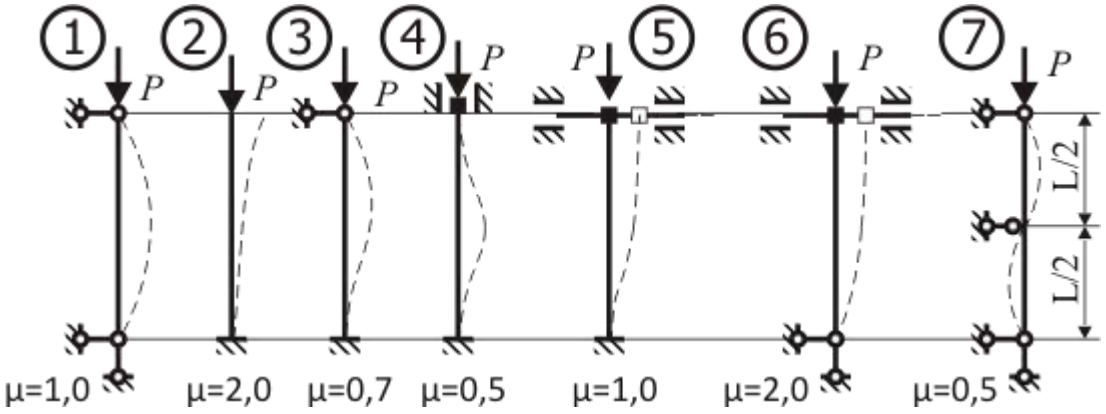



Рис. 8.1. Способ закрепления стержня и коэффициент приведённой длины $\mu$

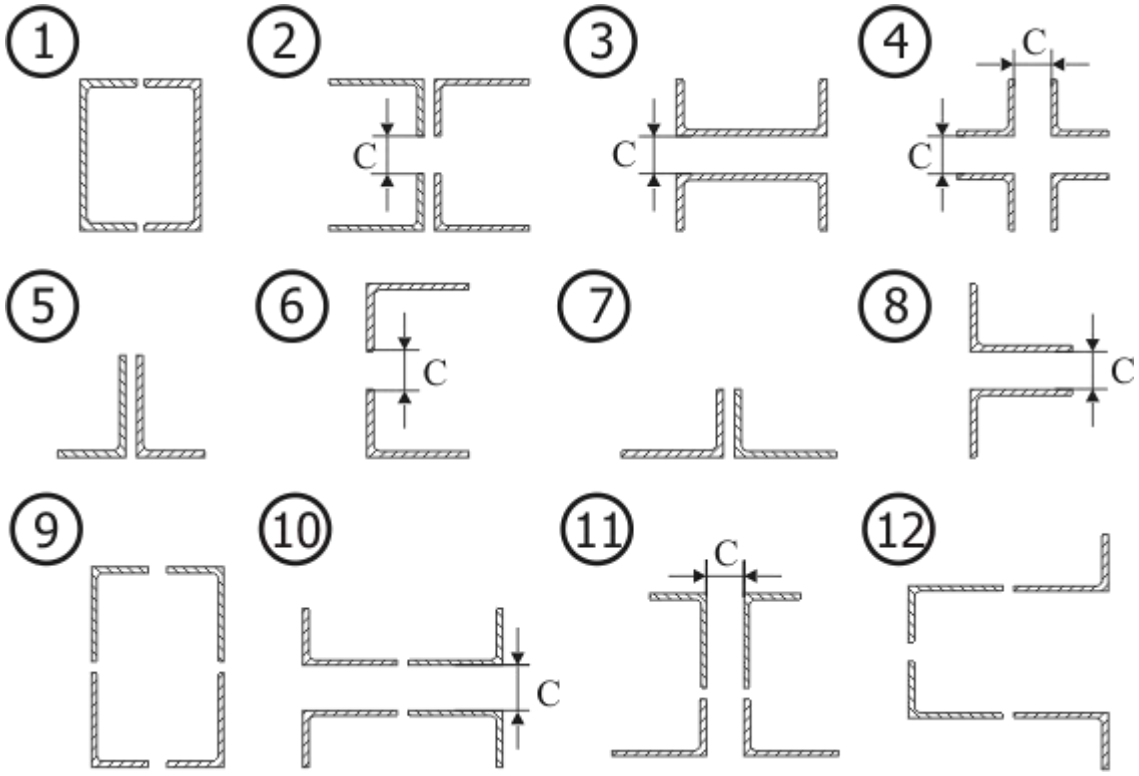



Рис. 8.2. Схемы поперечных сечений 1 – 12 стержня

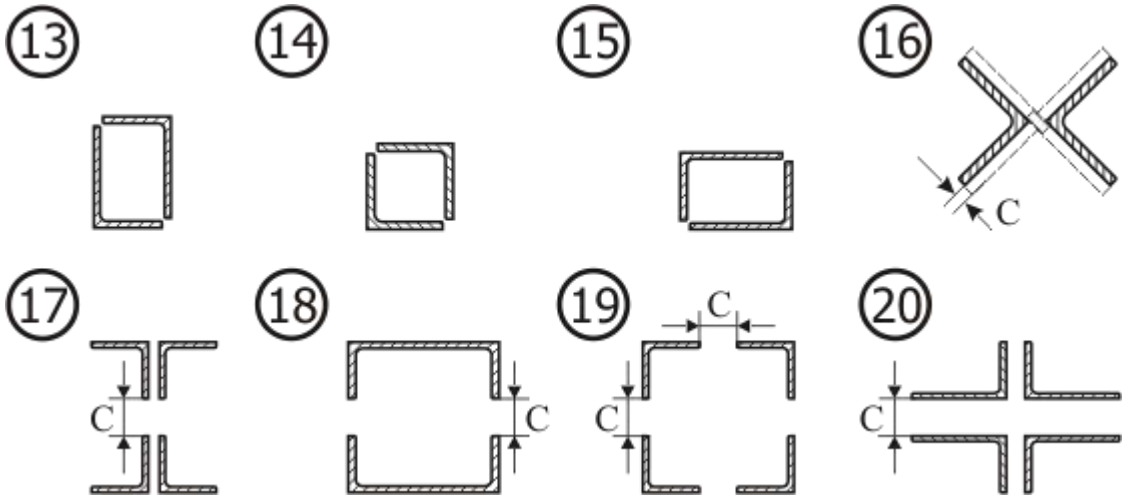



Рис. 8.3. Схемы поперечных сечений 13 – 20 стержня

Таблица 8.1

**Исходные данные к задаче № 8**

| Номер варианта | Номер схемы закрепления | Номер сечения | Длина L, м | c, м | Осевая сила $P$, кН | Допускаемые напряжения сжатия $[\sigma]$, МПа |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 1 | 1 | 6,0 | – | 500 | 240 |
| 2 | 2 | 2 | 2,5 | 70 | 550 | 280 |
| 3 | 3 | 3 | 6,5 | 75 | 600 | 320 |
| 4 | 4 | 4 | 7,0 | 80 | 650 | 360 |
| 5 | 5 | 5 | 7,5 | – | 95 | 400 |
| 6 | 6 | 6 | 3,0 | 55 | 90 | 440 |
| 7 | 7 | 7 | 8,0 | – | 85 | 480 |
| 8 | 1 | 8 | 6,0 | 60 | 80 | 520 |
| 9 | 2 | 9 | 3,5 | – | 700 | 560 |
| 10 | 3 | 10 | 6,5 | 65 | 750 | 600 |
| 11 | 4 | 11 | 7,0 | 70 | 800 | 640 |
| 12 | 5 | 12 | 7,5 | – | 850 | 240 |
| 13 | 6 | 13 | 4,0 | – | 75 | 280 |
| 14 | 7 | 14 | 8,0 | – | 70 | 320 |
| 15 | 1 | 15 | 6,0 | – | 65 | 360 |
| 16 | 2 | 16 | 2,5 | 75 | 60 | 400 |
| 17 | 3 | 17 | 6,5 | 80 | 900 | 440 |
| 18 | 4 | 18 | 7,0 | 55 | 500 | 480 |
| 19 | 5 | 19 | 7,5 | 60 | 550 | 520 |
| 20 | 6 | 20 | 3,0 | 65 | 600 | 560 |
| 21 | 7 | 1 | 8,0 | – | 650 | 600 |
| 22 | 1 | 2 | 6,0 | 70 | 700 | 640 |
| 23 | 2 | 3 | 3,5 | 75 | 750 | 240 |
| 24 | 3 | 4 | 6,5 | 80 | 800 | 280 |

Окончание таблицы 8.1

| Номер варианта | Номер схемы закрепления | Номер сечения | Длина L, м | c, мм | Осевая сила $P$, кН | Допускаемые напряжения сжатия $[\sigma]$, МПа |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 25 | 4 | 5 | 7,0 | – | 55 | 320 |
| 26 | 5 | 6 | 7,5 | 55 | 95 | 360 |
| 27 | 6 | 7 | 4,0 | – | 90 | 400 |
| 28 | 7 | 8 | 8,0 | 60 | 85 | 440 |
| 29 | 1 | 9 | 6,0 | – | 850 | 480 |
| 30 | 2 | 10 | 2,5 | 65 | 900 | 520 |
| 31 | 3 | 11 | 6,5 | 70 | 500 | 560 |
| 32 | 4 | 12 | 7,0 | – | 550 | 600 |
| 33 | 5 | 13 | 7,5 | – | 80 | 640 |
| 34 | 6 | 14 | 3,0 | – | 75 | 240 |
| 35 | 7 | 15 | 8,0 | – | 70 | 280 |
| 36 | 1 | 16 | 6,0 | 75 | 65 | 320 |
| 37 | 2 | 17 | 3,5 | 80 | 600 | 360 |
| 38 | 3 | 18 | 6,5 | 55 | 650 | 400 |
| 39 | 4 | 19 | 7,0 | 60 | 700 | 440 |
| 40 | 5 | 20 | 7,5 | 65 | 750 | 480 |
| 41 | 6 | 1 | 4,0 | – | 800 | 520 |
| 42 | 7 | 2 | 8,0 | 70 | 850 | 560 |
| 43 | 1 | 3 | 6,0 | 75 | 900 | 600 |
| 44 | 2 | 4 | 2,5 | 80 | 500 | 640 |
| 45 | 3 | 5 | 6,5 | – | 60 | 240 |
| 46 | 4 | 6 | 7,0 | 55 | 55 | 280 |
| 47 | 5 | 7 | 7,5 | – | 95 | 320 |
| 48 | 6 | 8 | 3,0 | 60 | 90 | 360 |
| 49 | 7 | 9 | 8,0 | – | 550 | 400 |
| 50 | 1 | 10 | 6,0 | 65 | 600 | 440 |
| 51 | 2 | 11 | 3,5 | 70 | 650 | 480 |
| 52 | 3 | 12 | 6,5 | – | 700 | 520 |
| 53 | 4 | 13 | 7,0 | – | 85 | 560 |
| 54 | 5 | 14 | 7,5 | – | 80 | 600 |
| 55 | 6 | 15 | 4,0 | – | 75 | 640 |
| 56 | 7 | 16 | 8,0 | 75 | 70 | 240 |
| 57 | 1 | 17 | 6,0 | 80 | 750 | 280 |
| 58 | 2 | 18 | 2,5 | 55 | 800 | 320 |
| 59 | 3 | 19 | 6,5 | 60 | 850 | 360 |
| 60 | 4 | 20 | 7,0 | 65 | 900 | 400 |
| 61 | 5 | 1 | 7,5 | – | 500 | 440 |
| 62 | 6 | 2 | 3,0 | 70 | 550 | 480 |
| 63 | 7 | 3 | 8,0 | 75 | 600 | 520 |
| 64 | 1 | 4 | 6,0 | 80 | 650 | 560 |

Таблица 8.2.

Коэффициент продольного изгиба

| Гибкость, λ | Значение коэффициента φ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Материал | | | | |
| | Ст.4, Ст.3 | Ст.5 | Ст.СПБ | чугун | дерево |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 10 | 0,99 | 0,98 | 0,97 | 0,97 | 0,99 |
| 20 | 0,96 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,97 |
| 30 | 0,94 | 0,92 | 0,91 | 0,81 | 0,93 |
| 40 | 0,92 | 0,89 | 0,87 | 0,69 | 0,87 |
| 50 | 0,89 | 0,86 | 0,83 | 0,57 | 0,8 |
| 60 | 0,86 | 0,82 | 0,79 | 0,44 | 0,71 |
| 70 | 0,81 | 0,76 | 0,72 | 0,34 | 0,6 |
| 80 | 0,75 | 0,7 | 0,65 | 0,26 | 0,48 |
| 90 | 0,69 | 0,62 | 0,55 | 0,2 | 0,38 |
| 100 | 0,63 | 0,51 | 0,43 | 0,16 | 0,31 |
| 130 | 0,4 | 0,33 | 0,26 | - | 0,18 |
| 140 | 0,36 | 0,29 | 0,23 | - | 0,16 |
| 150 | 0,32 | 0,26 | 0,21 | - | 0,14 |
| 160 | 0,29 | 0,24 | 0,19 | - | 0,12 |
| 170 | 0,26 | 0,21 | 0,17 | - | 0,11 |
| 180 | 0,23 | 0,019 | 0,15 | - | 0,1 |
| 190 | 0,21 | 0,17 | 0,14 | - | 0,09 |
| 200 | 0,19 | 0,16 | 0,13 | - | 0,08 |

## ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Подобрать размеры поперечного сечения стальной трубчатой колонны, нагруженной осевой силой $P = 475$ кН. Высота колонны $l = 2{,}5$ м. Отношение внутреннего диаметра трубы к наружному равно $k = d_в/d = 0{,}5$. Схема закрепления колонны № 2 в табл. 7.1. Коэффициент приведённой длины $\mu = 2$. Допускаемые напряжения сжатия для материала колонны $[\sigma] = 440$ МПа.

1. Переводим: осевую силу в ньютоны $P = 4{,}75 \cdot 10^5$Н; допускаемые напряжения в Паскали: $[\sigma] = 4{,}4 \cdot 10^8$ Па.

2. Определяем приведённую длину колонны: $L = \mu\, l = 2 \cdot 2{,}5 = 5$ м.

3. Шаг 1 подбора сечения методом последовательных приближений. Задаём начальное значение коэффициента снижения запаса при продольном изгибе $\varphi_1$ по сравнению с коэффициентом запаса прочности при сжатии. Начальное значение коэффициента $\varphi_1$ рекомендуется выбирать в интервале 0,5 – 0,7. Принимаем $\varphi_1 = 0{,}5$.

4. По формуле

$$S_i = P/(\varphi_i\,[\sigma]) \qquad (8.1)$$

определяем площадь сечения, при которой обеспечивается устойчивость

$$S_1 = P/(\varphi_1\,[\sigma]) = 4{,}75 \cdot 10^5/(0{,}5 \cdot 4{,}4 \cdot 10^8) = 0{,}00216 \text{ м}^2.$$

5. Наружный диаметр сечения кольца, площадь которого равна $S_1$, находим по формуле

$$d_i = 2\sqrt{S_i/(\pi(1-k^2))}. \quad (8.2)$$

Получаем

$$d_1 = 2\sqrt{S_1/(\pi(1-k^2))} = 2\sqrt{0{,}00216/(3{,}14\cdot(1-0{,}5^2))} = 0{,}0605 \text{ м}.$$

6. Радиус инерции кольца

$$i = d\sqrt{1+k^2}/4. \quad (8.3)$$

Для выбранного кольца радиус инерции

$$i_1 = d_1\sqrt{1+k\text{^}2}/4 = 0{,}0605\sqrt{1+0{,}5\text{^}2}/4 = 0{,}0169 \text{ м}.$$

7. Гибкость стержня определяется по формуле

$$\lambda = L/i. \quad (8.4)$$

Сечение, выбранное на первом шаге, имеет гибкость

$$\lambda_1 = L/i_1 = 5/0{,}0169 = 295.$$

8. По табл. 8.3 определяем коэффициент снижения запаса по устойчивости по сравнению с коэффициентом запаса прочности при сжатии. Для стали СПБ (с повышенными прочностными характеристиками) наибольшее значение гибкости, при котором определён коэффициент $\varphi$, равно $\lambda = 200$. Принимаем значение коэффициента запаса для стержня, выбранного на шаге 1, равным $\Phi_1 = 0$. Различие значений коэффициента снижения запаса устойчивости $\varphi_1 = 0{,}5$ и $\Phi_1 = 0$ относительно велико.

9. Шаг 2.

9.1. Начальное значение коэффициента $\varphi$ на следующем шаге принимаем равным среднему значению начального и конечного значений коэффициентов предыдущего шага. Для шага 2 имеем

$$\varphi_2 = (\varphi_1 + \Phi_1)/2 = (0{,}5+0)/2 = 0{,}25. \quad (8.5)$$

9.2. По формулам (8.1) – (8.4) находим площадь, наружный диаметр, радиус инерции и гибкость стержня при принятом для шага 2 значении $\varphi_2$.

Получаем для шага 2:

площадь

$$S_2 = P/(\varphi_2\,[\sigma]) = 4{,}75\cdot10^5/(0{,}25\cdot4{,}4\cdot10^8) = 0{,}00432 \text{ м}^2;$$

диаметр

$$d_2 = 2\sqrt{S_2/(\pi(1-k^2))} = 2\sqrt{0{,}00432/(3{,}14\cdot(1-0{,}5^2))} = 0{,}0856 \text{ м};$$

радиус инерции

$$i_2 = d_2\sqrt{1+k\text{^}2}/4 = 0{,}0856\sqrt{1+0{,}5\text{^}2}/4 = 0{,}0239 \text{ м};$$

гибкость

$$\lambda_2 = L/i_2 = 5/0{,}0239 = 209.$$

9.3. Гибкость $\lambda_2$ превышает значение гибкости, для которой составлена табл. 8.3. Принимаем коэффициент снижения допускаемых напряжений при расчёте на устойчивость по отношению к допускаемым напряжениям при сжатии $\Phi_2 = 0$.

10. Шаг 3.

10.1. По аналогии с формулой (8.5) для шага 3 получаем

$$\varphi_3 = (\varphi_2 + \Phi_2)/2 = (0{,}25+0)/2 = 0{,}125.$$

10.2. По формулам (7.1) – (7.4) находим площадь, наружный диаметр, радиус инерции и гибкость стержня при принятом для шага 3 значении $\varphi_3$.

Получаем для шага 3:
площадь

$$S_3 = P/(\varphi_3\,[\sigma]) = 4{,}75\cdot 10^5/(0{,}125\cdot 4{,}4\cdot 10^8) = 0{,}00864\ \text{м}^2;$$

диаметр

$$d_3 = 2\sqrt{S_3/(\pi(1-k^2))} = 2\sqrt{0{,}00864/(3{,}14\cdot(1-0{,}5^2))} = 0{,}121\ \text{м};$$

радиус инерции

$$i_3 = d_3\sqrt{1+k\text{^}2}/4 = 0{,}121\sqrt{1+0{,}5\text{^}2}/4 = 0{,}0338\ \text{м};$$

гибкость

$$\lambda_3 = L/i_3 = 5/0{,}0338 = 148\,.$$

10.3. По табл. 8.3 для стали СПБ находим с помощью линейной интерполяции значение коэффициента $\Phi_3$. Для начального $\lambda_н$ и конечного $\lambda_к$ значений границ интервала, в коем лежит найденная гибкость $\lambda$, выписываем из табл. 8.3 соответствующие им значения $\varphi_н$ и $\varphi_к$. По формуле линейной интерполяции

$$\Phi = \varphi_н + (\varphi_к - \varphi_н)\,(\lambda - \lambda_н)/(\lambda_к - \lambda_н) \qquad (8.6)$$

получаем для шага 3:

$$\lambda_{н3} = 140\,;\ \lambda_{к3} = 150;$$
$$\varphi_{н3} = 0{,}23;\ \varphi_{к3} = 0{,}21;$$
$$\lambda_3 = 148.$$

Подставляя эти значения в (7.6), получаем

$$\Phi_3 = \varphi_{н3} + (\varphi_{к3} - \varphi_{н3})\,(\lambda_3 - \lambda_{н3})/(\lambda_{к3} - \lambda_{н3}) =$$
$$= 0{,}23 + (0{,}21 - 0{,}23)\,(148 - 140)/(150 - 140) = 0{,}215.$$

10.4. Определяем критическую силу по формуле

$$P = \Phi\, S\,[\sigma]. \qquad (8.7)$$

Получаем

$$P_3 = \Phi_3 S_3[\sigma] = 0{,}215\cdot 0{,}00864\cdot 4{,}4\cdot 10^8 = 8{,}15\cdot 10^5\ \text{Н}.$$

10.5. По формуле

$$\Delta_i = (P_i - P)/P \qquad (8.8)$$

ищем относительную погрешность подбора сечения.
Получаем

$$\Delta_i = (P_i - P)/P = (8{,}15\cdot 10^5 - 4{,}75\cdot 10^5)/4{,}75\cdot 10^5 = 0{,}716.$$

При подборе поперечного сечения колонны следует стремится к тому, чтобы относительная погрешность подбора лежала в пределах $\mp 0{,}05$.

11. Шаг 4

11.1. По формуле (8.5) для шага 4 получаем

$$\varphi_4 = (\varphi_3 + \Phi_3)/2 = (0{,}125 + 0{,}215)/2 = 0{,}170.$$

11.2. По формулам (8.1) – (8.4) находим площадь, наружный диаметр, радиус инерции и гибкость стержня при принятом для шага 4 значении $\varphi_4$.
Получаем для шага 4:
площадь

$$S_4 = P/(\varphi_4\,[\sigma]) = 4{,}75\cdot 10^5/(0{,}170\cdot 4{,}4\cdot 10^8) = 0{,}00636\ \text{м}^2;$$

диаметр

$$d_4 = 2\sqrt{S_4/(\pi(1-k^2))} = 2\sqrt{0{,}00636/(3{,}14\cdot(1-0{,}5^2))} = 0{,}104\ \text{м};$$

радиус инерции

$$i_3 = d_3\sqrt{1+k\hat{}2}/4 = 0{,}104\sqrt{1+0{,}5\hat{}2}/4 = 0{,}0290 \text{ м};$$

гибкость

$$\lambda_3 = L/i_3 = 5/0{,}0290 = 172\,.$$

11.3. По табл. 8.3 для стали СПБ находим значение коэффициента $\Phi_4$. Для начального $\lambda_н$ и конечного $\lambda_к$ значений границ интервала, в коем лежит найденная гибкость $\lambda$, выписываем из табл. 8.3 соответствующие им значения $\varphi_н$ и $\varphi_к$. По формуле линейной интерполяции

$$\Phi = \varphi_н + (\varphi_к - \varphi_н)\,(\lambda - \lambda_н)/(\lambda_к - \lambda_н) \qquad (8.9)$$

получаем для шага 4:

$$\lambda_{н4} = 170\,;\ \lambda_{к4} = 180;$$
$$\varphi_{н4} = 0{,}17;\ \varphi_{к4} = 0{,}15;$$
$$\lambda_4 = 172.$$

Подставляя эти значения в (8.9), получаем

$$\Phi_4 = \varphi_{н4} + (\varphi_{к4} - \varphi_{н4})\,(\lambda_4 - \lambda_{н4})/(\lambda_{к4} - \lambda_{н4}) =$$
$$= 0{,}17 + (0{,}15 - 0{,}17)\,(172 - 170)/(180 - 170) = 0{,}166.$$

11.4. Определяем критическую силу по формуле

$$P = \Phi\, S\, [\sigma]. \qquad (8.10)$$

Получаем

$$P_4 = \Phi_4 S_4 [\sigma] = 0{,}166 \cdot 0{,}00636 \cdot 4{,}4 \cdot 10^8 = 4{,}64 \cdot 10^5 \text{Н}.$$

11.5. По формуле (8.8) ищем относительную погрешность подбора сечения. Получаем

$\Delta_i = (P_i - P)/P = (4{,}64 \cdot 10^5 - 4{,}75 \cdot 10^5)/4{,}75 \cdot 10^5$=0,0242.

Критическая сила для стержня меньше действующей силы на 2,42%. Полученное значение лежит в пределах принятой в сопротивлении материалов погрешности в 5 %.

12. Выбрана труба с внешним диаметром 105 мм и внутренним диаметром 52,5 мм.

## Задача № 9. Расчёт статически неопределимых рам

Раскрыть статическую неопределимость рамы (рис. 9.1). Построить эпюры внутренних силовых факторов, действующих в поперечных сечениях. Выбрать сечение двутавровой балки при заданном допускаемом напряжении $[\sigma] = 160$ МПа. Данные для расчёта взять из табл. 9.1.

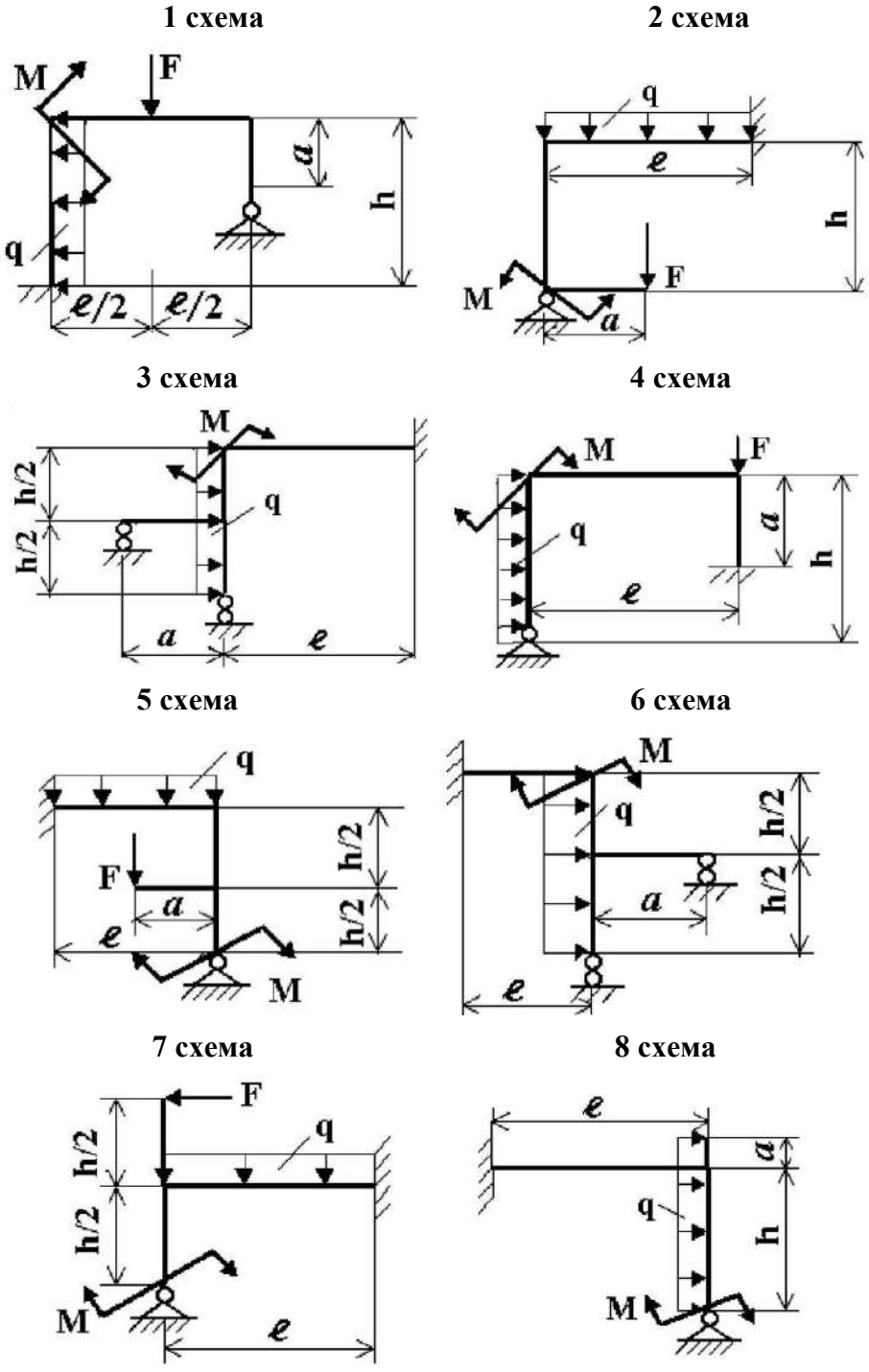


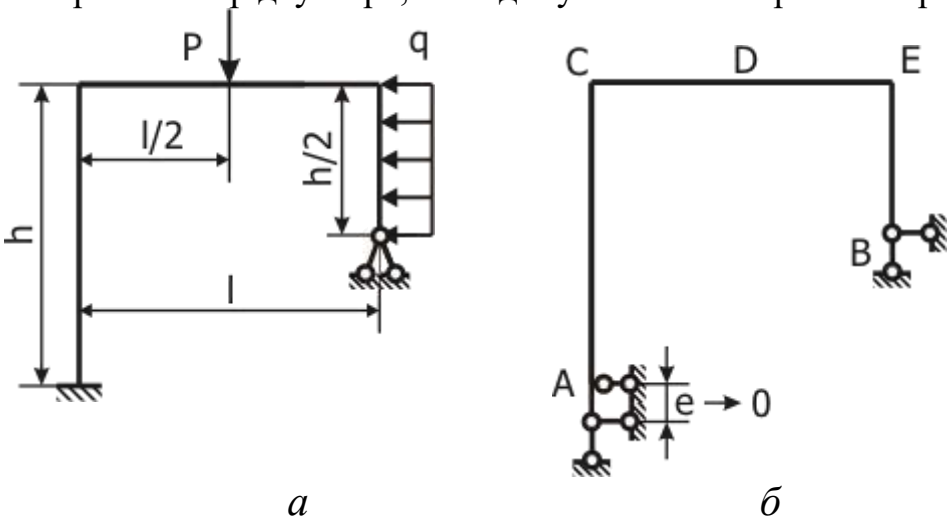

Рис. 9.1 Рама: схемы 1 … 8

Табл. 9.1

| Номер задания | Схема по рис.9.1 | Параметры | Числовые значения вариантов | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | **1** | ***h*, м** | **2,5** | **3,0** | **2,0** | **2,0** | **2,5** | **2,5** | **3,0** | **3,0** | **3,0** | **3,0** |
| **2** | **2** | ***a*, м** | **1,8** | **1,0** | **1,5** | **1,6** | **1,0** | **1,2** | **1,5** | **1,0** | **2,0** | **1,8** |
| **3** | **3** | **M, кНм** | **30** | **40** | **20** | **20** | **40** | **26** | **25** | **60** | **30** | **20** |
| **4** | **4** | **F, кН** | **24** | **25** | **35** | **65** | **30** | **30** | **30** | **50** | **65** | **35** |
| **5** | **5** | **q, кН/м** | **30** | **30** | **30** | **10** | **10** | **35** | **20** | **35** | **15** | **10** |
| **6** | **6** | ***h*, м** | **3,0** | **3,0** | **2,5** | **3,0** | **2,5** | **3,0** | **2,5** | **2,0** | **3,0** | **2,5** |
| **7** | **7** | ***l*, м** | **4,0** | **4,0** | **2,0** | **2,5** | **3,0** | **4,0** | **3,0** | **3,0** | **2,0** | **4,0** |
| **8** | **8** | **M, кНм** | **30** | **45** | **25** | **30** | **25** | **24** | **35** | **20** | **35** | **20** |
| **Номер варианта** | | | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** |

## ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Раскрыть статическую неопределимость рамы (рис. 9.2. *а*). Размеры $l = 4$ м; $h = 4$ м. Нагрузки: $P = 20$ [кН]; $q = 5$ [кН/м]. Сечения стержней – двутавр. Выбрать номер двутавра, если допускаемые напряжения равны $[\sigma] = 160$ МПа.




*а* *б*

Рис. 9.2 Рама: а) схема; б) количество опорных стержней

## РЕШЕНИЕ

1. *Степень статической неопределимости рамы.* Число опорных стерней равно 5 (заделка эквивалентна 3 опорным стержням (рис. 9.2. *б*), шарнирно-неподвижная опора образована 2 стержнями). Для определения опорных реакций плоской рамы имеем 3 уравнения статики. **Степенью статической неопределимости** называется разность между числом опорных стержней и числом уравнений статики. Рама дважды статически неопределима

$$N_{\text{неоп}} = K_{\text{реак}} - K_{\text{ур}} = 5 - 3 = 2.$$

2. *Выбор основной системы.* Удалив в заданной системе 2 опорных стержня, получим необходимое условие статической определимости

$$K_{\text{реак}} - K_{\text{ур}} = 0.$$

**Основной системой** называется **неизменяемая** статически определимая система, полученная из заданной системы отбрасыванием избыточных связей. На рис. 9.3 приведены основные системы, полученные отбрасыванием двух лишних опорных стержней.

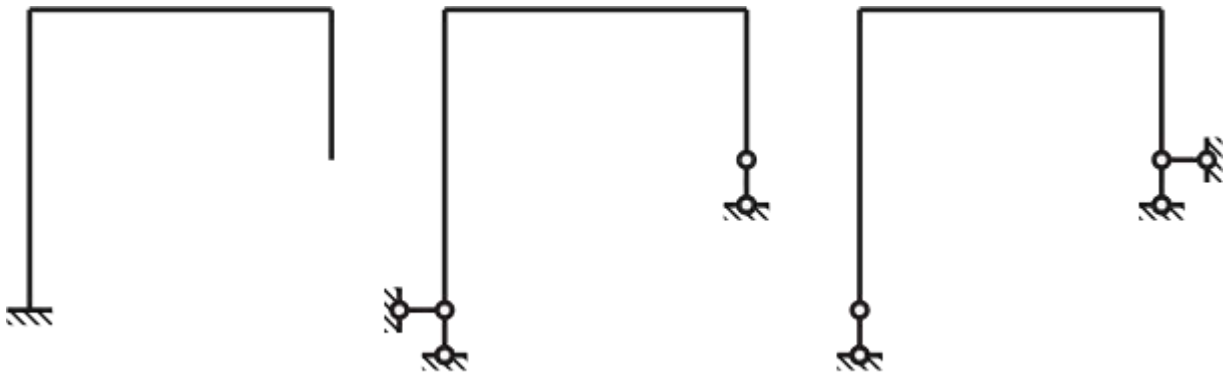



Рис. 9.3 Основные системы, полученные отбрасыванием опорных стержней

Основную систему можно получить удалением внутренних связей в узлах рамы или в самих стержнях. В основной системе (рис. 9.4.а) в узлах рамы удалены внутренние связи, передающие изгибающий момент. В системе (рис. 9.4.б) в двух сечениях удалены внутренние связи, воспринимающие изгибающие моменты. **Основная система должна быть неизменяемой**. Система (рис. 9.4.в), полученная удалением вертикальных опорных стержней, изменяема. Система (рис. 9.4.г), в правую стойку которой врезаны два шарнира, мгновенно изменяема.

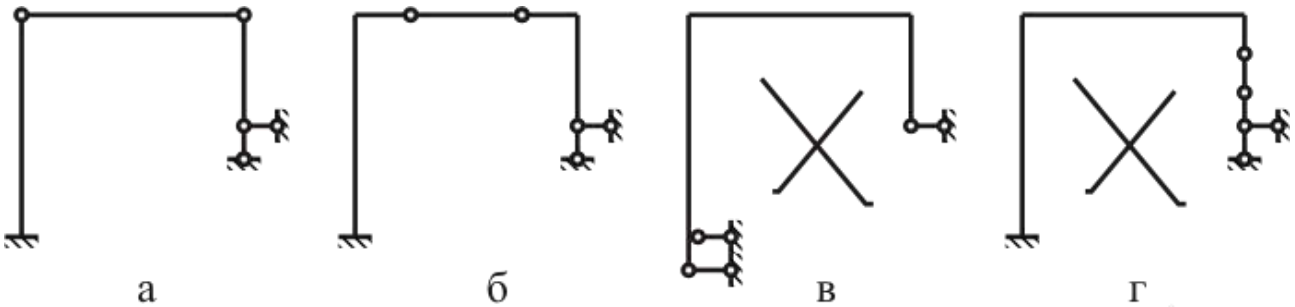



Рис. 9.4.а Основные системы, полученные удалением внутренних связей: а) в узлах, б) в стержнях, в) изменяемая система, г) мгновенно изменяемая система

3. *Выбор эквивалентной системы.* В качестве основной системы, выберем систему, показанную на рис. 9.3.а. Нагрузим её внешними нагрузками $P, q$ согласно схеме, приведённой на (рис. 9.2.а). Действие удалённых опорных стержней, заменим **лишними неизвестными** силами $X_1$, $X_2$, приложенными в точке $B$. **Эквивалентной системой** называют основную систему, к которой

приложены заданные внешние нагрузки и лишние неизвестные $X_1, X_2$.
Эквивалентная система рамы приведена на рис. 9.5.

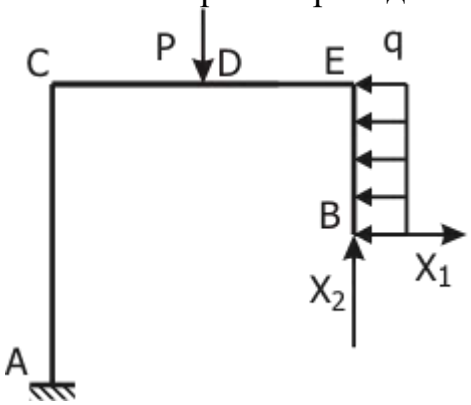



Рис. 9.5 Эквивалентная система

4. *Эпюры моментов*. При построении эпюр изгибающих моментов методом сечений применяем правило знаков для момента в балке, закреплённой горизонтально (рис. 9.6).

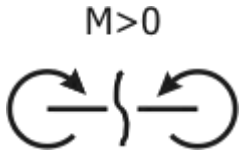



Рис. 9.6 Правило знаков для $M$

Перед применением этого правила к построению эпюры моментов на участке рамы с осью иного направления необходимо:

выбрать горизонтальный участок рамы и провести ниже оси этого участка пунктирную линию;

**не пересекая оси рамы** продолжить этот пунктир на прочих участках, параллельно их осям.

Разрезав раму и выбрав кусок, равновесие которого будет изучаться, следует повернуть кусок так, чтобы на нём ось разрезанного участка стала горизонтальной и пунктирная линия лежала ниже оси.

Пунктирная линия для рамы приведена на рис. 9.7.

Рама разбита на 4 участка: $BE$, $ED$, $DC$, $CA$. Границами участков являются: концы $A$ и $B$, узлы $C$ и $E$, точка $D$ приложения силы.

4.1. *Эпюра* $\bar{M}_1$. Схема нагружения рамы силой $\bar{X}_1$ дана на рис. 9.7. Эпюру единичного изгибающего момента строим методом сечений. Правило для определения знака момента на горизонтальном участке $CDE$ дано на рис. 9.6.

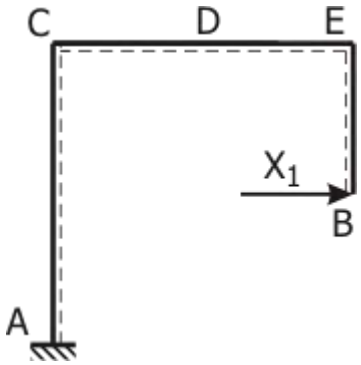



Рис. 9.7 К построению $\bar{M}_1$

4.1.1. *Эпюра $\bar{M}_1$ на участке $BE$*. Разрежем раму на участке $BE$ в сечении $S$, лежащем на расстоянии $S_B$ (рис. 9.8.а) и рассмотрим равновесие свободного (незакреплённого) куска. Повернём кусок $SB$ в горизонтальное положение так, чтобы пунктирная линия лежала ниже оси (рис. 9.8.б). Момент силы $\bar{X}_1$ относительно точки равен $\bar{M}_1(S_B) = \bar{X}_1 S_B$. Сила вращает кусок $SB$ в положительном направлении (против хода стрелок часов). По правилу знаков для моментов (рис. 9.6) это направление момента считается положительным для правого куска. Для вычисления интеграла перемещений по формуле Симпсона найдём значения момента в начале, середине, конце участка $SB$ и построим эпюру изгибающего момента на участке. Положительные значения момента в машиностроении принято откладывать на сжатых волокнах. Представим, что кусок $SB$ защемлён в сечении $S$. Сила $\bar{X}_1$ изогнёт кусок так, что правые волокна окажутся короче левых (рис. 9.8.в). Эпюру $\bar{M}_1(S_B)$ строим справа от оси стержня $BE$ (рис. 9.8.г).

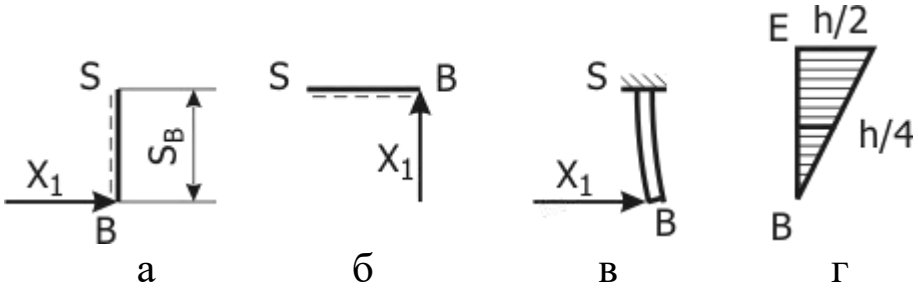
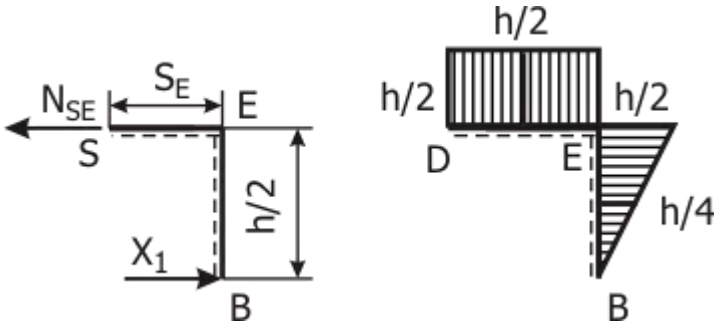



Рис. 9.8. Эпюра $\bar{M}_1$ на участке $BE$: а) отрезанный кусок; б) повёрнутый кусок; в) сжатые волокна; г) эпюра на участке

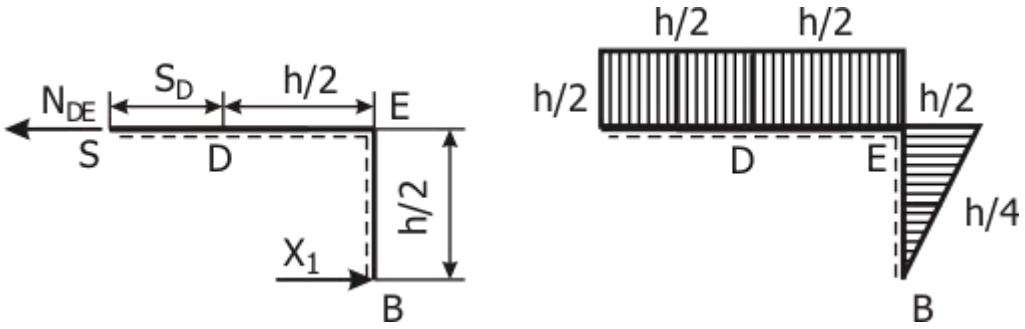
4.1.2. *Эпюра $\bar{M}_1$ на участке $ED$*. Разрежем раму на участке $BE$ в сечении $S$, лежащем $S_E$ на расстоянии от точки $E$ (рис. 9.9.а). Рассматриваем равновесие правого (свободного) куска. Кусок не поворачиваем, так как пунктирная линия лежит ниже сплошной. Сила $\bar{X}_1$ уравновешена осевой силой $N_{ES}$, приложенной в сечении $S$. Эта пара сил создаёт в сечении $S$ положительный изгибающий момент $\bar{M}_1(S_E)=\bar{X}_1 h/2$, постоянный на участке $ED$.




а б

Рис. 9.9 Эпюра $\bar{M}_1$ на участке $ED$: а) отрезанный кусок; б) эпюра

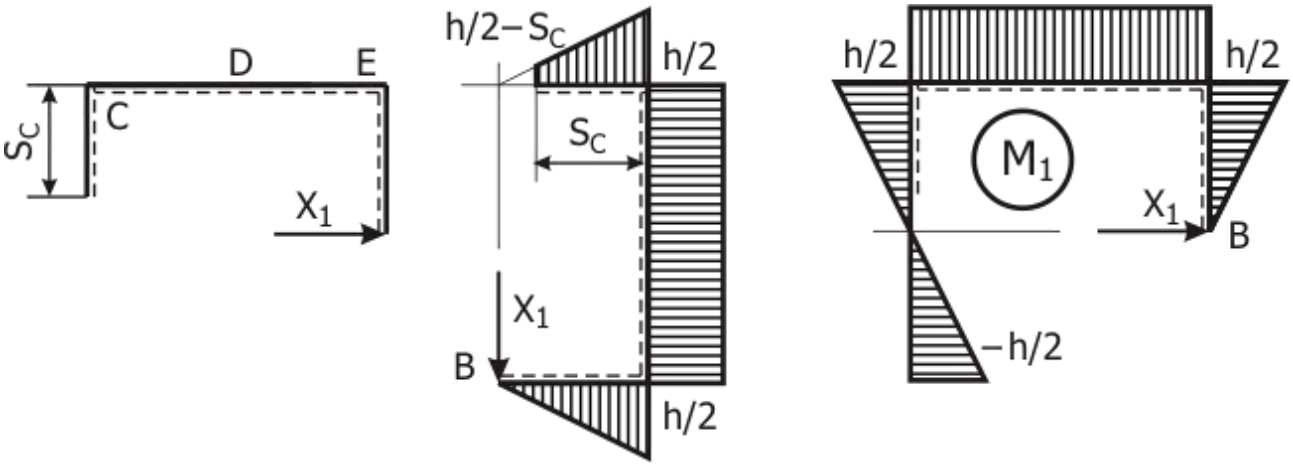
4.1.3. *Эпюра $\bar{M}_1$ на участке $DC$.* Эпюра на участке $DC$ строится аналогично предыдущему. Результаты построения даны на рис. 9.10.




а б

Рис. 9.10 К построению эпюры $\bar{M}_1$ на участке $DC$: а) отрезанный кусок; б) эпюра

4.1.4. *Эпюра $\bar{M}_1$ на участке $CA$.* Разрежем раму в сечении $S$, лежащем на расстоянии $S_C$ (рис. 9.11.а) от точки $C$. Рассмотрим равновесие свободного куска. Повернём кусок так, чтобы участок $SC$ стал горизонтальным и пунктирная линия лежала ниже сплошной (рис. 9.11.б). Сила $\bar{X}_1$ уравновешивается поперечной силой $Q$, приложенной в сечении $S$. Пара сил $\bar{X}_1$ и $Q$ создаёт в этом сечении $S$ момент равный $\bar{M}_1(S_C) = \bar{X}_1(h/2 - S_C)$. Значения момента в начале, середине, конце участка $CA$ равны $\bar{M}_1(0) = h/2$, $\bar{M}_1(h/2) = 0$, $\bar{M}_1(0) = -h/2$ и строим эпюру изгибающего момента на участке (рис. 9.11.в).




а б в

Рис. 9.11 К построению эпюры $\bar{M}_1$ на участке $CA$: а) отрезанный кусок; б) повёрнутый кусок; в) эпюра

4.1.5. *Аналитические выражения для эпюры* $\bar{M}_1$ применяются в случае аналитического интегрирования:

$$\bar{M}_1 = \begin{cases} s_B; & \text{участок } BE \quad 0 \le s_B \le h/2; \\ h/2; & \text{участок } ED \quad 0 \le s_E \le h/2; \\ h/2; & \text{участок } DC \quad 0 \le s_D \le h/2; \\ h/2 - s_C; & \text{участок } CA \quad 0 \le s_D \le h/2. \end{cases}.$$

4.2. *Эпюра* $\bar{M}_2$. Схема приложения силы $\bar{X}_2$ к раме дана на рис. 9.12.

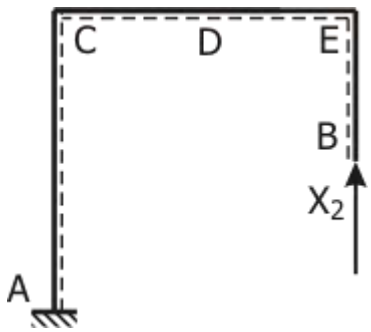



Рис. 9.12 К построению эпюры $\bar{M}_2$

4.2.1. *Участок* $BE$. Разрезаем в сечении $S$, лежащем на расстоянии $s_B$ от точки $B$. Рассматриваем равновесие нижнего от разреза (свободного) куска (рис. 9.12). Сила $\bar{X}_2$ действует вдоль оси стержня $BE$. Момент $\bar{M}_2$ на участке равен нулю.

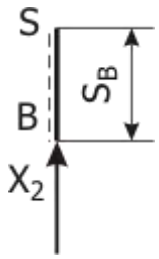
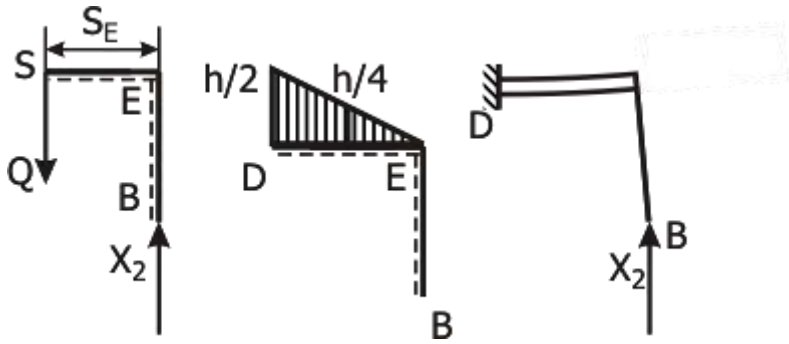



Рис. 9.12 К построению $\bar{M}_2$ на участке $BE$

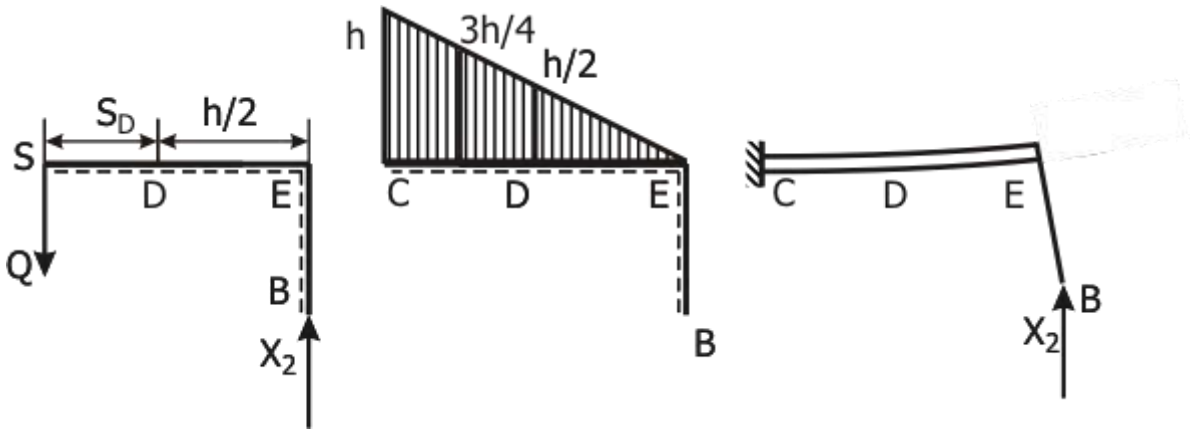
4.2.2. *Участок* $ED$. Разрезаем в сечении $S$, лежащем на расстоянии $s_E$ от точки $E$. Рассматриваем равновесие свободного куска (рис. 9.13). Пунктирная линия на разрезанном участке лежит ниже сплошной, поэтому поворот не нужен. Поперечная сила $Q$, приложенная в сечении $S$, уравновешивает силу $\bar{X}_2$ и образует вместе с ней пару сил с моментом $\bar{M}_2 = \bar{X}_2 S_E = S_E$, вращающую кусок в положительном направлении. Значения момента в начале, середине, конце участка равные $\bar{M}_2(0) = 0$, $\bar{M}_2(h/4) = h/4$ и $\bar{M}_2(h/2) = h/2$ отложены на сжатых волокнах.




а б в

Рис. 9.13 К построению $\bar{M}_2$ на участке $ED$: а) отрезанный кусок; б) эпюра; в) положение сжатых волокон

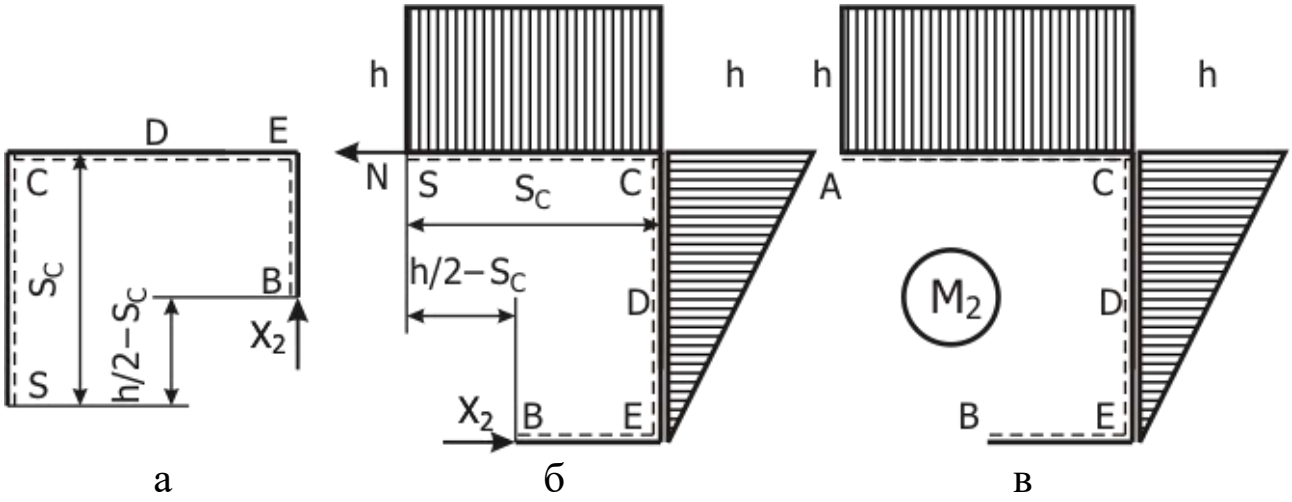
4.2.3. *Участок* $DC$. Разрезаем в сечении $S$, лежащем на расстоянии $S_D$ от точки $D$. Рассматриваем равновесие свободного куска (рис. 9.14.а). Пунктирная линия на разрезанном участке лежит ниже сплошной, поэтому поворот не нужен. Поперечная сила $Q$, приложенная в сечении $S$, уравновешивает силу $\bar{X}_2$ и образует вместе с ней пару сил с моментом $\bar{M}_2 = S_E + h/2$, вращающую кусок в положительном направлении. Значения момента в начале, середине, конце участка равные $\bar{M}_2(0) = h/2$, $\bar{M}_2(h/4) = 3h/4$ и $\bar{M}_2(h/2) = h$ отложены на сжатых волокнах (рис. 9.14.б).




а б в

Рис. 9.14 Эпюра $\bar{M}_2$ на участке $DC$: а) отрезанный кусок; б) эпюра; в) положение сжатых волокон

4.2.4. *Участок* $CA$. Разрежем раму в сечении $S$, лежащем на расстоянии $S_C$ (рис. 9.15.а) от точки $C$. Повернём свободный кусок так, чтобы участок $SC$ был горизонтальным и пунктирная линия лежала ниже сплошной. Сила $\bar{X}_2$ и уравновешивающая её осевая сила $N(S_C)$ образуют пару сил. Момент пары равен $\bar{M}_2(S_C) = \bar{X}_2\,\mathrm{h}$. Значения момента постоянны по длине участка $CA$. Строим эпюру изгибающего момента на сжатых волокнах.




а б в

Рис. 9.15 Эпюра $\bar{M}_2$ на участке $CA$: а) отрезанный кусок; б) повёрнутый кусок; в) эпюра

4.2.5. *Аналитические выражения для эпюры* $\bar{M}_2$ применяются в случае аналитического интегрирования:

$$\bar{M}_2 = \begin{cases} 0; & \text{участок } BE \quad 0 \le s_B \le h/2; \\ S_E; & \text{участок } ED \quad 0 \le S_E \le h/2; \\ S_D + h/2; & \text{участок } DC \quad 0 \le S_D \le h/2; \\ h; & \text{участок } CA \quad 0 \le S_C \le h/2. \end{cases}$$

4.3. *Эпюра грузового момента* $M_\Gamma$. Рассматриваем раму основной системы, нагруженная силой $P$ и равномерно распределённой нагрузкой $q$ (рис. 9.16). Строим эпюру грузового момента от совместного действия $P$ и $q$. (Возможно раздельное построение эпюр от $P$ и эпюры от $q$ с последующим суммированием полученных результатов).

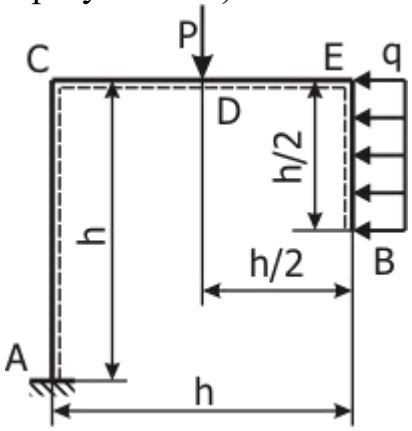


Рис. 9.16 К построению эпюры грузового момента $M_Г$

4.3.1. *Участок* $BE$. Положительный момент вращает против часовой стрелки. Координата сечения $0 \le S_B \le h/2$ (рис. 9.17.а). Повернём кусок $BS$ в «рабочее» положение (рис. 9.17.б). В «рабочем» положении ось разрезанного участка $BS$ с горизонтальна и подчёркнута пунктиром. Заменим нагрузку $q$, действующую на кусок, эквивалентной силой $qS_B$. Эквивалентная сила приложена посередине участка на расстоянии $S_B/2$ от разреза $S$ (рис. 9.17.в). Момент равен $M_Г(S_B) = -qS_B^2/2$. Значения грузового момента в начале, конце, середине участка равны (кН·м):

$$M_Г(0) = -qS_B^2/2 = -5 \cdot \frac{0^2}{2} = 0; \quad M_Г(2) = -qS_B^2/2 = -5 \cdot \frac{2^2}{2} = -10;$$

$$M_Г(1) = -qS_B^2/2 = -5 \cdot \frac{1^2}{2} = -2{,}5.$$

Эпюра приведена на (рис. 9.17.г).

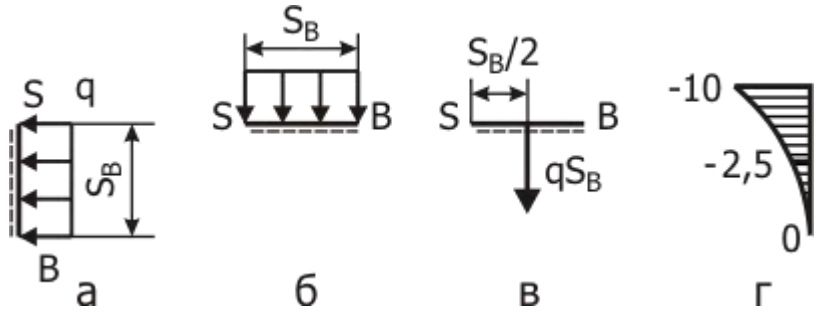



Рис. 9.17 Эпюра грузового момента $M_Г$ на участке $BE$

4.3.2. *Участок* $ED$. Отрезанный кусок и выбор координаты сечения $S_E$ показаны на (рис. 9.18.а). Координата изменяется в пределах $0 \le S_E \le h/2$. Поворот не нужен, так как разрезанный участок находится в «рабочем» положении. Заменим нагрузку $q$, действующую на кусок, эквивалентной силой . Эквивалентная сила приложена посередине участка $BE$. Её плечо относительно разреза $S$ равно $h/4$ (рис. 9. 18.б). Момент имеет постоянное значение на участке $ED$ равное $M_Г(S_E) = -qh^2/8 = -5 \cdot 4^2/8 = -10$ (кН·м).
Эпюра приведена на (рис. 9. 18.в).

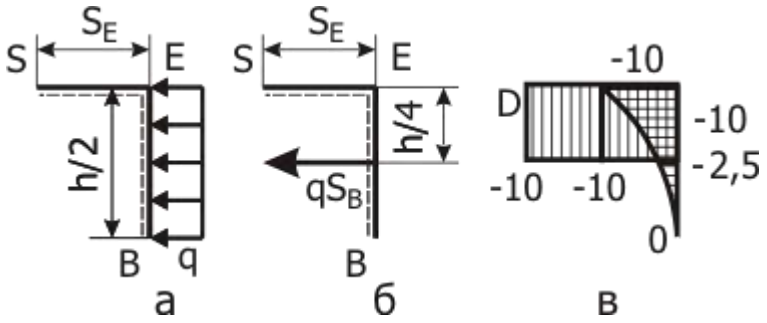



Рис. 9.18 Эпюра грузового момента $M_Г$ на участке $ED$

4.3.3. *Участок* $DC$. Отрезанный кусок и выбор координаты разреза $S_D$ показаны на (рис. 9.19.а). Координата изменяется в границах $0 \le S_D \le h/2$.

Поворот не нужен, так как разрезанный участок находится в «рабочем» положении (ось $DC$ горизонтальна, пунктир лежит ниже оси). Заменим нагрузку $q$, действующую на кусок, эквивалентной силой . Плечо эквивалентной силы относительно разреза $S$ равно $h/4$, а плечо силы $P$ равно $S_D$ (рис. 9.19.б). Момент в сечении с координатой $S_D$ равен $M_Г(S_D) = -qh^2/8 - PS_D$. Значения грузового момента в начале, конце, середине участка $DC$ равны (кН·м):
$M_Г(0) = -qh^2/8 - PS_D = -5 \cdot 4^2/8 - 20 \cdot 0 = -10$;
$M_Г(2) = -qh^2/8 - PS_D = -5 \cdot 4^2/8 - 20 \cdot 2 = -50$;
$M_Г(1) = -qh^2/8 - PS_D = -5 \cdot 4^2/8 - 20 \cdot 1 = -30$.
Эпюра приведена на (рис. 9.19.в).

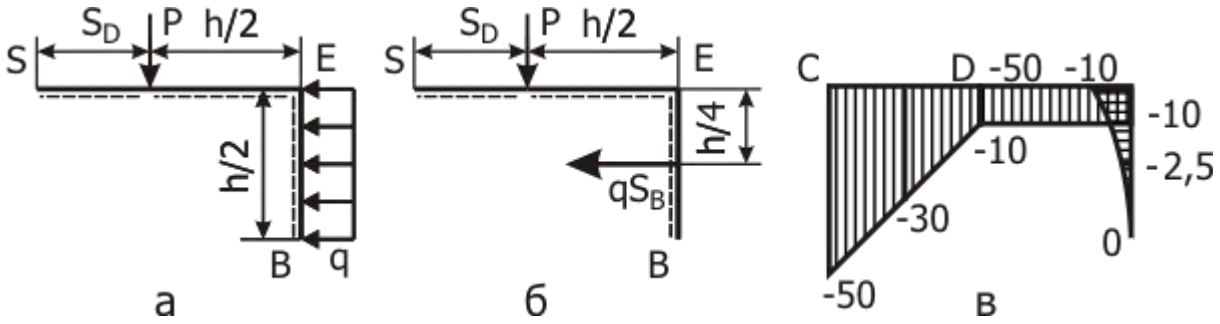



Рис. 9.19 Эпюра грузового момента $M_Г$ на участке $DC$

4.3.4. *Участок* $CA$. Отрезанный кусок и выбор координаты разреза $S_C$ показаны на (рис. 9.20.а). Координата изменяется в границах $0 \le S_C \le h$. Поворачиваем кусок и приводим разрезанный участок $CA$ в «рабочее» положение (ось $CA$ горизонтальна, пунктир лежит ниже оси). Заменим нагрузку $q$, действующую на кусок, эквивалентной силой . Плечо эквивалентной силы относительно разреза $S$ равно $-h/4 + S_C$. Плечо силы $P$ равно (рис. 9.20.б). Момент в сечении с координатой $S_C$ равен . Значения грузового момента в начале, конце, середине участка $DC$ равны, соответственно (кН·м): -50; -30; -10. Эпюра приведена на (рис. 9.20.в).

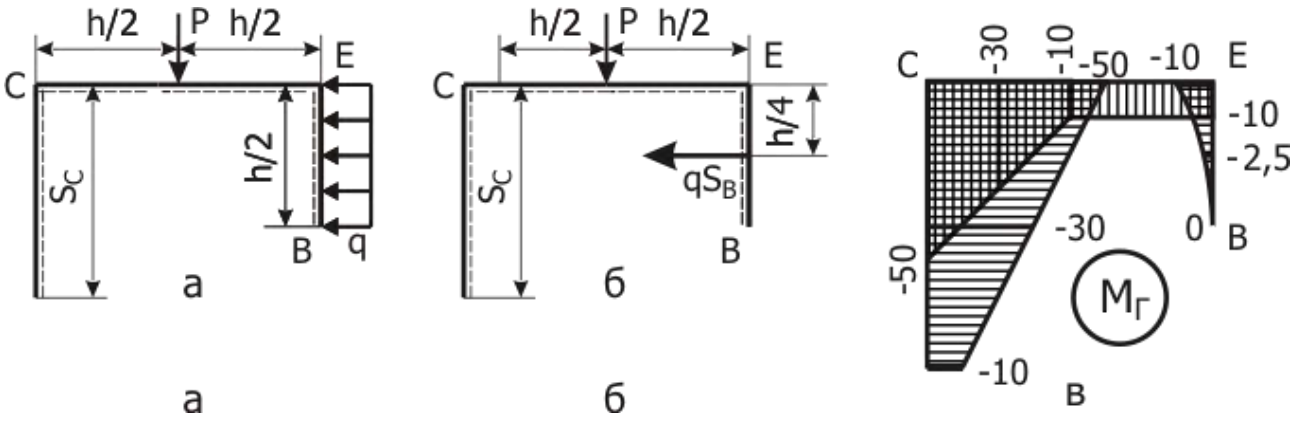



Рис. 9.20 Эпюра грузового момента $M_Г$ на участке $AC$

4.5. *Аналитические выражения для эпюры* $M_Г$ применяются в случае аналитического интегрирования:

$$M_Г = \begin{cases} qs_B{}^2/2; & \text{участок } BE \quad 0 \le s_B \le h/2; \\ q\mathrm{h}^2/8; & \text{участок } ED \quad 0 \le S_E \le h/2; \\ -pS_D - qh^2/8; & \text{участок } DC \quad 0 \le S_D \le h/2; \\ -p\,h/2 - qh^2/8 + qhs_c; & \text{участок } CA \quad 0 \le S_C \le h/2. \end{cases}$$

5. *Вычисление коэффициентов системы канонических уравнений*

5.1. *Коэффициенты при неизвестных*

Интегралы вычисляем по формуле Симпсона

$$I = \int_0^l f(s)g(s)ds = l/6\left(f(s_н)g(s_н) + 4f(s_с)g(s_с) + f(s_к)g(s_к)\right),$$

где $s_н$, $s_с$, $s_к$ – координаты начала, середины и конца участка интегрирования.

$\delta_{11} = 1/EJ\left(\int_B^E \bar{M}_1^2(s_B)ds_B + \int_E^D \bar{M}_1^2(s_E)ds_E + \int_D^C \bar{M}_1^2(s_D)ds_D + \int_C^A \bar{M}_1^2(s_C)ds_C\right)$. Стержни рамы имеют одинаковую жёсткость, поэтому при раскрытии статической неопределимости жёсткость можно не учитывать.

$$\delta_{11} = 2/6\ (0^2 + 4\cdot 1^2 + 2^2) + 2/6\ (2^2 + 4\cdot 2^2 + 2^2) + 2/6\ (2^2 + 4\cdot 2^2 + 2^2) + 4/6\ (2^2 + 4\cdot 0^2 + (-2)^2) = 24$$

;

$$\delta_{12} = \int_B^E \bar{M}_1(s_B)\bar{M}_2(s_B)ds_B + \int_E^D \bar{M}_1(s_E)\bar{M}_2(s_E)ds_E + + \int_D^C \bar{M}_1(s_D)\bar{M}_2(s_D)ds_D + \int_C^A \bar{M}_1(s_C)\bar{M}_2(s_C)ds_C$$

$$\delta_{12} = \delta_{21} = 2/6\,(0\cdot 0 + 4\cdot 1\cdot 0 + 2\cdot 0) + 2/6\,(2\cdot 0 + 4\cdot 2\cdot 1 + 2\cdot 2) + 2/6\,(2\cdot 2 + 4\cdot 2\cdot 3 + 2\cdot 4) + 4/6\,(2\cdot 4 + 4\cdot 0\cdot 4 + (-2)\cdot 4) = 16;$$

$\delta_{22} = \int_B^E \bar{M}_2^2(s_B)ds_B + \int_E^D \bar{M}_2^2(s_E)ds_E + \int_D^C \bar{M}_2^2(s_D)ds_D + \int_C^A \bar{M}_2^2(s_C)ds_C.$

$$\delta_{22} = 2/6\ (0^2 + 4\cdot 0^2 + 0^2) + 2/6\ (0^2 + 4\cdot 1^2 + 2^2) + 2/6\ (2^2 + 4\cdot 3^2 + 4^2) + 4/6\ (4^2 + 4\cdot 4^2 + 4^2) = 85{,}3.$$

5.2. *Грузовые коэффициенты*.

$$\Delta_1 = \int_B^E \bar{M}_1(s_B)M_Г(s_B)ds_B + \int_E^D \bar{M}_1(s_E)M_Г(s_E)ds_E + + \int_D^C \bar{M}_1(s_D)M_Г(s_D)ds_D + \int_C^A \bar{M}_1(s_C)M_Г(s_C)ds_C;$$

$$\Delta_1 = 2/6\,(0\cdot 0 + 4\cdot 1\cdot(-2{,}5) + 2\cdot(-10)) - 2/6\,(2\cdot 10 + 4\cdot 2\cdot 10 + 2\cdot 10) - -2/6\,(2\cdot 10 + 4\cdot 2\cdot 30 + 2\cdot 50) - 4/6\,(2\cdot 50 + 4\cdot 0\cdot 30 + (-2)\cdot 10) = -22300;$$

$$\Delta_2 = \int_B^E \bar{M}_2(s_B)M_Г(s_B)ds_B + \int_E^D \bar{M}_2(s_E)M_Г(s_E)ds_E + + \int_D^C \bar{M}_2(s_D)M_Г(s_D)ds_D + \int_C^A \bar{M}_2(s_C)M_Г(s_C)ds_C;$$

$$\Delta_2 = -2/6\,(0\cdot 0 + 4\cdot 0\cdot 2{,}5 + 2\cdot 10) - 2/6\,(0\cdot 10 + 4\cdot 1\cdot 10 + 2\cdot 10) - -2/6\,(2\cdot 10 + 4\cdot 3\cdot 30 + 4\cdot 50) - 4/6\,(4\cdot 50 + 4\cdot 4\cdot 30 + 4\cdot 10) = -693.$$

6. *Решение системы канонических уравнений метода сил.*

Получена система канонических уравнений метода сил

$$\begin{cases} 24X_1 + 16\,X_2 - 22300 = 0; \\ 16\,X_1 + 85{,}3X_2 - 693 = 0. \end{cases}$$

Корни системы: $X_1 = 4{,}44$; и $X_2 = 7{,}29$.

7. *Эпюры внутренних силовых факторов в заданной раме*.

7.1. *Изгибающий момент*. Действующий в раме момент находим по формуле:

$$M(s) = M_\Gamma(s) + X_1\bar{M}_1(s) + X_2\bar{M}_2(s).$$

Моменты, действующие на отдельных стержнях рамы, равны:

$M(s_B = 0) = 0 + 4{,}44 \cdot\ 0 + 7{,}29 \cdot 0 = 0$;

$M(s_B = 1) = -2{,}5 + 4{,}44 \cdot 1 + 7{,}29 \cdot 0 = 1{,}94$;

$M(s_B = 2) = M(s_E = 0) = -10 + 4{,}44 \cdot 2 + 7{,}29 \cdot 0 = -1{,}11$;

$M(s_E = 1) = -10 + 4{,}44 \cdot 2 + 7{,}29 \cdot 1 = 6{,}18$;

$M(s_E = 2) = M(s_D = 0) = -10 + 4{,}44 \cdot 2 + 7{,}29 \cdot 2 = 13{,}5$;

$M(s_D = 1) = -30 + 4{,}44 \cdot 2 + 7{,}29 \cdot 3 = 0{,}764$;

$M(s_D = 2) = M(s_C = 0) = -50 + 4{,}44 \cdot 2 + 7{,}29 \cdot 4 = -11{,}9$;

$M(s_C = 2) = -30 + 4{,}44 \cdot 0 + 7{,}29 \cdot 2 = -0{,}833$;

$M(s_C = 4) = -10 + 4{,}44 \cdot (-2) + 7{,}29 \cdot 4 = 10{,}3$.

Эпюра изгибающих моментов в статически неопределимой раме построена на рис. 9.21.а

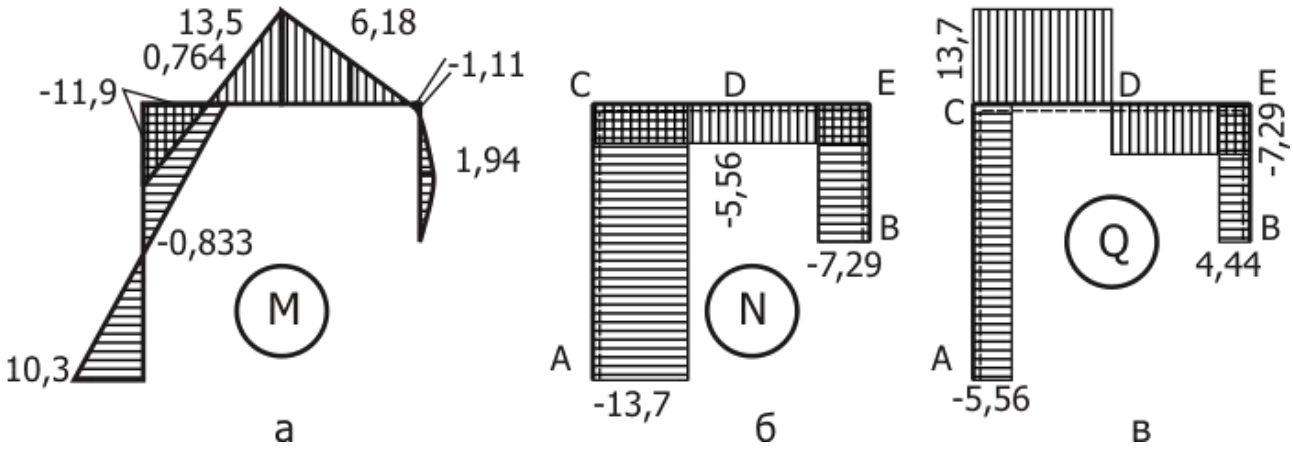



Рис. 9.21 Эпюры момента $M$, осевой силы $N$, поперечной силы $Q$

7.2. *Опорные реакции* $X_A, Y_A$. Из уравнений равновесия получаем:

$\sum X = 0; \quad X_A = q\,h/2 - X_1 = 5 \cdot 4/2 - 4{,}44 = 5{,}56$ кН;

$\sum Y = 0; \quad Y_A = P - X_2 = 20 - 7{,}29 = 12{,}7$ кН.

7.3. *Эпюра осевых сил* $N$. Растягивающую силу считаем положительной и откладываем на наружных волокнах стержня (рис. 9.21.б).

7.4. *Эпюра поперечной силы* $Q$. Поперечной сила считается положительной, если она вместе с внешней нагрузкой поворачивает отрезанный кусок по ходу стрелок часов. Эпюра $Q$ приведена на рис. 9.21.в.

8. *Деформационная проверка.* Проверка состоит в проверке выполнения условий обращения в нуль интегралов:

$D1 = \sum 1/EJ \int M(s)\bar{M}_1(s)ds; \quad D2 = \sum 1/EJ \int M(s)\bar{M}_2(s)ds.$

В результате вычислений получаем: $D1 = -0{,}0000553, \quad D2 = 0{,}000213$.

9. *Подбор сечения двутавровой балки*.
$W = M_{max}/[\sigma] = 13{,}5 10^3/1{,}6\,10^8 = 8{,}43 \cdot 10^{-5}$ м$^3$ . Выбираем двутавр №16.
$W_{16} = 109 \cdot 10^{-4}$ м$^3$

## ОФОРМЛЕНИЕ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Расчётно-пояснительная записка дипломного проекта выполняется на листах формата А4 (210х297 мм) в соответствии с ГОСТ 2.301-68. ЕСКД.

Листы должны иметь нумерацию. При оформлении записки на титульном листе указать тему РГР, фамилию, инициалы студента, специальность и группу.

При выполнении задания все преобразования и числовые расчёты должны быть последовательно проделаны с необходимыми пояснениями.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ицкович Г. М., Минин Л. С., Винокуров А. И.*Руководство к решению задач по сопротивлению материалов. М.:Высшая школа,1999.

2. *Мокрушин Н. В., Ляпцев С. А.*Конспект лекций по сопротивлению материалов. Екатеринбург, Издание УГГУ, 2005.

3. *Степин П.А.* Сопротивление материалов. М.: Лань, 2010.

Учебное издание

Чиркова Алена Анатольевна, Золкин Анатолий Павлович,
Суслов Дмитрий Николаевич, Афанасьев Анатолий Ильич,

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

*Учебно-методическое пособие*
и контрольные задания для выполнения РГР
и самостоятельной работы студентов специальности *21.05.04 Горное дело*

---

Редактор *В.В. Баклаева*

Подписано в печать
Бумага писчая. Формат бумаги 60×84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. 5,2 Уч. изд. л. 1,72 Тираж 100 экз. Заказ №

Издательство УГГУ
620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

**Министерство образования и науки РФ**
**ФГБОУ ВО**
**«Уральский государственный горный университет»**

**Т. П. Глинникова, С. А. Волегов**

# ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

***Учебное пособие***
**по курсу «Технология машиностроения»**
**для студентов специальности**
**15.03.01 – «МАШИНОСТРОЕНИЕ»**
***очного и заочного обучения***

**Екатеринбург**
**2019**

Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВПО
«Уральский государственный горный университет»

**ОДОБРЕНО**
Методической комиссией
горно-механического
факультета УГГУ
«20» января 2011 г.
Председатель комиссии
_ проф. В. П. Барановский

Т. П. Глинникова, С. А. Волегов

# ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

*Учебное пособие*
по курсу «Технология машиностроения»
для студентов специальности
130602 – «Машины и оборудование
нефтяных и газовых промыслов» (МНГ)
направления
130600 – «Оборудование и агрегаты
нефтегазового производства»
*очного и заочного обучения*

Издание УГГУ Екатеринбург, 2011

Г54

Рецензент: *А. П. Комиссаров,* д-р техн. наук, профессор кафедры ГМК Уральского государственного горного университета

Учебное пособие рассмотрено на заседании кафедры эксплуатации горного оборудования 7 июля 2011 г. (протокол № 6) и рекомендовано для издания в УГГУ.

Г54 **Глинникова Т. П., Волегов С. А.**
ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ: учебное пособие по курсу «Технология машиностроения» для студентов специальности 130602 – «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов» (МНГ) направления 130600 – «Оборудование и агрегаты нефтегазового производства» очного и заочного обучения / Т. П. Глинникова, С. А. Волегов. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2011. – 80 с.

Учебное пособие по курсу «Технология машиностроения» является общетеоретическим разделом данного курса и содержит теоретические основы предмета «Технология машиностроения». Учебное пособие может быть использовано студентами специальности 150402 – «Горные машины и оборудование» направления 150400 – «Технологические машины и оборудование» при изучении курса «Технология производства горных машин» очного и заочного обучения.

© Глинникова Т. П., Волегов С. А., 2011
© Уральский государственный горный университет, 2011

# ВВЕДЕНИЕ

Технология машиностроения – это отрасль науки, изучающая закономерности, действующие в процессе изготовления машин с целью обеспечения требуемого качества машин.

В соответствии с программой в курсе технологии машиностроения изучаются, в основном, процессы механической обработки и сборки машин. Это объясняется тем, что заданная форма, точность обработки и качество поверхностного слоя, в основном, достигается путем механической обработки, так как другие способы обработки не всегда могут обеспечить выполнение технических требований.

В курсе не рассматривается сущность технологических методов, а дается их сравнительная характеристика с целью возможности построения наиболее рациональных, т. е. наиболее, производительных и экономичных технологических процессов обработки деталей машин.

В технологии машиностроения комплексно изучаются вопросы взаимодействия станка, приспособления, режущего инструмента и обрабатываемой детали.

Технология машиностроения, как научная дисциплина, разработана трудами советских ученых на основе интенсивного развития машиностроения в годы советской власти. Начало формирования этой дисциплины относится к тридцатым годам XX века.

Машиностроение обеспечивает изготовление новых и совершенствование имеющихся машин. Это связано с весьма существенными затратами, которые составляют в народном хозяйстве ощутимую долю. Тем не менее, развитие отечественного машиностроения, а не импорт машин, является единственно правильным направлением в прогрессивном развитии промышленности.

Конструирование и изготовление машин представляет собой два этапа единого процесса. Эти этапы неразрывно связаны между собой. Уже нельзя себе представить конструирование без учета технологичности конструкции. Технологичная конструкция позволяет экономить затраты труда, повышать точность, использовать высокопроизводительное оборудование, оснастку и инструменты, экономить энергию. Чем более технологичной оказывается конструкция, тем совершеннее и дешевле будет ее производство, в ходе подготовки которого не требуется проводить корректировок чертежей и доделок.

Отличительной особенностью современного машиностроения является существенное ужесточение эксплуатационных характеристик машин: увеличиваются скорость, ускорение, температуры, уменьшаются масса, объем, вибрация, время срабатывания механизмов и т. п. Темпы такого ужесточения постоянно возрастают и машиностроители вынуждены все быстрее решать конструкторские и технологические задачи. В условиях рыночных отношений быстрота реализации принятых решений играет главенствующую роль.

На этапе изготовления машин особое внимание обращают на их качество и его важнейший показатель – точность. В истекшем столетии точность деталей машин выросла почти в 2000 раз. Такого увеличения не наблюдается ни по одному из показателей служебных характеристик.

Увеличение быстроходности машин вызывает повышение требований к надежности и долговечности. А это, в свою очередь, ставит перед технологической наукой задачи по более широкому внедрению методов обработки, приводящих к упрочнению поверхностного слоя деталей.

Для того, чтобы повысить эффективность от внедрения новых машин, подготовка производства и освоение новых машин должны вестись в более сжатые сроки, поэтому следует развивать поточное производство на основе групповой обработки деталей и типизации технологических процессов.

Практическому применению прогрессивных технологических процессов, оснастки и оборудования содействует единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП), которая внедряется на машиностроительных предприятиях. В механообработке, наряду с внедрением скоростной обработки, проводится работа по дальнейшему сокращению вспомогательного времени.

# 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

## *1.1. Производственный и технологический процессы*

Процесс изготовления машин состоит из большого комплекса операций: это получение заготовок, их обработка и сборка машин. Кроме этих основных работ требуется выполнять еще многие вспомогательные работы, без которых изготовление продукции невоз-

можно, например, контроль деталей, изготовление приспособлений, ремонт станков и т. п.

В связи с этим различают **производственный и технологический**, процессы.

Под ***производственным процессом*** понимается совокупность всех действий людей и машин, связанных с превращением материалов и полуфабрикатов в готовую продукцию (заготовки, детали или машины). В производственный процесс входят все процессы и работы, выполняемые на машиностроительном предприятии, в том числе и все вспомогательные процессы. И, в связи с этим, различают основное и вспомогательное производства.

К основному производству относится все то, что связано с изготовлением основной продукции данного предприятия.

К вспомогательному производству – изготовление и ремонт средств технологического оснащения.

***Технологический процесс (ТП)*** – часть производственного процесса, непосредственно связанного с изменением формы, размеров ила свойств предмета от начала производства до получения готовой продукции.

Технологический процесс состоит из следующих стадий: производство заготовок, обработка деталей и сборка.

Технологический процесс выполняется на рабочих местах. Под рабочим местом понимается часть площади цеха, предназначенная для выполнения работы одним рабочим или группой рабочих. На рабочем месте имеется необходимое технологическое оборудование.

Машиностроительные заводы состоят из отдельных производственных единиц – цехов.

В состав машиностроительного завода входят следующие группы цехов:

1. Заготовительные. К ним относятся литейный, кузнечнопрессовый и др.

2. Обрабатывающие. К ним относятся механический, термический, деревообрабатывающий, сборочный и др.

3. Вспомогательные. К ним относятся инструментальный, ремонтно-механический и др.

4. Подсобное хозяйство. К этой группе относятся: складское хозяйство, транспорт, энергетика, санитарно-техническая часть и др.

## *1.2. Типы производства, формы организации и виды технологических процессов*

Тип производства – классификационная категория производства, выделяемая по признакам широты номенклатуры, регулярности, стабильности и объема выпуска изделий.

Объем выпуска изделий – количество изделий определенных наименований, типоразмера и исполнения, изготовленных или ремонтируемых объединением, предприятием или его подразделением в течение планируемого интервала времени.

Реализуют следующие типы производства: единичное; серийное и массовое.

Одной из основных характеристик типа производства является коэффициент закрепления операций $К_{з.о.}$ – отношение числа всех различных технологических операций **О**, выполненных или подлежащих выполнению в течение месяца, к числу рабочих мест **Р.** $К_{з.о.} = О/Р$.

***Формы организации технологических процессов.*** В соответствии со стандартами системы разработки и постановки продукции на производство (СРПП – ГОСТ Р 15.000-94) устанавливается две формы организации технологических процессов: групповая и поточная.

***Групповая форма*** организации техпроцессов характеризуется однородностью конструктивно-технологических признаков изделий, единством средств технологического оснащения одной или нескольких технологических операций и специализацией рабочих мест. Или иначе, групповая форма – это форма организации производства, характеризуемая совместным изготовлением или ремонтом групп изделий различной конфигурации на специализированных рабочих местах. Основой при групповой форме организации техпроцессов должно быть группирование изделий по конструктивно-технологическим признакам.

***Поточная*** организация производства характеризуется расположением технологического оснащения в последовательности выполнения операций технологического процесса и специализации рабочих мест. Поточную форму организации техпроцессов в зависимости от номенклатуры одновременно обрабатываемых изделий подразделяют на однономенклатурную поточную линию и многономенклатурную поточную линию.

***Виды технологических процессов.*** По степени унификации

различают следующие виды технологических процессов: единичный, типовой и групповой. Вид технологического процесса определяется количеством изделий, охватываемых процессом (одно изделие, группы однотипных изделий). Наименование процессов устанавливают по стандартам СРПП.

***Единичный технологический процесс*** – технологический процесс, относится к изделиям одного наименования, типоразмера и исполнения, независимо от типа производства.

***Типовой технологический процесс*** – технологический процесс, характеризуемый единством содержания и последовательности большинства технологических операций и переходов для группы изделий с общими конструктивными признаками.

*Типовой процесс применяется:*

а) как информационная основа при разработке рабочего технологического процесса;

б) как рабочий технологический процесс при наличии всей необходимой информации для изготовления детали, или как база для разработки стандартов на типовые технологические процессы.

Типовой технологический процесс может являться совокупностью типовых технологических операций, которые характеризуются единством содержания и последовательности технологических переходов для группы изделий с общими конструктивными признаками.

***Групповой технологический процесс*** – технологический процесс, характеризуемый единством методов обработки с использованием однородных и быстро переналаживаемых приспособлений для групп изделий даже с разными конструктивными признаками. Групповой технологический процесс может состоять из групповых технологических операций, которые являются общими для групп различных деталей с определенной групповой оснасткой на данном оборудовании.

Таким образом, групповой технологический процесс – это совокупность групповых технологических операций, обеспечивающих изготовление различных деталей группы (или нескольких групп) по общему технологическому маршруту.

Каждый вид технологических процессов характеризуется следующими признаками:

а) основным назначением процесса: рабочий, перспективный;

б) степенью детализации содержания процесса: маршрутный, операционный, маршрутно-операционный.

***Рабочий технологический процесс*** – технологический процесс, выполняемый по рабочей и (или) конструкторской документации (применяется: для изготовления в соответствии с требованиями рабочей технической документации).

***Перспективный технологический процесс*** – технологический процесс, соответствующий современным достижениям науки и техники, методы и средства осуществления которого полностью или частично предстоит освоить на предприятии.

***Маршрутный технологический процесс*** – технологический процесс, выполняемый по документации, в которой содержание операций приводится без указания переходов и режимов обработки (технологический маршрут – последовательность прохождения заготовки, детали или сборочной единицы по подразделениям предприятия при выполнении технологического процесса изготовления или ремонта).

***Операционный технологический процесс*** – выполняется по документации, в которой содержание операций излагается с указанием переходов и режимов обработки.

***Маршрутно-операционный технологический процесс*** – выполняется по документации, в которой содержание отдельных операций излагается без указания переходов и режимов обработки.

## *1.3. Структура технологического процесса и его основные характеристики*

Все определения, касающиеся структуры технологического процесса, даны ниже в соответствии со стандартом ГОСТ 3.1109–82 (Процессы технологические, основные термины и определения).

***Технологический процесс*** – часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и (или) последующему определению состояния предмета труда; таким образом, при реализации технологического процесса происходит изменение качественного состояния объекта производства (химических и физических свойств материала, форм, размеров, качества поверхности, внешнего вида объекта и т. д.; в техпроцесс включен также контроль качества).

***Операция*** – законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте (или с использованием одной тех-

нологической системы). Название операции дается **по названию станка**, на котором выполняется данная операция.

*Пример:* обработка ступенчатого валика при установке в центрах (рис. 1) может осуществляться за одну или несколько операций.

На рис. 1 показана установка вала для обработки поверхностей *1* и *2*, поверхность *3* при этой установке нельзя обработать, так как здесь находится хомутик. Для того чтобы обработать поверхность *3*, нужно деталь переустановить, т. е. выполнить следующую установку.

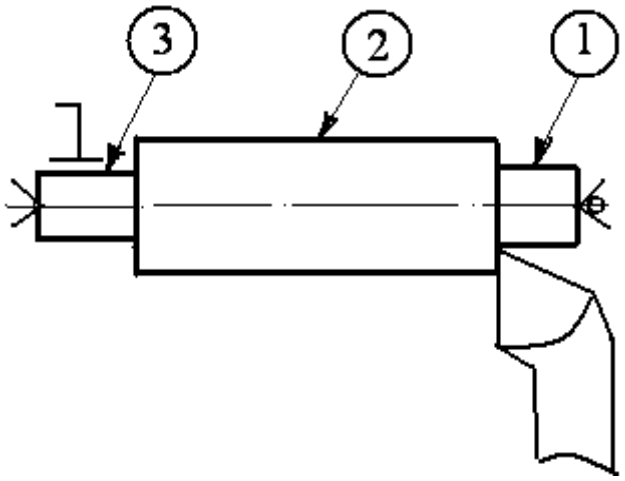



Рис. 1. Схема обработки вала точением

***Установ*** – часть технологической операции, выполняемая при неизменном закреплении обрабатываемой заготовки или собираемой сборочной единицы.

***Позиция*** – фиксированное положение, занимаемое неизменно закрепленной заготовкой или собираемой сборочной единицей совместно с приспособлением относительно инструмента или неподвижной части оборудования для выполнения определенной части операции.

Предположим нужно фрезеровать две лыски (поверхность *1*) на детали) рис. 2. Обработка каждой лыски может осуществляться при изменении установки детали, например, в машинных тисках. Однако можно применить приспособление, например, делительную головку. При этом деталь один раз закрепляется в патроне, а для обработки второй лыски не раскрепляется, а лишь поворачивается в нужное положение относительно режущего инструмента.

***Технологический переход*** – законченная часть технологической

операции, выполняемая одними и теми же средствами технологического оснащения при постоянных технологических режимах и установках. Обработка поверхности *1* – первый переход, а поверхности *2* – новый, второй переход, и т. д. (см. рис. 1). Если обработка осуществляется по схеме, изображенной на (рис. 3), то обработка поверхностей *1 – 3* рассматривается как **один переход** (смотри формулировку).

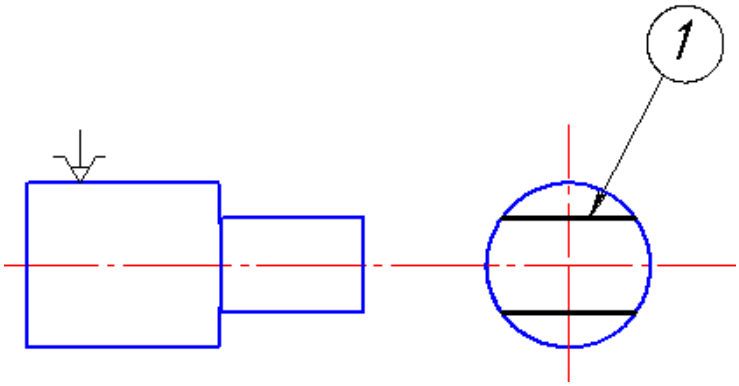



Рис. 2. Схема обработки вала фрезерованием

Если последовательно выполняется **несколько одинаковых** переходов, то они рассматриваются как один переход.

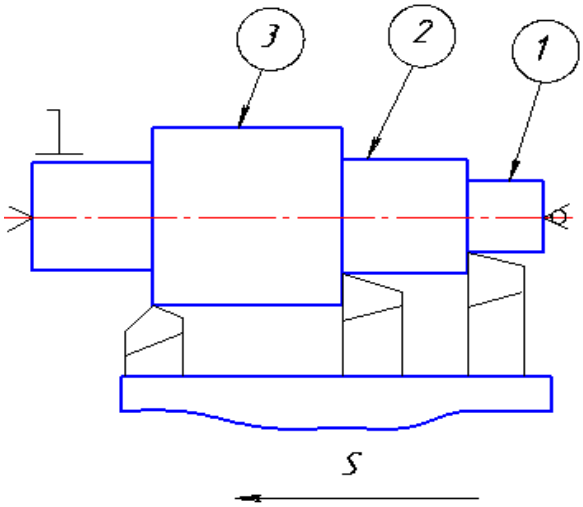



Рис. 3. Схема одного перехода точением нескольких поверхностей одновременно

Например, нужно сверлить три отверстия в детали (рис. 4). Одинаковым считается такой переход, который выполняется одним инструментом при одинаковых режимах резания и одинаковых разме-

рах обрабатываемых поверхностей.

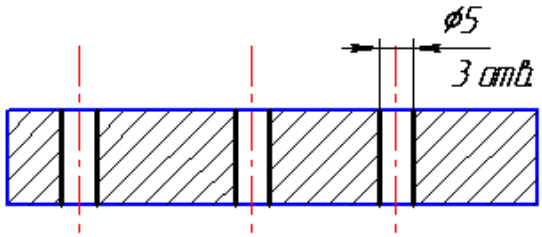



Рис. 4. Схема одного перехода (сверление нескольких одинаковых отверстий)

***Вспомогательный переход*** – законченная часть технологической операции, состоящая из действий человека и (или) оборудования, которые не сопровождаются изменением формы, размеров и шероховатости поверхности, но необходимы для выполнения технологического перехода.

***Ход***. Если с поверхности требуется снять большой слой металла и за один раз это сделать невозможно, то приходится обработку данной поверхности повторять несколько раз. При этом различают рабочие и вспомогательные ходы.

***Рабочий ход*** – законченная часть технологического перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки, сопровождающаяся изменением формы, размеров, качества поверхности и свойств заготовки (рис. 5).

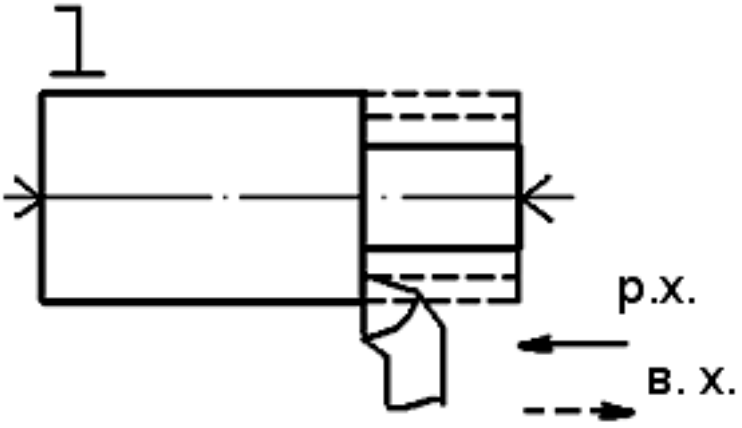



Рис. 5. Схема многопроходного точения с указанием рабочего хода и вспомогательного

***Вспомогательный ход (в. х.)*** – часть перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки, не сопровождающаяся изменением размеров, формы и шероховатости поверхности, но необходимая для выполнения рабочего хода

(см. рис. 5).

## 2. ТИПЫ ПРОИЗВОДСТВА

В машиностроении различают три основных типа производства: единичное, серийное и массовое. Между этими основными типами производства имеются не только количественные различия (по количеству выпускаемых машин), но имеются существенные качественные различия (применяемое оборудование, приспособления и др.).

***Единичное (индивидуальное) производство*** характеризуется широкой номенклатурой изготовляемых изделий и малым объемом выпуска. Конструкции изделий разнообразны. Если в течение года выпускается несколько одинаковых изделий, то они изготавливаются последовательно. Заводы единичного производства не имеют четко выраженной специализации. Продукция этих заводов разнообразная, за исключением некоторых заводов машиностроения, изготавливающих крупные уникальные машины. В связи с этим на заводах единичного производства применяются универсальные станки, приспособления, стандартный режущий и измерительный инструмент. Многие детали устанавливаются и обрабатываются по разметке. Поэтому при обработке деталей много времени затрачивается на установку, выверку и крепление, деталей, а при сборке – на слесарную пригонку. На этих заводах требуются рабочие высокой квалификации. Станки располагаются по признаку однородности обработки, т. е. создаются участки станков, предназначенных для одного вида обработки – токарных, строгальных, фрезерных и др. Коэффициент закрепления операций ($К_{з.о.}$) > 40.

Заготовки делаются с большими припусками. Они лишь приближенно по форме и размерам соответствуют обрабатываемой детали, коэффициент использования металла, определяемый отношением массы детали к массе заготовки, равен 0,5, поэтому при обработке много металла превращается в стружку. При обработке на одном станке стараются обрабатывать возможно большее количество поверхностей, вплоть до полной обработки всей детали. Для заводов единичного производства, характерна самая низкая производительность и самая высокая себестоимость. Удельный вес заводов единичного производства невысок.

К заводам единичного производства относятся экспериментальные заводы. Заводы выпускают уникальные изделия, например, прокатные станы.

***Серийное производство*** характеризуется ограниченной номенклатурой изделий, периодически повторяющимися партиями и сравнительно большим объемом. В зависимости от количества изделий в партии или серии и значение коэффициента закрепления операций различают мелкосерийное, среднесерийное и крупносерийное производство.

Коэффициент закрепления операций в соответствии со стандартом принимают равным:

1) для мелкосерийного производства – свыше 20 до 40 включительно;
2) среднесерийного производства – свыше 10 до 20 включительно;
3) крупносерийного производства – свыше 1 до 10 включительно.

*Основные признаки серийного производства:*

- станки применяются разнообразных типов: универсальные, специализированные, специальные, автоматизированные;
- кадры различной квалификации;
- работа может производиться на настроенных станках;
- применяется и разметка, и специальные приспособления;
- сборка без пригонки и т. д.;
- оборудование располагается в соответствии с предметной формой организации работы.

Станки располагаются в последовательности технологических операций для одной или нескольких деталей, требующих одинакового порядка выполнения операций. В той же последовательности, очевидно, образуется и движение деталей (так называемые предметно-замкнутые участки). Обработка заготовок производится партиями. При этом время выполнения операций на отдельных станках может быть не согласовано со временем операций на других станках.

Изготовленные детали хранятся во время работы у станков и затем транспортируются всей партией.

При серийном производстве изделия выпускаются сериями, а детали в цехах изготавливаются партиями. Размер серии может колебаться от 5 – 10 шт. до нескольких тысяч. Все детали одной партии находятся в производстве одновременно. В цехах имеет место частичная специализация станков, отдельные операции закрепляются за определенными станками. В зависимости от количества изделий в серии и размеров машин в серийном производстве различают мелко-, средне- и крупносерийное производство. В серийном производстве

технологический процесс преимущественно расчленяется на отдельные операции, которые закрепляются за отдельными станками.

На заводах серийного производства применяются разнообразные виды оборудования: универсальные, специальные, автоматизированные и агрегатные станки. Широко применяются универсальные, специализированные и специальные приспособления, универсальный, и специальный режущий инструмент. Измерительный инструмент применяется как универсальный, так и предельные калибры.

Заготовки по форме и размерам приближаются к размерам и форме обрабатываемой детали. Припуски на обработку уменьшаются. Коэффициент использования металла равен 0,7. Серийное производство значительно экономичнее единичного.

Серийное производство является самым распространенным типом производства, его удельный вес примерно 70 – 80 %. К заводам серийного производства относятся станкостроительные и горного машиностроения.

На заводах серийного производства применяются две формы организации производства.

*Первая – обычная серийная форма*. В этом случае станки устанавливается по групповому признаку. Время обработки на отдельных станках не согласуется. Детали обрабатываются партиями. После обработки всей партии на одном станке они передаются на другой станок.

*Вторая – переменно-поточная форма*. В этом случае оборудование располагается по ходу технологического процесса (в порядке последовательной обработки). Время обработки на отдельных операциях согласуется. Оно должно быть равно или кратно такту выпуска данной линии. Движение заготовки от станка к станку осуществляется непрерывно. Для перехода к обработке партии других деталей осуществляется переналадка линии (приспособлений, инструментов).

***Массовое производство*** характеризуется узкой номенклатурой и большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготавливаемых в течение продолжительного времени. Характерной особенностью массового производства является поточный метод производства с выполнением на подавляющем большинстве рабочих мест постоянно повторяющихся операций.

Коэффициент закрепления операций для массового производства принимают равным единице.

Таким образом, изделия изготовляются в большом количестве

длительное время, конструкция изделия меняется плавно. Используется рабочая сила низкой квалификации при наличии настройщиков, оборудование автоматизированное, полная взаимозаменяемость при сборке. Массовому производству присуща поточная форма организации производства, при которой операции обработки или сборки машины закреплены за определенным оборудованием или рабочими местами, оборудование расположено в порядке выполнения операций, а изготовляемая деталь передается с одной операции на следующую сразу после выполнения предшествующей операции, как правило, с помощью специальных транспортных устройств. На заводах массового производства применяются высокопроизводительные станки, предназначенные для выполнения какой-либо операции над конкретной деталью. Широко применяются высокопроизводительные приспособления, режущие инструменты. Широкое применение предельных калибров обеспечивает высокую, вплоть до полной, взаимозаменяемость и полное устранение пригоночных работ при сборке. К заводам массового производства относятся заводы, выпускающие автомобили, тракторы и др.

На заводах массового производства применяются две формы организации производства: *поточно-массовая и массово-прямоточная.* И в том, и в другом случае оборудование располагается в порядке технологической последовательности. Различие состоит в том, что в поточно-массовом производстве (непрерывный поток) время обработки на всех станках согласуется. Оно равно или кратно такту выпуска линии, мин:

$$\tau = \frac{60 F_{д} m}{N},$$

где $F_{д}$ – действительный годовой фонд рабочего времени (при 254 рабочих днях в году и 8 часовой смене) час; $m$ – количество смен в сутках; $N$ – годовой объем выпуска деталей, шт.

После обработки детали на одном станке она сразу передается на другое рабочее место. Детали перемещаются автоматически при помощи конвейеров. Технологический процесс разбивается на простейшие операции.

При прямоточном методе (пульсирующий поток) время обработки не на всех станках согласуется с одним тактом. Вследствие равной трудоемкости операций движение заготовок десинхронизировано. В этом случае применяются сложные операции, выполняемые

на сложных многоинструментальных станках.

Выбор метода построения поточного производства определяется технико-экономическим анализом.

Несмотря на то, что массовое производство является самым эффективным, у него есть сёрьезный недостаток: массовое производство не позволяет быстро и без больших потерь переходить на новый вид продукции.

***Пути повышения эффективности серийного производства.***

Серийное производство является самым распространенным типом производства. Однако эффективность серийного производства значительно ниже массового. Естественно, что нельзя сделать искусственно все серийные заводы заводами массового производства. Поэтому перед технологией машиностроения стоит задача создать на заводах серийного производства условия для использования достоинств массового производства.

Добиться повышения серийности без увеличения объема производства можно используя один из трех путей: *конструкторский, технологический и организационный,* или все вместе.

*Конструкторский путь* основан на широком внедрении нормализации и унификации деталей, узлов и машин.

Применение унификации позволяет без увеличения программы привести к одному типоразмеру ряд различных деталей и за счет этого увеличить размер партии одинаковых деталей.

*Технологический путь* основан на применении прогрессивных направлений при разработке технологических процессов. А именно, применение типизации технологических процессов и групповая обработка деталей.

*Организационный путь* основан на организации группового запуска. Для осуществления этого в одном заказе объединяет несколько одинаковых или аналогичных деталей, встречавшихся в различных заказах месячной или квартальной программы.

Рассмотрим более подробно технологический путь.

Типизация технологических процессов предложена советским ученым, проф. Соколовским А. П. Сущность идеи типизации состоит в том, что одинаковые детали или близкие по конфигурации должны обрабатываться по одинаковой технологии с использованием одинакового оборудования, приспособлений и инструмента. Это приводит к тому, что трудоемкость подобных деталей одинакова. И, кроме того, это создает возможность спроектировать оптимальные техноло-

гические процессы. Типизация технологических процессов базируется на классификации деталей. Соколовский А. П. подразделил все машиностроительные детали на классы: валы, зубчатые колеса, рычаги и др.

Классы подразделяются на группы, подгруппы и типы.

Под типом понимается совокупность деталей, имевших одинаковый технологический процесс, осуществляемый на одинаковом оборудовании и приспособлениях. В пределах типа допускаются некоторые отклонения, связанные с введением дополнительных операций.

Для осуществления типизации следует проделать большую подготовительную работу. Разработать классификатор деталей и разработать технологические процессы.

Достоинством типизации является:

1. Приводятся в систему технологические процессы.

2. Резко сокращается труд технологов и сроки подготовки производства.

3. Создаются предпосылки для использования методов массового производства в условиях серийного производства.

Групповая обработка предложена советским ученым, проф. Митрофановым С. П. Групповая обработка является дальнейшим развитием типизации технологических процессов.

В основе групповой обработки также находится технологическая классификация. Однако в этом случае под классом понимается совокупность деталей, характеризуемая общностью типа оборудования.

Для осуществления групповой обработки кроме выделения классов следует решить главную задачу – формирование группы. Под группой понимается совокупность деталей, имеющих одинаковые обрабатываемые поверхности, допускающие обработку с одной наладки. У этих деталей совсем не обязательно должен быть одинаковый технологический процесс.

Для осуществления групповой обработки следует выполнить следующие работы (рис. 6):

1. Подобрать детали в группу.

2. Определить фактическую трудоемкость обработки всех деталей.

3. На основании фактической трудоемкости окончательно сформировать состав группы.

4. Разработать комплексную деталь. Комплексная деталь – это реальная или нереальная деталь, содержащая в себе все поверхности, встречающиеся в деталях данной группы.

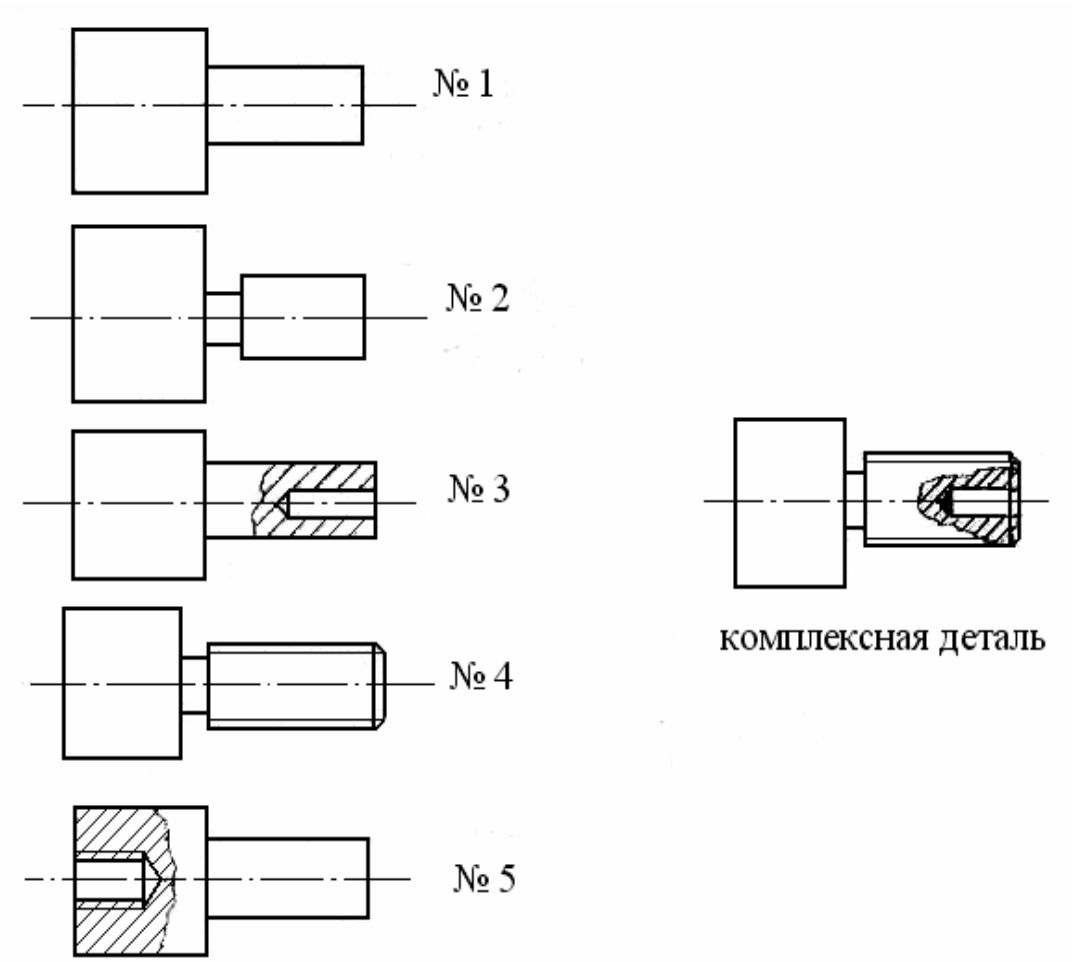



Рис. 6. Детали для групповой обработки

5. Для комплексной детали проектируются и изготавливаются необходимые приспособления и осуществляется наладка станка.

Например, обработка данной группы будет осуществляться натокарно-револьверном станке из прутка. В револьверной головке будут установлены все необходимые режущие инструменты. При обработке конкретной детали позиция с ненужным режущим инструментом пропускается.

Достоинствами групповой обработки является то, что в результате ее применения увеличивается размер партии, а следовательно, можно применить более прогрессивный технологический процесс, более совершенное оборудование, режущий и измерительный инструменты. Кроме рассмотренных путей увеличения серийности про-

грессивным направлением является широкое применение на заводах серийного производства станков с числовым программным управлением (ЧПУ) и станков «типа обрабатывающие центры».

Особенностью станков с ЧПУ является то, что они могут эффективно применяться при обработке небольших партий, так как остаются универсальными и в то же время работают по автоматическому циклу, по заранее разработанной программе.

# 3. КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОБРАБОТАННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Под качеством поверхностного слоя понимается состояние поверхностного слоя, получаемое в результате воздействия на него различных физических явлений, сопровождающих процесс резания, и режима резания.

Качество поверхностного слоя характеризуется шероховатостью, волнистостью и физико-механическими свойствами поверхностного слоя.

Шероховатость поверхности обуславливается наличием на поверхности гребешков и впадин с малым шагом на базовой длине.

Волнистость характеризуется совокупностью периодически повторяющихся возвышений и впадин со сравнительно большим шагом (превышающим базовую длину).

Физико-механические свойства поверхностного слоя характеризуются его твердостью, структурным и фазовым состоянием, знаком и величиной остаточных напряжений.

## *3.1. Влияние качества поверхностного слоя на эксплуатационные свойства детали*

Обеспечение необходимой работоспособности машин и длительное сохранение её во многом зависят от качества поверхностного слоя. Установлено, что основной причиной выхода из строя машин является износ рабочих поверхностей сопряженных деталей (около 80 %). Значительно реже наблюдаются поломки, возникающие либо за счет конструкторских ошибок (мала усталостная прочность), либо из-за некачественного изготовления.

Качество поверхностного слоя оказывает существенное влияние на такие эксплуатационные характеристики, как износостойкость трущихся соединений, характер посадок подвижных и неподвижных соединений, усталостная прочность деталей, коррозионная стойкость и др.

***Износостойкость***. Вследствие наличия на поверхности шероховатости и волнистости, фактическая поверхность контактирующих деталей уменьшается в значительной мере. Например, после чернового точения поверхность контакта составляет лишь 20 % от теоретической; после шлифования – 50 %; после суперфиниша – 80 – 90 %. Уменьшение поверхности контакта приводит к увеличение удельных нагрузок на контактирующих участках, смазка на этих участках продавливается и это приводит к их интенсивному износу при трении. Наибольший износ происходит в начальный момент трения, постепенно интенсивность износа уменьшается. Кривая износа во времени имеет вид, показанный на рис. 7.

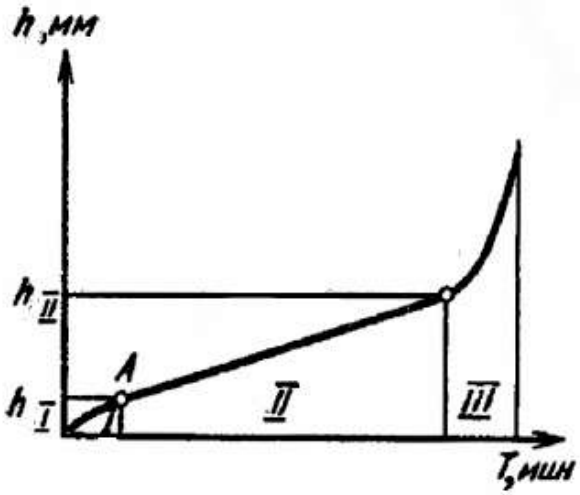



Рис. 7. Кривая износа поверхности во времени

На кривой можно выделить три участка: *I* – приработки, *II* – нормального износа, *III* – катастрофического износа. Шероховатость поверхности оказывает существенное влияние на износостойкость (рис. 8). Из рисунка видно, что существует оптимальное значение шероховатости, при которой износ минимален. С увеличением шероховатости (ветвь *1* – больше оптимального значения) износ возрастает в связи с уменьшением фактической поверхности контакта. При уменьшении шероховатости (ветвь *2* – меньше оптимального значения) износ возрастает в связи с тем, что при малой шероховатости смазка на трущихся поверхностях не удерживается, и возникает мо-

лекулярное схватывание трущихся поверхностей – износ возрастает. На первичный износ кроме высоты шероховатости оказывает влияние форма и направление шероховатости.

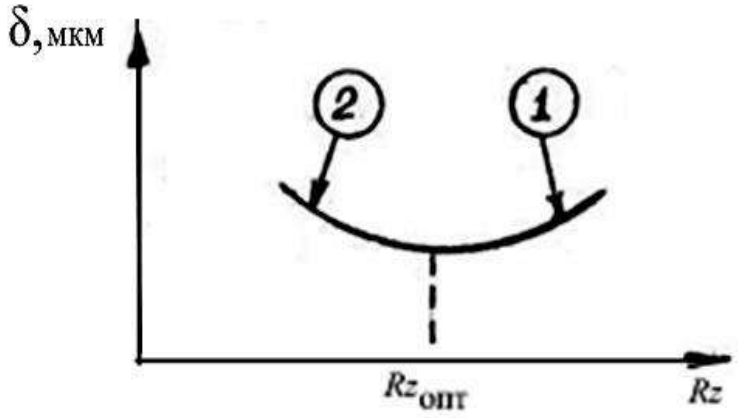



Рис. 8. Зависимость износостойкости поверхности от шероховатости

Влияние шероховатости на износ более заметно при сухом трении. Кроме шероховатости на износ оказывает влияние волнистость и наклеп. Наклеп увеличивает износостойкость.

*Характер посадок подвижных и неподвижных соединений*. Точность сопряжения, установленная чертежом, определяемая зазором или натягом, в значительной степени зависит от шероховатости сопрягаемых поверхностей.

Установлено, что в период приработки (см. рис. 7) высота шероховатости уменьшается на 50 – 70 % по сравнению с исходной. В связи с этим соединение в дальнейшем работает с другим зазором и вместо переходных посадок могут иметь место посадки с зазором.

Для обеспечения правильной работы соединения необходимо устанавливать шероховатость в зависимости от точности соединения.

Можно подсчитать величину шероховатости (*Rz*) в зависимости от допуска δ. Например, для диаметров более 50 мм, *Rz* = (0,10 … … 0,15) δ.

Прочность сопряжений с натягом во многом зависит от шероховатости поверхности. Установлено, что при запрессовке происходит срезание гребешков шероховатостей, их высота уменьшается на 40 – 50 % и, как следствие, натяг в соединении уменьшается на 15 – 25 %. Сказанное справедливо лишь для холодного прессования.

Усталостная прочность в значительной степени зависит от качества поверхностного слоя, наличия на поверхности детали, работаю-

щей в условиях циклических и знакопеременных нагрузок, отдельных дефектов поверхности. Наличие на поверхности дефектов способствует концентрации напряжений. В местах концентрации напряжений возникают вначале микротрещины, которые постоянно увеличиваются, превращаются в макротрещины, и, наконец, в этих участках происходит разрушение детали. Местами концентрации напряжений могут быть впадины шероховатости. Если принять предел выносливости детали, обработанной притиркой, за 100 %, то после шлифования он равен – 90 %, после чистового точения 50 – 80 %, а после грубого точения – 30 – 60 %.

На усталостную прочность существенное влияние оказывают остаточные напряжения. Наличие в поверхностном слое напряжений сжатия повышает предел выносливости, а наличие остаточных напряжений растяжения снижает его. Усталостная прочность, кроме того, повышается при наличии наклепа на поверхности.

***Коррозионная стойкость***. Детали с грубо обработанными поверхностями значительно быстрее подвергаются коррозии, так как при большой шероховатости фактическая поверхность контакта детали с коррозирующей средой увеличивается. Вещества, вызывающие коррозию, скапливаются на дне впадин шероховатости. Чем больше глубина впадин и меньше радиус округления, тем интенсивнее воздействие коррозии. Следовательно, с целью увеличения коррозионной стойкости следует уменьшать шероховатость. На коррозионную стойкость оказывает влияние наклеп. Установлено, что наклеп ускоряет коррозию. Это объясняется тем, что при пластической деформации в поверхностном слое возникают микроскопические неоднородности, способствующие образованию очагов коррозии, а эти очаги приводят к снижению усталостной прочности.

Однако, при определенных условиях создания наклепа (накатывание роликами) происходит завальцовывание путей проникновения коррозирующих веществ внутрь металла через дефекты поверхности.

В агрессивных средах при высокой температуре шероховатость и наклеп мало влияют на антикоррозионную стойкость.

Кроме рассмотренных основных эксплуатационных характеристик установлено, что аэро- и гидродинамические свойства поверхности зависят от шероховатости поверхности. От качества поверхности зависит контактная жесткость стыков сопрягаемых деталей. Шероховатость поверхности влияет на условия смазки и др.

Из рассмотренного следует, что качество поверхностного слоя

оказывает решающее влияние на эксплуатационные свойства. Задача технологии машиностроения состоит в том, чтобы научиться управлять качеством поверхностного слоя, т. е. при обработке резанием применять такие методы обработки и режимы резания, при которых будут создаваться требуемые параметры качества поверхностного слоя.

### *3.2. Факторы, влияющие на качество поверхностного слоя*

Качество поверхностного слоя детали, после обработки её резанием, зависит от многих факторов и может существенно изменяться в зависимости от сочетания этих факторов.

***Влияние геометрии режущего инструмента (возникновение шероховатости и волнистости)***

Углы в плане ($\varphi$, $\varphi_1$) оказывают наибольшее влияние на шероховатость поверхности. Остальные углы ($\alpha$ и $\gamma$) оказывают меньшее влияние на шероховатость.

Влияние геометрии режущего инструмента на процесс обработки рассмотрим на примере точения (рис. 9).

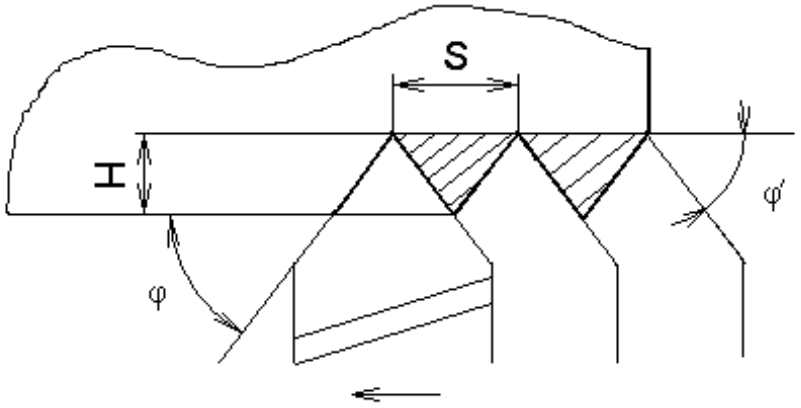



Рис. 9. Влияние геометрии режущего инструмента на шероховатость при точении

Процесс резания осуществляется при наличии двух движений: резания – $V$ и подачи – $S$ .

В результате наличия двух движений на поверхности детали остаются гребешки несрезанного металла высотой $H$, они и обуславливают появление шероховатости поверхности. Теоретически высоту гребешка шероховатости можно подсчитать по формуле, мм

$$H = \frac{S \cdot \sin\varphi \cdot \sin\varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)}.$$

***Влияние режима резания***

Глубина резания (*t*) существенного влияния на шероховатость не оказывает.

Подача (*S*). Влияние подачи видно из формулы. С увеличением подачи шероховатость возрастает.

Скорость резания (*V*). Влияние скорости резания на шероховатость проявляется через процесс наростообразования. Известно, что в процессе резания на передней поверхности резца, при определенных условиях, возникает нарост. Нарост обладает высокой твердостью и, следовательно, сам является режущей кромкой. Однако нарост имеет бесформенную, сильно развитую поверхность, следовательно, при резании таким инструментом будет получаться грубо обработанная поверхность. Влияние скорости на процесс наростообразования показано на рис. 10.

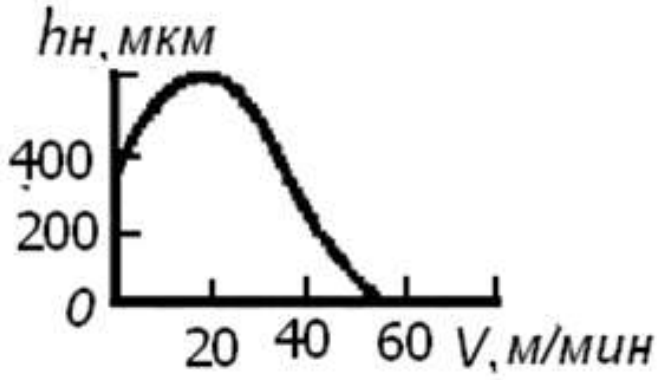



Рис. 10. Влияние скорости резания на шероховатость

Из рис. 10 следует, что для чистовой обработки следует обрабатывать поверхность с малыми скоростями (до 9 – 11 м/мин) или большими. Например, при тонком точении скорость резания будет: $V$ = 1000 м/мин.

***Влияние колебаний, возникающих при резании***

В процессе резания всегда возникают силы резания. Под действием радиальной составляющей силы резания – $P_y$ – режущая кромка периодически может отжиматься, так как сила резания не остается постоянной, а периодически изменяется. Отжатие режущей кромки приводит к образованию шероховатости или волнистости.

Если имеет место большая амплитуда и малая частота, то возникает волнистость.

Колебания, возникающие при резании, подразделяются на вынужденные и самовозбуждающиеся. Вынужденные колебания возникают от внешних возмущающих сил. Непосредственной причиной может быть, например, непостоянство припуска или неотбалансированность быстро вращающихся частей станка. Самовозбуждающиеся колебания возникают за счет изменения сил резания и сил трения в процессе стружкообразования.

Кроме рассмотренных причин на шероховатость поверхности оказывают влияние и другие факторы: материал обрабатываемой детали, применение смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ), качество заточки режущих инструментов и др.

### *3.3. Изменение физико-механических свойств поверхностного слоя*

В процессе резания всегда имеют место силы резания и тепловыделение. Под влиянием этих двух факторов может иметь место упрочнение поверхностного слоя или разупрочнение. Упрочнение поверхностного слоя характеризуется образованием наклепа и сжимающих напряжений. Разупрочнение характеризуется снижением твердости и образованием растягивающих остаточных напряжений.

Если в процессе резания имеют место значительные силы резания, то в поверхностном слое возникают пластические деформации, приводящие к образованию наклепа. При высокой температуре наклепа не образуется.

Остаточные напряжения возникают при резании, главным образом, за счет неравномерной пластической деформации по глубине сечения, неравномерного нагревания поверхностного слоя и неодинаковых фазовых и структурных превращений по глубине сечения.

Остаточные напряжения подразделяются на напряжения трех родов. Механиков в большей степени интересуют напряжения первого рода. Это такие напряжения, которые охватывают значительные объемы детали. Напряжения первого рода подразделяются на сжимающие и растягивающие. Первые из них повышают усталостную прочность, вторые – снижают. Следовательно, для повышения усталостной прочности следует строить технологический процесс таким

образом, чтобы в процессе обработки возникали пластические деформации. Однако если пластические деформации будут больше оптимальных значений, то в поверхностном слое возникает перенаклеп. Такой поверхностный слой имеет низкие эксплуатационные свойства.

### *3.4. Технологическая наследственность*

Ранее мы установили, что в процессе резания в поверхностном слое происходят существенные изменения. Поверхность детали, как правило, на протяжении технологического процесса подвергается различным технологическим операциям, например, точению, шлифованию и т. д. При этом каждый метод обработки вносит свои изменения в свойства поверхностного слоя.

Установлено, что окончательные свойства поверхностного слоя создаются не только на последней операции, они формируются на протяжении всего технологического процесса обработки данной поверхности. Изменение свойств изделий в процессе их изготовления и эксплуатации наилучшим образом объясняется явлением технологической наследственности.

*Технологической наследственностью* можно назвать явление переноса свойств объектов от предшествующих технологических операций к последующим. Сохранение этих свойств у деталей машин называют *технологическим наследованием*. Эти термины являются достаточно емкими и позволяют сравнительно полно связать состояние заготовки (или ее материала) с ее состоянием в любой момент времени, вплоть до превращения заготовки в деталь.

Носителями наследственной информации являются собственно материал детали, а также ее поверхности с многообразием параметров, характеризующих состояние этих поверхностей. Носители информации активно участвуют в ТП, проходя через различные операции, в ходе которых они могут менять свои свойства частично или полностью. Типичной операцией, задерживающей или исключающей передачу наследственных свойств, является термическая обработка.

Суть явления технологической наследственности рассмотрим на примере шлифования трех групп образцов, выполненных из подшипниковой стали. Образцы первой группы были предварительно проточены с большой подачей и имели $Ra$ = 20 мкм. Образцы второй группы были предварительно проточены с достижением $Ra$ = 5 мкм, а третьей группы предварительно прошлифованы с получением $Ra$ = 0,32 мкм. Эти три группы образцов были в одинаковых услови-

ях закалены, а затем прошлифованы с получением $Ra$ = 0,32 мкм. В итоге образцы трех групп получили одинаковые (в пределах допуска) размеры и одинаковую шероховатость. Однако эксплуатация этих образцов-деталей в контакте с другими деталями в одинаковых условиях и через одно и то же время показала совершенно различное состояние поверхностей. На поверхности деталей, входящих в первую группу, образовалось большое количество глубоких раковин, у деталей второй группы этих раковин было значительно меньше, а у деталей третьей группы раковины отсутствовали полностью. Следовательно, при, казалось бы, одинаковых качественных показателях (размеры и шероховатость) служебные свойства деталей оказались различными, так как проявились свойства, полученные до проведения термической обработки.

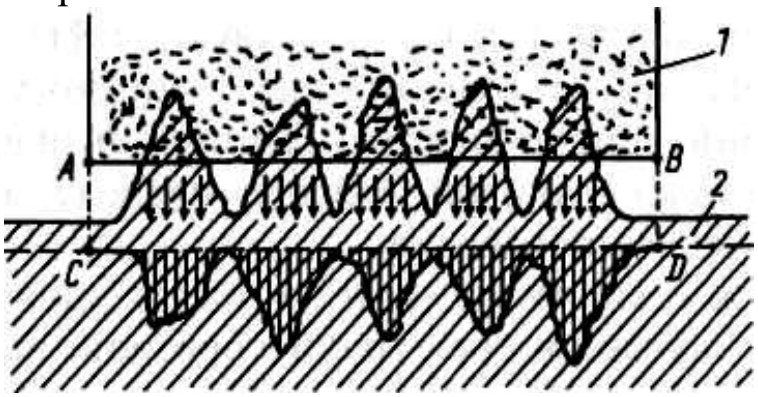



Рис. 11. Схема образования неоднородности поверхностного слоя при шлифовании

Этому явлению должно быть дано разъяснение, так как на его основе возможно управление качеством деталей машин. Шлифовальный круг *1* (см. рис. 11) своей цилиндрической поверхностью *AB* в первую очередь срезает микровыступы заготовки *2*. При этом возникает много локальных очагов теплового воздействия на поверхностный слой заготовки. Стрелками условно показано перемещение теплоты. Своеобразные тепловые удары создают в поверхностном слое зоны, в которых происходят фазовые превращения материала с изменением физико-механических характеристик (зоны условно заштрихованы вертикальными линиями), что объясняет возникновение раковин. В ходе шлифования инструмент займет положение *CD*, однако неравномерность свойств отдельных зон поверхностного слоя останется и будет проявляться у готовой детали тем больше, чем больше было значение шероховатости (*Ra*) у заготовки. Так свойства заготовок наследуются на готовых деталях. Если

установлена наследственная природа свойств деталей, можно принять соответствующие коррективы ТП для предотвращения наследственного переноса вредных свойств и, наоборот, создания благоприятных условий для передачи полезных свойств.

В ходе ТП наследуются практически все свойства материала и поверхностных слоев деталей. Важное значение имеет *технологическое наследование конструктивных форм.* Если, например, производить протягивание силой *P* отверстия у заготовки, показанной на рис. 12, *а,* то обязательно возникнет отклонение отверстия от цилиндричности, поскольку заготовка имеет в сечениях *1 – 1* и *2 – 2* различную жесткость. Сила, действующая со стороны протяжки на заготовку, вызывает в каждом поперечном сечении различные деформации, что приводит к отклонению образующей отверстия от прямолинейности, а поверхности отверстия от цилиндричности (рис. 12, *б*).

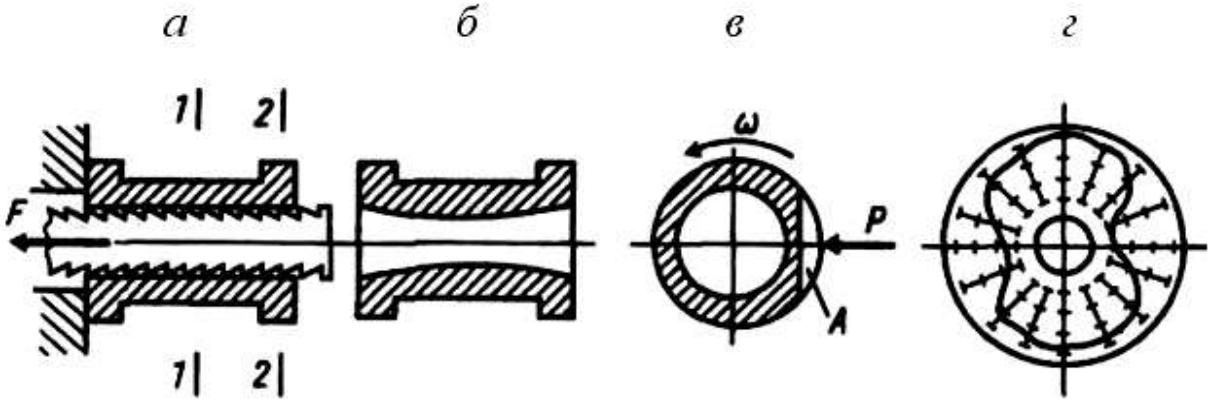



Рис. 12. Технологическое наследование конструктивных форм

Аналогично, под воздействием силы *P* при шлифовании на вращающуюся с определенной скоростью заготовку (рис. 12, *в*), имеющую на некоторой длине конструктивный элемент *А,* на детали возникают характерные отклонения формы. Это объясняется переменной жесткостью детали по углу поворота. Сила *P* возникает в процессе шлифования, точения и т. д. Отклонения формы наружной поверхности в рассмотренном случае всегда будут иметь вид, показанный на рис. 12, *г.* Другие конструктивные элементы обрабатываемой заготовки вызовут другие отклонения формы (отклонения от круглости). Эти отклонения будут зависеть от конфигурации, элементов детали, свойств обрабатываемых материалов, значений силовых факторов. Чаще всего такие отклонения определяют расчетом. Поэтому еще до изготовления деталей можно прогнозировать

отклонения их формы.

*Технологическое наследование технологических баз* рассмотрим на примере шлифования заготовок, установленных на центрах. Шлифование производится широким кругом. На заготовку действует сила *P* (рис. 13, *а*). Технологическими базами являются конические поверхности *B* центровых отверстий. В связи с особенностями изготовления центровых отверстий на их поверхностях возникает волнистость. Чаще всего наблюдают две, три или пять волн, что условно показано на рис. 13, *б*. При невращающихся центрах и постоянном направлении силы *P* жесткость системы "заготовка – центры" оказывается переменной. Поэтому и упругое перемещение заготовки

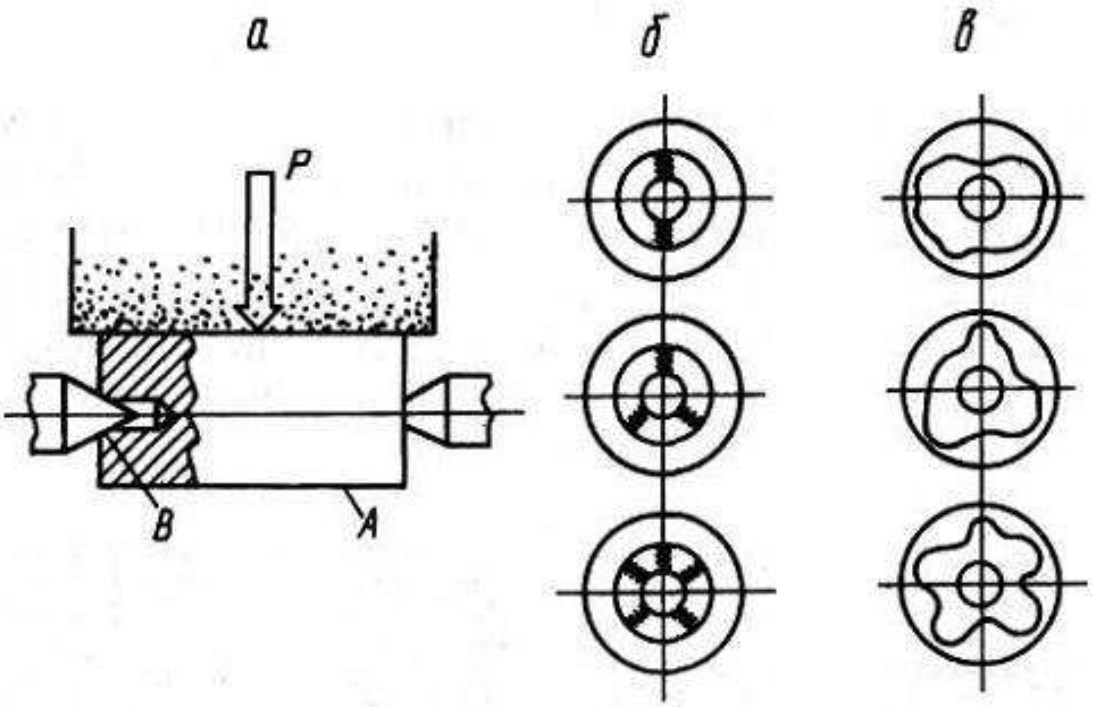
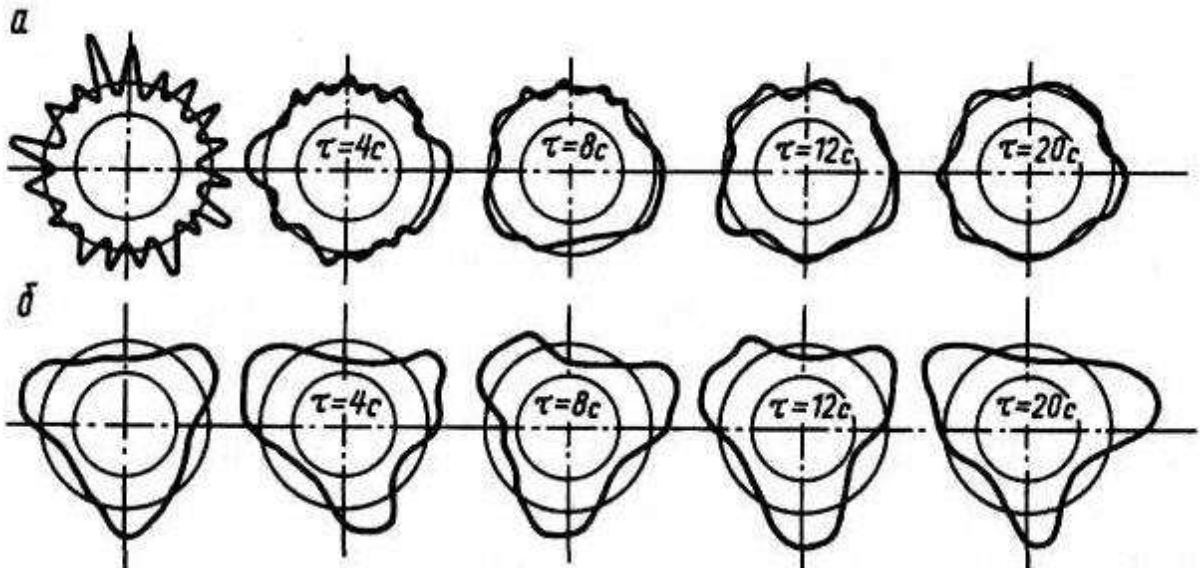



Рис. 13. Технологическое наследование технологических баз

также будет переменным. На обрабатываемой поверхности *A* возникают отклонения формы, показанные на рис. 13, *в*. Число выступов и впадин на поверхности *A* точно соответствует числу волн на технологических базах. Так погрешности технологических баз переносятся (наследуются) на обрабатываемую поверхность. Если производить не врезное, а круглое шлифование или установить на центры заготовку с различным числом волн на центровых отверстиях, процесс наследования окажется более сложным.

Зажимные устройства для закрепления заготовок на металлорежущих станках активно участвуют в ходе технологического насле-

дования. В этом можно убедиться, анализируя круглограммы рис. 14. Отклонение формы растачиваемого отверстия и характер самой погрешности вполне соответствует числу зажимных элементов (кулач-




ков) зажимного патрона. При использовании патронов с двумя кулачками на отверстии возникнет овал, а при использовании четырех кулачков – четыре явно выраженные волны на отверстии детали и т. д.

Рис. 14. Круглограммы, снятые с детали после суперфиниширования

В ходе механической обработки резанием наследуются многие свойства заготовок. Отклонения размеров могут быть учтены при настройке режущих инструментов. Отклонения же формы наследственного характера или погрешности расположения устраняются с

трудом. Часто отклонения от круглости в виде овальности полностью переносятся на готовое изделие. При низкой жесткости системы проявляется частный случай наследования – копирование.

Решение проблемы технологического наследования всегда связано с отысканием таких условий, при соблюдении которых не возникает наследственного переноса вредных свойств от предшествующих операций к последующим. Обратимся для примера к процессу суперфиниширования. После бесцентрового шлифования заготовок на их наружной поверхности возникло 18 выступов (рис. 14, *а,* левая круглограмма). Для удаления такой погрешности формы и достижения заданной шероховатости заготовки подвергали суперфинишированию тремя абразивами. Постоянно отклонение формы

уменьшалось, что можно наблюдать по круглограммам, снятым с заготовок через каждые 4 с. Через 20 с со станка снимают качественные детали. Однако, если заготовки имеют после предварительной обработки три выступа (рис. 14, *б,* левая круглограмма), то при тех же условиях проведения процесса суперфиниширования погрешность формы увеличивается, что можно видеть из анализа круглограмм. Чтобы не возникало ухудшения формы и были ликвидированы наследственные погрешности, полученные на предшествующей операции, необходимо использовать строгие математические зависимости, полученные на основе закономерностей технологического наследования. Такой подход к решению проблемы является общим.

Важно установить не только качественные, но и количественные характеристики технологического наследования. Именно количественные характеристики позволяют определить, насколько велико влияние технологического наследования данного свойства на надежность работы детали в машине. Проще всего для этого использовать коэффициенты $k$ технологического наследования, представляющие собой простые дроби, у которых числитель указывает на количественное выражение величины, отражающей определенное свойство до проведения операции, а знаменатель – количественное ее выражение после проведения операции. Например, значение $k_1$ – 60/20 = 3 означает, что отклонение от круглости составляло до проведения операции 60 мкм, а после ее проведения – 20 мкм. Если установлен сам факт технологического наследования, можно связывать любые операции и любые свойства ТП. Отнесем значение $k_2$ к наследованию напряжений в поверхностных слоях. Допустим $k_2$ = 4,2. Это может означать, что наследственные напряжения у заготовки были в 4,2 выше, чем у готовой детали. Принадлежность коэффициента к определенному свойству оговаривается специальной методикой.

Любое свойство $x_i$ детали может быть определено как $x_i = (1/k)x_{i-1}$, где $i$ – номер технологической операции или технологического перехода.

Весь процесс технологического наследования может быть представлен с помощью системы уравнений, что облегчает анализ и управление явлениями переноса полезных свойств или пресечение передачи вредных свойств.

Вопрос о необходимости учета явления технологического на-

следования решают в каждом конкретном случае отдельно. Если значение наследуемого свойства мало и его влияние на характеристики детали или машины оказывается весьма слабым, то явление технологического наследования рассматривать не следует. В другом случае, наоборот, это влияние становится сильным, наследуемое свойство оказывает решающее действие на показатели качества. Тогда оно должно быть учтено на основе анализа всего технологического процесса от получения материала до готовой машины и даже процесса ее эксплуатации.

### *3.5. Методы оценки качества поверхностного слоя*

*Шероховатость поверхности*. Для оценки шероховатости используются два метода: качественный и количественный.

Качественный метод основан на сравнении поверхности с образцом или эталоном. Сравнение может осуществляться визуально – путем ощупывания рукой или с помощью микроскопов сравнения (МС-49).

Количественный метод основан на измерении высоты гребешков шероховатости. Измерение осуществляется либо с помощью оптических приборов, либо путем ощупывания поверхности алмазной иглой. Измерение шероховатости путем ощупывания осуществляется на приборах профилометрах (например TR-100) и профилографах. Первые показывают значение шероховатости (*Ra*), вторые дают запись шероховатости поверхности в виде профилограммы.

Существует приборы профилометры-профилографы. Каждый из приборов имеет свою область применения (диапазон измеряемой шероховатости).

Наклеп поверхностного слоя оценивается по изменению микротвердости. Микротвердость определяется на приборах ПМТ-3.

Остаточные напряжения определяются либо методом рентгеноструктурного анализа, либо механическими методами, основанными на методике акад. Давиденкова Н. Н.

Структура поверхностного слоя определяется на металлографических микроскопах.

# 4. БАЗЫ И БАЗИРОВАНИЕ

Для правильной работы машины необходимо обеспечить определенное взаимное расположение ее деталей и узлов.

При обработке заготовки должны быть правильно ориентированы относительно станка и режущего инструмента. Задача взаимного ориентирования решается базированием. Под базированием понимается придание заготовке требуемого положения относительно выбранной системы координат (придание заготовке определенного положений относительно элементов станка).

У заготовки различают обрабатываемые поверхности, поверхности, которые ориентируют заготовку при обработке, поверхности, от которых производят измерения и др.

Базирование следует учитывать как при разработке конструкции (проектировании), так и при обработке и сборке.

В связи с этим *базы подразделяют на конструкторские, сборочные и технологические.*

*Конструкторские базы* – поверхности, линии, оси, определяющие положение детали относительно других деталей на чертеже. Конструкторские базы, как правило, получаются в результате расчета размерных цепей. От конструкторских баз на чертежах, обычно, проставляют размеры.

*Сборочные базы* – поверхности, определяющие положение детали относительно других при сборке.

*Технологические базы*. Технологические базы подразделяется на установочные и измерительные.

*Установочные базы* – поверхности, служащие для установки детали на станке при обработке.

*Измерительные базы* – поверхности, от которых производится отсчет размеров при измерении.

Установочные базы подразделяется на черновые, чистовые и промежуточные.

### *4.1. Основные принципы выбора баз*

Схема простановки размеров на чертеже уже предопределяет собой выбор баз и последовательность обработки, а иногда и возможность обработки детали.

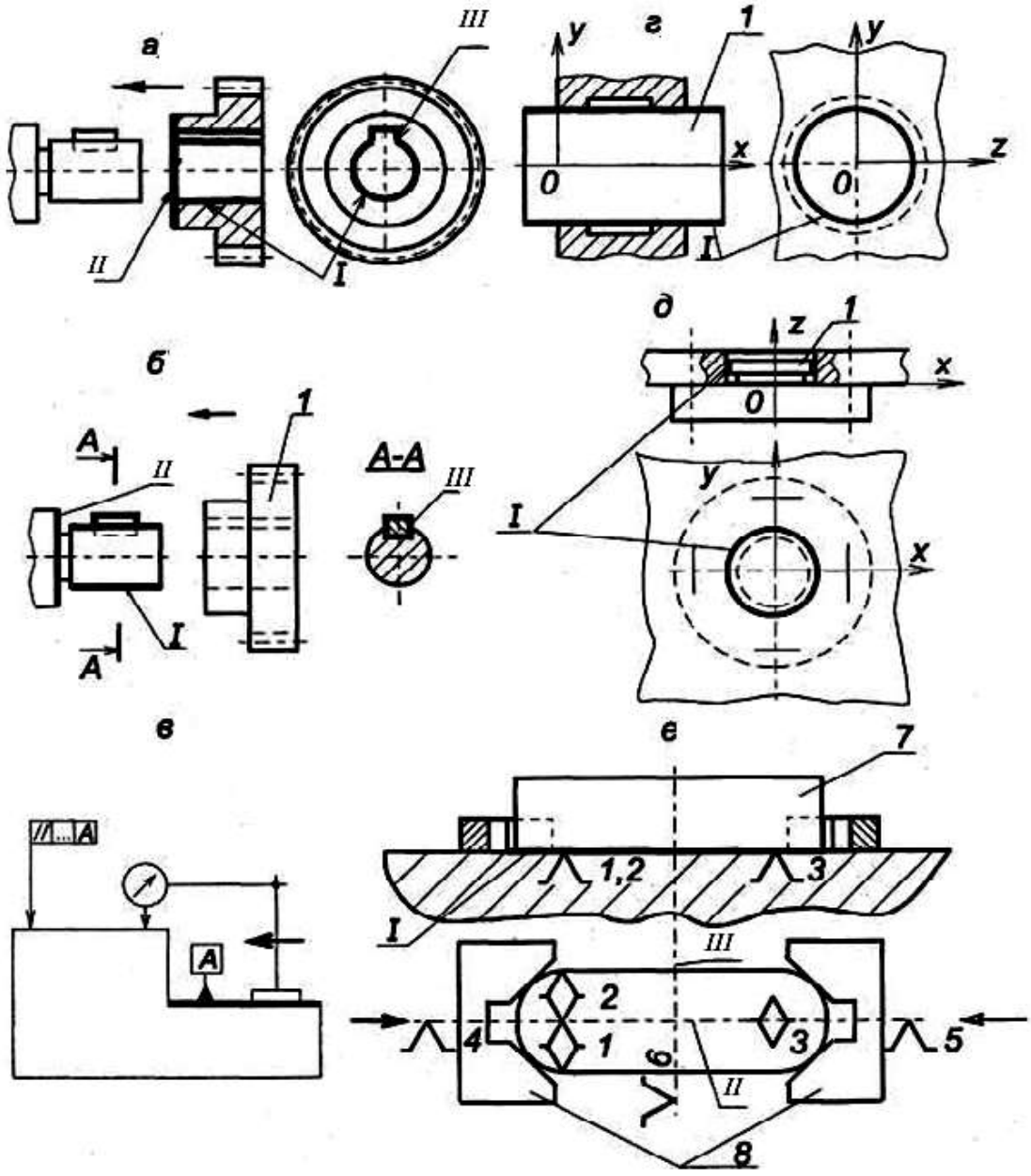



Рис. 15. Виды баз:
*а* – основные базы шестерни (*I, II, III*); *б* – вспомогательные базы вала *(I, II, III)* с присоединяемой деталью (*1*); *в* – измерительная база (А); *г* – двойная направляющая база (*I*) детали (1); *д* – двойная опорная база (*I*) детали (*1*); *е* – установочная явная база (*I*) заготовки (*7*), направляющая скрытая база (*II*), опорная скрытая база (*III*), *1 ... 6* – опорные точки; *8* – губки самоцентрирующих тисков

Выбор технологических баз – ответственный этап разработки

технологического процесса. Неправильный выбор баз приводит к усложнению конструкции приспособлений, появлению брака и др.

Как правило, обработку детали начинают с той поверхности, которая будет служить установочной базой. При выборе установочной базы следует руководствоваться двумя главными принципами базирования: принципом постоянства баз и принципом совмещения баз.

Принцип постоянства состоит в том, что для выполнения всех операций обработки (или основных) используется одна и та же поверхность детали в качестве установочной базы. При смене баз точность обработки снижается.

Необходимость смены баз вызывается невозможностью обработки всех поверхностей с одной установки или использованием нескольких различных станков.

Принцип совмещения баз состоит в том, что в качестве технологических баз желательно использовать конструкторские базы – что не всегда возможно. Для повышения точности обработки следует стремиться к совмещению установочной и измерительной баз. Несовмещение этих баз влечет за собой появление погрешности базирования. Рассмотрим это на примере обработки поверхности *1* детали, изображенной на рис. 16.

Обрабатывается поверхность *1*. Обработка ведется на горизонтально-фрезерном станке дисковой трехсторонней фрезой. При обработке деталь устанавливается на поверхность *2*. Обрабатывается партия деталей в десять штук. Станок настраивается на обработку этой партии.

Возможность получения размера $20^{+0,1}$ в допуске зависит от погрешности исполнения размера $40_{-0,5}$.

Рассмотрим размерную цепь. Найдем замыкающее звено данной цепи. Замыкающим звеном является звено $A_2$ (см.рис. 16).

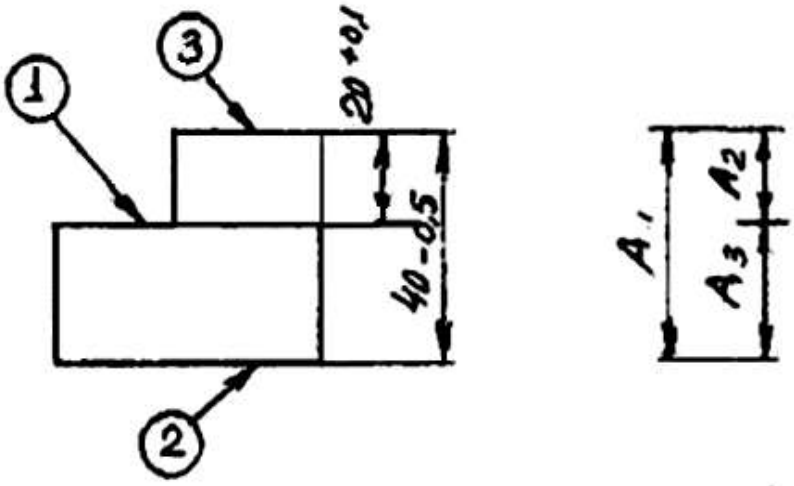



Рис. 16. Размерная цепь

Основное правило размерной цепи говорит, что допуск замыкающего звена равен алгебраической сумме допусков составляющих звеньев: $\delta A_2 = \delta A_1 + \delta A_2$.

Подставив в это выражение значения допусков из рис. 16, получим: $0{,}1 = 0{,}5 + \ldots$

Допуск звена $A_3$ нам не известен, он зависит от многих факторов. Например, точности наладки, погрешности установок и др. Однако уже видно, что равенство нарушается. Следовательно, обработка при данной настройке и при несовмещении баз приводит к появлению погрешности при обработке.

### *4.2. Правило шести точек при базировании*

Известно, что каждое твердое тело в пространстве имеет шесть степеней свободы. Правило шести точек гласит: для того, чтобы лишить тело всех степеней свободы, т. е. придать ему определенное положение относительно режущего инструмента, необходимо и достаточно иметь шесть опорных точек. При этом каждая опорная точка лишает тело одной степени свободы. Применять более шести опорных точек, нецелесообразно, так как в этом случае создается неопределенное положение детали из-за отсутствия контакта детали со всеми опорами. Иногда при таком базировании установка детали в приспособлении невозможна. В некоторых случаях нет необходимости лишать тело всех шести степеней свободы.

Схема базирования, т. е. характер расположения опорных точек, зависит от формы поверхности обрабатываемой детали. Наиболее распространенными схемами базирования являются: базирование призматических тел и тел вращения.

Схема базирования призматического тела приведена на рис. 17.

Точки *1*, *2* и *3*, находящиеся в плоскости *XOY*, лишают тело трех степеней свободы. Точки *4* и *5*, находящиеся в плоскости *Y0Z* лишают тело двух степеней свободы. Точка 6 лишает тело одной степени свободы.

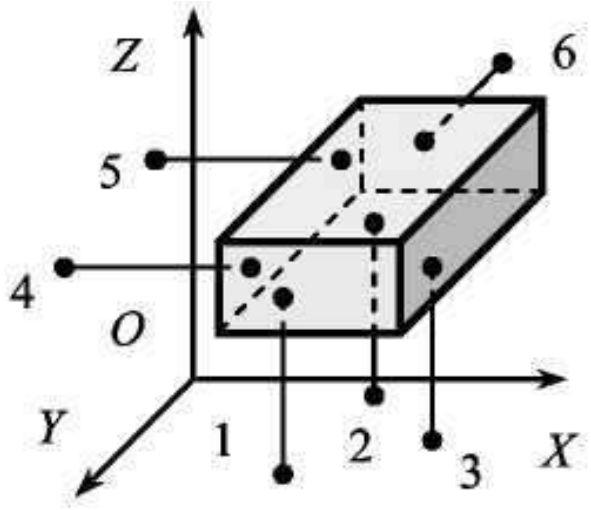



Рис. 17. Схема базирования призматического тела

## 5. ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ

Эксплуатационная надежность машин в значительной степени зависит от точности изготовления отдельных деталей и сборки. Повышение точности изготовления деталей приводит к увеличению долговечности и надежности машин. Этим и объясняется непрерывное ужесточение требований к точности изготовления деталей. Но изготовить детали абсолютно точно невозможно, так как при их обработке всегда возникают погрешности.

Под точностью реальной детали понимается степень соответствия ее чертежу. Точность детали характеризуется точностью размеров, формы и взаимного расположения поверхностей.

Заданную точность обработки можно достигнуть двумя различ-

ными методами: методом пробных ходов и промеров и методом автоматического получения размеров на настроенных станках.

При методе пробных ходов и промеров заготовки на станок устанавливаются с выверкой. Необходимая точность достигается путем последовательного снятия стружек пробными ходами, каждый ход сопровождается измерениями. После каждого измерения вносят поправку (по лимбу станка) в положение инструмента относительно детали.

При методе автоматического получения размеров заготовки без выверки устанавливаются на станке в приспособлении на заранее выбранные базовые поверхности. Обработка ведется, как правило, за один рабочий ход.

Однако какой бы метод достижения точности не применялся, при обработке резанием всегда появляются погрешности.

### *5.1.Факторы, влияющие на точность обработки*

Причин появления погрешностей много. Все причины можно разбить на две группы. В первой группе погрешности не зависят от нагрузки, возникающей при резании. Во второй группе погрешности зависят от нагрузки, возникающей при резании.

Погрешности, возникающие в результате различных причин, подразделяются на систематические и случайные.

**Погрешности, не зависящие от нагрузки,** вызываются:

1. Недостаточной точностью станков, приспособлений режущих инструментов и их износом.
2. Погрешностями измерения деталей.
3. Погрешностями, выбранной теоретической схемы обработки.
4. Погрешностями базирования.
5. Погрешностями настройки станка.

**Погрешности, зависящие от нагрузки,** вызываются:

1. Деформациями упругой системы «станок-приспособление-инструмент-деталь» (СПИД).
2. Размерным износом инструмента.
3. Тепловыми деформациями системы СПИД.
4. Деформациями детали, возникающими в результате перераспределения внутренних напряжений.

*Деформации упругой системы* СПИД. Технологическая система СПИД представляет собой упругую систему, деформации которой обуславливают появление погрешностей при обработке. Величина деформации тем больше, чем больше силы резания и чем меньше жесткость системы СПИД.

Под жесткостью системы СПИД понимается способность системы оказывать сопротивление действию внешних сил, стремящихся её деформировать. Жесткость системы определяется отношением радиальной составляющей силы резания – $P_y$ к смещению режущей кромки инструмента в направлении действия этой силы (рис. 18)

$$j = \frac{P_y}{y}.$$

Сила резания ($P_y$) вызывает упругие деформации в системе СПИД, а также смещение отдельных элементов системы за счет наличия зазоров.

Колебание глубины резания, непостоянство твердости обрабатываемого материала, затупление инструмента приводят к колебанию силы резания, а следовательно, к появлению различных по величине отжатий режущей кромки инструмента. Непостоянство отжатий режущей кромки приводит к колебанию размеров, т. е. появлению погрешности обработки – погрешности размера или погрешности формы детали.

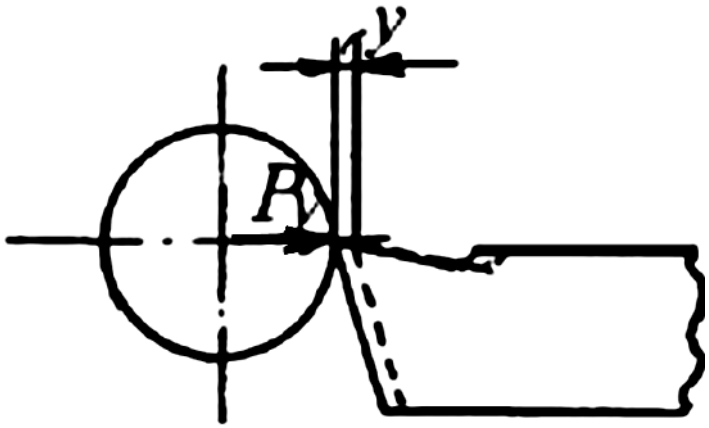



Рис. 18. Схема смещения режущей кромки инструмента в направлении действия радиальной силы $P_y$

***Размерный износ инструмента***. Любой инструмент в процессе резания изнашивается. Износ инструмента приводит к изменению размера. Размерный износ следует учитывать при обработке партии деталей на настроенных станках, либо при обработке протяженных

деталей. Из параметров режима резания на износ наибольшее влияние оказывает скорость резания.

***Тепловые деформации системы СПИД***. Причинами возникновения тепловых деформаций являются: теплота, образующаяся в зоне резания, теплота, образующаяся при трении подвижных частей станка, теплота от внешних источников. Значительное количество тепла, выделившегося в зоне резания, передается стружке (до 70 %). Остальная часть тепла передается инструменту и детали. Нагревание их приводит к изменению размеров детали и инструмента и появлению погрешности при обработке.

Теплота, выделившаяся при трении подвижных частей, приводит к неравномерному нагреванию отдельных частей станка. Например, разность температур на стенках передней бабки доходит до 50 $^0$С, а это приводит к смещению оси шпинделя станка и, как следствие, к появлению погрешности обработки.

Влияние тепловых деформаций следует учитывать при точности обработки 7 – 9 квалитетов и более высокой точности.

***Деформации детали в результате перераспределения внутренних напряжений***. Остаточные напряжения возникают в заготовках, полученных литьем, ковкой, сваркой и при обработке резанием. Наибольшие напряжения появляются в деталях сложной формы. Остаточные напряжения возникают вследствие неравномерного остывания отдельных поверхностей заготовки. При обработке резанием после снятия стружки в заготовках происходит перераспределение напряжений, а это приводит к деформации детали, т. е. появлению погрешности обработки.

## *5.2. Определение погрешностей обработки*

В предыдущем разделе мы установили, какие факторы приводят к появлению погрешности при обработке. Одни из них действуют постоянно при обработке всей партии деталей. К ним относятся, например, недостаточная точность станка, приспособления и др. Другие приводят к появлению закономерно изменяющейся погрешности, например, износ режущего инструмента, тепловые деформации системы СПИД. Третьи имеют случайный характер, например, непостоянство силы $P_y$, погрешность закрепления и др.

В результате возникновения случайных погрешностей действительные размеры деталей могут принимать любые значения в грани-

цах определенного материала.

Ожидаемая точность обработки может быть определена *статистическим или расчетно-аналитическим методом.*

*Статистический метод* основан на использовании законов теории вероятности и математической статистики. Этот метод применяется при обработке большого количества деталей (не менее 50 шт.) способом автоматического получения размеров на настроенных станках. В результате возникновения случайных погрешностей происходит рассеивание размеров. Характер рассеивания размеров наиболее наглядно выявляется путем построения кривых распределения размеров и точечных диаграмм. Построение кривых производится на основании обмера партии деталей.

Рассеивание действительных размеров подчиняется различным математическим законам. В технологии машиностроения наибольшее применение имеют законы нормального распределения размеров (закон Гаусса), равной вероятности и др., а также имеет место сочетание различных законов.

Закону нормального распределения размеров подчиняются погрешности размеров, погрешности массы деталей, погрешности твердости и погрешности шероховатости.

Закон имеет место тогда, когда исследуемая величина зависит от воздействия большого количества различных факторов, причем интенсивность воздействия их примерно одинакова.

Кривая, характеризующая закон нормального распределения, представляет собой кривую Гаусса (рис. 19).

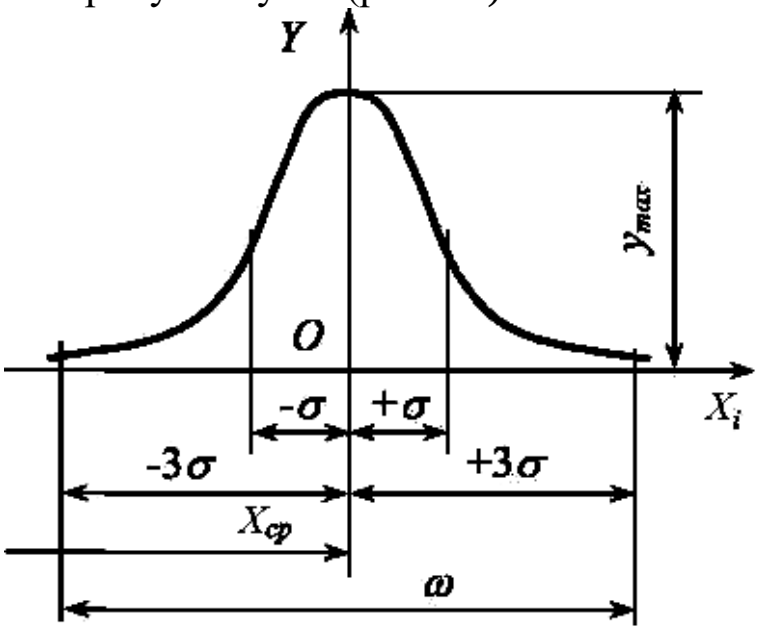



Рис. 19. Кривая нормального распределения размеров

Характеристиками кривой являются мера положения и мера рассеивания. Мера положения характеризует положение центра группирования размеров. В качестве меры положения применяется среднее арифметическое значение

$$\overline{X} = \frac{\sum_{1}^{n} x_i}{n}.$$

Мера рассеивания является числовой характеристикой рассеивания. В качестве меры рассеивания применяется среднее квадратическое отклонение – σ.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{n} (x_i - \overline{x}) m_i}{n}}.$$

В формулах $x_i$ – текущее измерение, $n$ – количество измерений, $m_i$ – количество деталей в каждой группе.

Закон равной вероятности имеет место тогда, когда рассеивание размеров зависит от одного доминирующего фактора. Например, этому закону подчиняется изменение размеров в случае влияния на точности размерного износа инструмента. Износ инструмента (при установившемся износе) подчиняется закону прямой линии (рис. 20, *а*) – это приводит к увеличению размера вала. Изменение размеров обрабатываемых деталей происходит по закону прямой линии (рис. 20, *б*).

*а* *б*

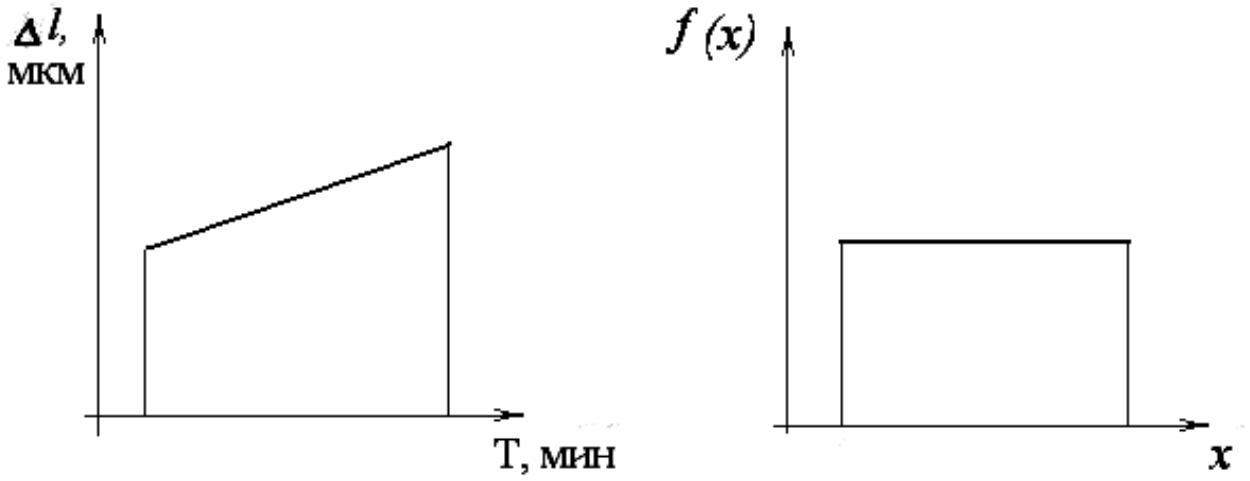



Рис. 20. Закон равной вероятности:

*а* – износ инструмента; *б* – изменение размеров обрабатываемых деталей

Закон равной вероятности имеет место для случая распределения размеров деталей, обработанных по 5–6 квалитетам, и при обработке деталей методом пробных ходов и промеров.

Определение точности обработки сводится к сопоставлению фактического рассеивания размеров с допуском на размер. Пользуясь кривой распределения размеров, можно найти вероятное количество годных деталей (рис. 21). При практическом использовании кривых нормального распределения размеров принимают поле рассеивания, равное ± 3σ . Если допуск на изготовление деталей δ равен ± 3σ, годными будут получаться 99,73 % обработанных деталей. Если допуски меньше ± 3σ – возможен брак деталей.

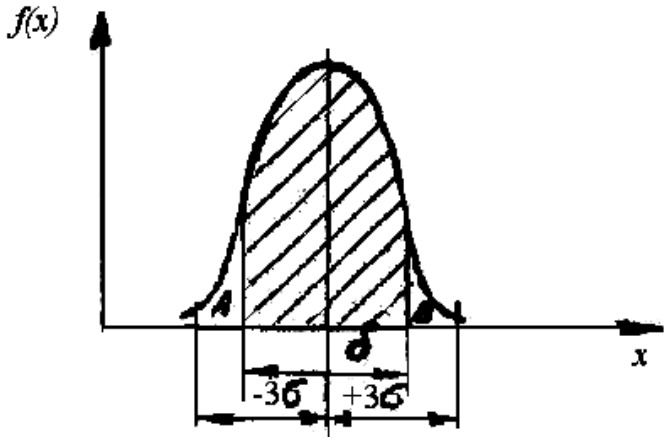



Рис. 21. Кривая фактического рассеивания размеров

Количество забракованных деталей выражается графически отношением площади *f* (заштрихованного участка) к площади *F* (всей кривой рассеяния). В математической статистике имеются формулы, по которым, зная δ, σ, и $\bar{x}$, можно подсчитать процент брака.

На практике могут получаться различные кривые фактического рассеивания размеров (рис. 22).

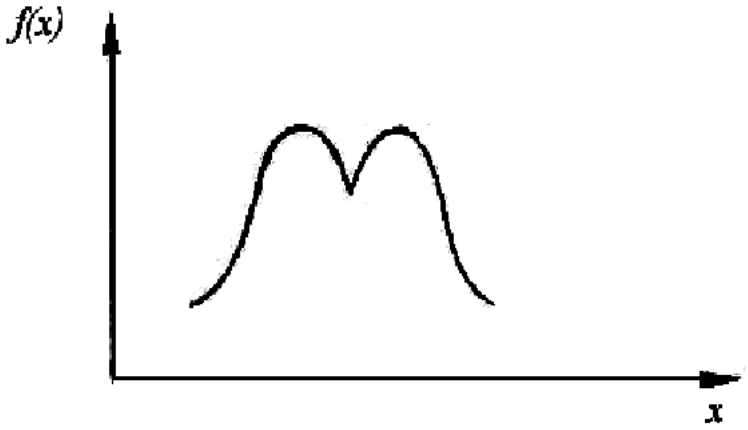



Рис. 22. Форма кривой фактического рассеивания размеров

Используя кривые распределения можно подсчитать процент брака, т. е. установить пригодность процесса. Но с помощью кривых невозможно установить момент появления брака и своевременно вмешаться в процесс с целью его корректирования. С целью компенсации этого недостатка  используют точечные диаграммы.

Для построения точечных диаграмм по оси абсцисс откладывают меру обрабатываемых деталей. По оси ординат – размеры деталей (рис. 23).

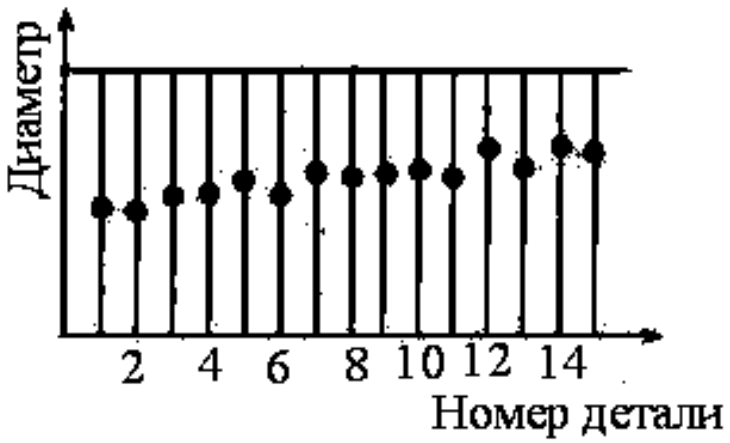



Рис. 23. Точечная диаграмма

При большом количестве деталей для уменьшения длины диаграммы детали разбиваются на группы. В группу включается по несколько деталей, обработанных последовательно друг за другом.

На диаграмме проводят две линии *А* и *Б*, соответствующие нижнему и верхнему предельным отклонениям, таким образом они ограничивают поле допуска – δ. На диаграмме отмечают размеры каждой детали. Если по диаграмме видно, что размеры деталей подходят

близко к линии предельного отклонения, то следует прекратить обработку и осуществить подналадку станка.

*Расчетно-аналитический метод.* В основе метода исследования точности лежит анализ отдельных причин, приводящих к возникновению погрешности обработки, а затем суммирование отдельных погрешностей. Метод этот очень трудоемкий, применяется значительно реже, чем статистический.

# 6. ПРИПУСКИ НА ОБРАБОТКУ

## *6.1. Определение и основные понятия*

Необходимая точность и качество поверхностного слоя достигается путем последовательного удаления слоя металла с заготовки в процессе обработки резанием. Слой металла, который удаляется с заготовки в процессе резания, называется **припуском**.

Величина припуска зависит от вида применяемой заготовки.

В машиностроении применяют следующие виды заготовок:

1. Отливки из чугуна, стали, цветных металлов и пластмасс.
2. Поковки и штамповки.
3. Прокат горячекатаный и холоднокатаный.

Выбор вида заготовки зависит от конструктивных форм детали, их назначения, условий работы и др.

Для каждого вида заготовок характерен свой средний отход металла в стружку, так для отливок и проката это до 15 %, поковок до 40 %, штамповок до 10 %.

Правильное решение о выборе вида заготовки можно сделать на основании технико-экономических расчетов. Увеличенные припуски повышают себестоимость обработки, недостаточные припуски также приводят к увеличению себестоимости. В связи с этим различают *оптимальные припуски*. Под оптимальным припуском понимается та-

кой припуск, который обеспечивает необходимую точность и качество поверхности при минимальной себестоимости.

Припуски подразделяют на *общие и межоперационные*. Под межоперационным припуском понимается слой металла, удаляемый с поверхности при выполнении конкретной операции. Под общим понимается слой металла, удаляемый с поверхности на протяжении всего технологического процесса обработки данной поверхности.

Задаются припуски в миллиметрах и измеряются в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности.

По характеру расположения припуски подразделяют на *симметричные, асимметричные и односторонние*.

Величина припуска в данной операции зависит от точности изготовления заготовки на предшествующей операции (рис. 24).

На рис. 24 $A_{i\max}$ и $A_{i\min}$ – максимальный и минимальный размеры на $i$-ой операции, и, соответственно, $T_i$ – допуск на размер на $i$-ой

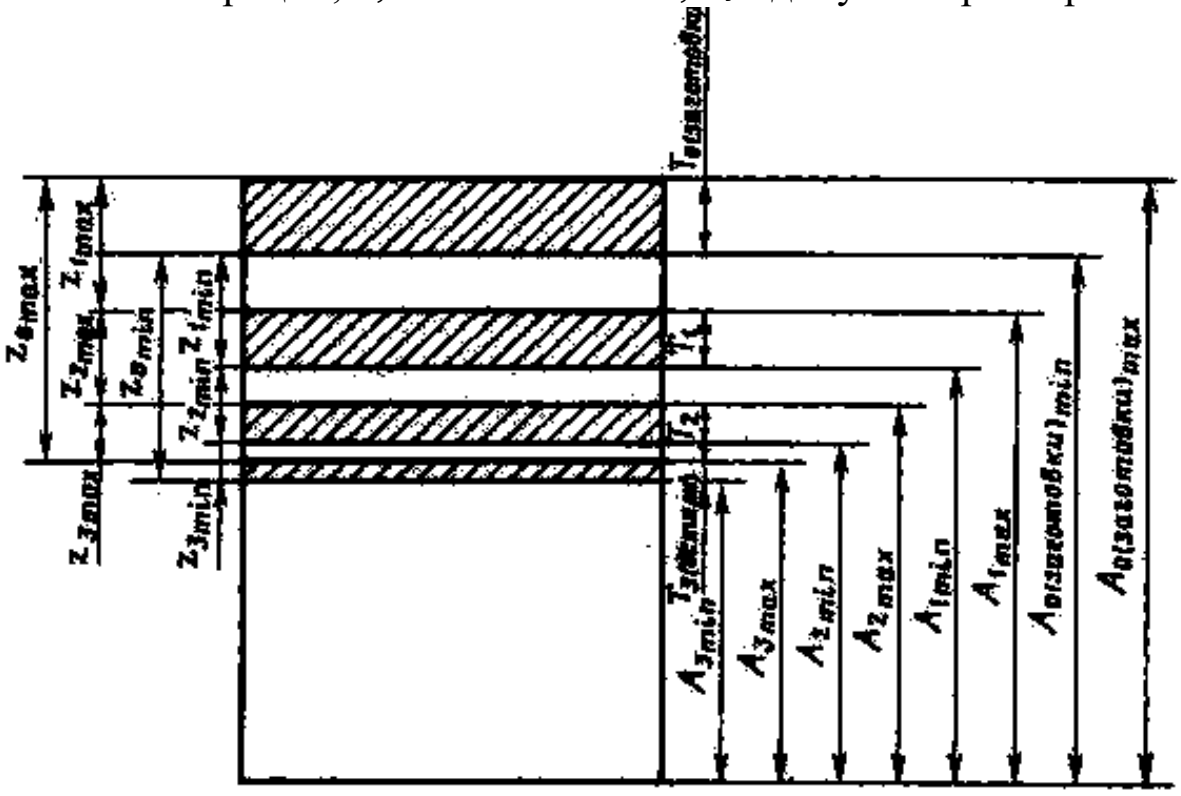


Рис. 24. Исходная схема для расчета общего припуска и промежуточных размеров

операции, $Z_{\max}$ и $Z_{\min}$ – максимальный и минимальный припуски на $i$-ой операции.

В случае обработки на настроенных станках

$$Z_{1\max} = A_{1\max} - A_{2\max}; \qquad Z_{1\mathrm{mix}} = A_{1\mathrm{mix}} - A_{2\mathrm{mix}}.$$

Из схемы видно, что величина припуска на данной операции зависит от точности выполнения предшествующей операции. Поэтому различают минимальные и максимальные припуски. При расчете припуска обычно определяют $Z_{min}$ .

### *6.2. Факторы, влияющие на величину припуска*

Величина припуска на обработку зависит от многих факторов. К основным факторам надо отнести: материал заготовки; формы и размеры заготовок; вид заготовки и способ ее изготовления; точность и качество обрабатываемых поверхностей; технические условия на изготовление детали.

*Материал заготовок*. Почти при всех способах получения заготовок на их поверхностях образуется дефектный слой в виде твердой корки, окалины, трещин, пузырей и т. д. При одном и том же способе получения заготовок величина дефектного слоя будет зависеть от материала заготовок.

Для литых заготовок из чугуна толщина твердой корки бывает от 1 до 2 мм, а из стали – от 1 до 3 мм. Толщина обезуглероженного слоя у штамповок из легированной стали до 0,5 мм, а из углеродистых – 0,5 – 1,0 мм.

Чтобы обеспечить нормальную обрабатываемость заготовок, необходимо, чтобы глубина резания была больше величины дефектного слоя.

Следовательно, величина дефектного слоя должна быть частью припуска.

*Формы и размеры заготовок* тоже оказывают влияние на величину припуска. Чем сложнее форма, тем больше должна быть величина припуска.

При свободной ковке увеличивают припуск для упрощения формы заготовки; при штамповке – для улучшения течения металла; при литье делают плавные переходы от тонких стенок к толстым для равномерного остывания металла и т. д.

*Вид заготовок и способы их изготовления*. Литые заготовки могут быть получены различной точности. Самые неточные литые заготовки бывают при ручной формовке, а самые точные – отлитые в оболочковых и металлических формах, а также литье под давлением и по выплавляемым моделям. Очевидно, у литья, полученного при

ручной формовке, величина припуска будет больше, чем у заготовок, отлитых по выплавляемым моделям. В отливках сложной формы необходимо делать плавные переходы от толстых к тонким стенкам. Это требует увеличения припусков на тонких стенках.

Кроме того, при изготовлении крупных отливок следует считаться с наличием усадочной раковины.

Точность штампованных заготовок гораздо выше точности поковок, поэтому припуски у поковок гораздо больше, чем у штампованных заготовок. У штампованных заготовок имеется обезуглероженный слой, при обработке его необходимо удалить.

Для поковок характерно наличие на их поверхности слоя окалины – припуск должен быть больше этого слоя.

Для заготовок, получаемых методом свободной ковки, получить сложную форму затруднительно. Поэтому ради упрощения формы заготовки увеличивают припуски на обработку.

*Точность и качество обработанных поверхностей* также оказывают влияние на величину припуска. Например, для обработки заготовки из горячекатаного проката по наружной поверхности с точностью 15 квалитета (5-го класса) достаточно одной операции, а для обработки этой же заготовки с точностью 8 квалитета (2-го класса) необходимы 4 операции. Для каждой промежуточной операции механической обработки необходимо оставлять припуск. Таким образом, общий припуск зависит и от количества операций, и от способов механической обработки, требуемой шероховатости поверхности.

Если деталь в процессе механической обработки подвергается термической обработке, то на величину припуска окажет влияние деформация детали. Припуск на механическую обработку увеличится.

*Технические условия на изготовление детали*. Чем выше требование к точности и качеству обработки поверхностей, тем больше, как правило, величина припуска. Если из одной и той же заготовки деталь изготавливают с *Ra* 50 ... 25 мкм и *Ra* 1,6 мкм, то величина припуска будет больше при обработке с более гладкой чистой поверхностью – *Ra* 1,6 мкм. От требований механической обработки зависит применяемый метод обработки. Для каждого метода обработки характерен свой диапазон величин припусков.

В ряде случаев увеличивают припуск у тел вращения для установки деталей в центрах, для изготовления центровых отверстий иногда нужно увеличивать длину для того, чтобы зажать деталь в патроне станка.

Из требований чертежа следует учитывать требования точности и шероховатости. Кроме того, следует учитывать наличие термической обработки и сварки.

### *6.3. Методы расчета припуска*

Существуют два метода расчета припусков: *расчетно-аналитический и опытно-статистический.*

*Расчетно-аналитический метод* разработан проф. В. М. Кованом. В основу расчетных формул положено то, что величина припуска должна обеспечить удаление с поверхности всех дефектов поверхностного слоя, устранение погрешностей предшествующей обработки. Кроме того, величина припуска должна обеспечить устранение погрешностей базирования и установки, возможные при выполнении данной операции.

Расчет припуска ведется по $Z_{\min}$, который определяется по формулам.

Симметричный припуск на диаметр для наружных и внутренних поверхностей тел вращения рассчитывается по формуле

$$2Z_{\min} = 2(Rz_a + T_a + \sqrt{\rho_a^2 + \varepsilon_b^2}).$$

Асимметричный припуск на одну из плоских поверхностей определяется по формуле

$$Z_{\min} = Rz_a + T_a + \rho_a + \varepsilon_b,$$

где $Z_{\min}$ – минимальный припуск на выполняемый переход;

$Rz_a$ – высота шероховатостей, полученная на предшествующем переходе;

$T_a$ – толщина дефектного слоя, полученного на предшествующем переходе;

$\rho_a$ – суммарное значение пространственных отклонений, полученное на предшествующей операции;

$\varepsilon_a$ – погрешность установки – возможная при выполнении данной операции. При этом погрешность установки определяет как векторную сумму погрешности базирования и погрешности закрепления.

В некоторых случаях при расчете припуска отдельные составляющие исключаются из расчета. Например, при обработке отверстий с плавающим креплением развертки величина $\rho_a$ исключается из расчета.

В некоторых случаях из формулы исключают величину $T_a$. Например, при обработке заготовок из чугуна эта величина учитывается только для заготовки, т. е. только для черновой операции.

*Опытно-статистический метод.* При этом методе устанавливают припуск, общий на весь технологический процесс. Припуск назначается по справочнику. При этом назначается без учета конкретных особенностей выполняемой операции.

Припуск устанавливают в следующей последовательности.

1. Определяют общий припуск исходя из вида заготовки и ее габаритов.
2. Назначают припуски на все операции, кроме первой.
3. Определяют припуск на первую операцию как разность общего припуска и суммы припусков по операциям, кроме первой.

## 7. ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОГО НОРМИРОВАНИЯ

Под техническим нормированием понимается установление нормы времени для выполнения определенной работы.

***Нормой времени*** называют регламентированное время выполнения некоторого объема работ в определенных производственных условиях одним или несколькими исполнителями соответствующей квалификации. Норму времени определяют на основании технического расчета, исходя из условий наиболее полного использования возможностей металлорежущих станков и инструментов при соблюдении требований к точности обработки и качеству поверхностного слоя обработанной детали. Норма времени устанавливается на каждую технологическую операцию.

Правильное нормирование имеет большое значение для производства. Норма времени является одним из основных критериев оценки технологических процессов. Она служит основой как для составления калькуляции себестоимости изготовления детали, так и основой для оплаты труда, а также является основой для расчета длительности производственного цикла, необходимого количества рабочих, станков, инструментов и др.

По мере совершенствования технологического процесса – применение новой конструкции приспособления, нового режущего инструмента или изменения режима резания – норма времени должна пересматриваться и уточняться.

### *7.1. Состав нормы времени*

Норма времени при обработке на металлорежущих станках определяется по формуле

$$T_{\text{шт.}} = T_{\text{о}} + T_{\text{в}} + T_{\text{об.}} + T_{\text{пер.}},$$

где $T_{\text{о}}$ – основное технологическое время; основное время – это время, в течение которого непосредственно происходит изменение формы, размеров и шероховатости; в основное время включается время, затрачиваемое на врезание и перебег инструмента, время на обратные холостые ходы;

$T_{\text{в}}$ – вспомогательное время; это время, без которого выполнение основной работы невозможно; во вспомогательное время включается время, затрачиваемое на управление станком, установку детали и т. п.; сумма основного и вспомогательного времени называется оперативным временем: $T_{\text{оп}} = T_{\text{о}} + T_{\text{в}}$;

$T_{\text{об.}}$– время обслуживания рабочего места; это время подразделяется на время технического и организационного обслуживания рабочего места: $T_{\text{об.}} = T_{\text{т.о.}} + T_{\text{ о.}}$;

$T_{\text{т.о.}}$ – время технического обслуживания рабочего места включает в себя время на подналадку и регулировку станка, на смену затупившегося инструмента, на поправку инструмента и удаление стружки;

$T_{\text{о.о.}}$ – время организационного обслуживания; включает в себя на раскладку инструмента, на чистку и смазку станка, время на осмотр и опробование станка;

$T_{\text{пер.}}$ – время перерывов на отдых и физические потребности.

Для обработки партии деталей вводится понятие «штучно-калькуляционное время»: $T_{\text{шт.-к.}} = T_{\text{шт.}} + \dfrac{T_{\text{п.з.}}}{n}$.

$T_{\text{п. з}}$ – подготовительно-заготовительное время; это время, затрачиваемое на ознакомление с работой, чертежом, технологией, на наладку станка и приспособления;

$n$ – количество деталей в партии.

### *7.2. Методы определения нормы времени*

Применяется два метода определения нормы времени: *суммар-*

*ный и аналитически-расчетный.*

При суммарном методе норма времени дается на операцию без расчленения её на составные части. В этом случае норма времени задается по аналогии, такая норма не является прогрессивной.

При аналитическом методе операция расчленяется на составные части и нормирование осуществляется на основании разработанного технологического процесса.

Подсчет элементов времени осуществляется в следующей последовательности:

1. Подсчитывается основное время на каждый переход, а затем суммируется по всей операции.

2. Определяется вспомогательное время на каждый переход, а затем суммируется по всей операции.

3. Определяется время обслуживания рабочего места и перерывов на операцию.

4. Определяется подготовительно-заключительное время на партию.

***Основное время***. Для случая точения основное время определяется по формуле:

$$T_0 = \frac{L}{n \cdot S} i \quad ,$$

где $L$ – расчетная длина обработки;

$n$ – число оборотов в мин;

$S$ – подача в мм/об;

$i$ – количество ходов.

Расчетная длина обработки складывается из длины обрабатываемой поверхности, длины врезания и перебега инструмента (рис. 25). Если при обработке нужно брать пробную стружку, то еще добавляется длина для взятия пробных стружек.

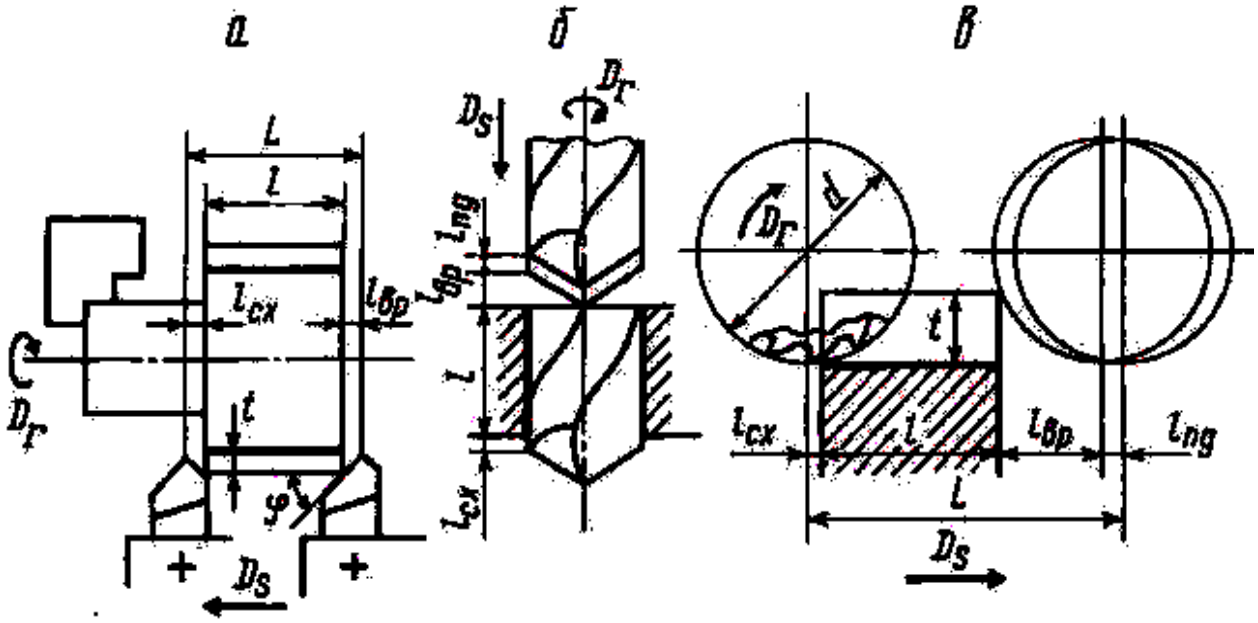



Рис. 25. Схема определения расчетной длины перемещения инструмента: *а* – при продольном точении, *б* – сверлении, *в* – продольном фрезеровании

Режим резания определяется в следующей последовательности:

1. Определяется глубина резания – *t*, мм.

2. Определяется подача – *S*, мм/об. Найденное значение подачи корректируется по станку – принимается ближайшее меньшее.

3. Определяется скорость резания – *V*, м/мин.

4. По скорости резания подсчитывается частота вращения. Найденное значение частоты корректируется по станку – принимается ближайшее меньшее.

5. Значения подачи и скорости резания подсчитываются по эмпирическим формулам или выбираются по таблицам.

6. После определения режима резания производится проверка правильности определения режима резания. Проверка осуществляется по мощности станка и по жесткости детали.

***Вспомогательное время*** определяется по нормативным таблицам в зависимости от типа производства. При этом учитываются следующие затраты времени:

1. Время на установку и снятие детали.

2. Время, связанное с переходом.

3. Время, затрачиваемое на изменение частоты вращения и величины подач.

4. Время, затрачиваемое на смену инструмента.

5. Время, затрачиваемое на контрольные промеры.

***Время, затрачиваемое на обслуживание станка и перерывы,*** определяется в процентах от оперативного времени по нормативам. При этом величина коэффициента определяется (в процентах) в зависимости от типа производства.

***Подготовительно-заключительное время*** определяется по нормативным таблицам в зависимости от типа производства. Оно зависит от типа станка и его сложности, сложности наладки приспособления, способа закрепления детали.

Квалификация работы. После установления нормы времени определяют разряд работы по тарифно-квалификационному справочнику соответствующей отрасли промышленности. Правильное установление разряда имеет значение для эффективного использования фонда заработной платы. В тарифно-квалификационном справочнике указывается, что должен знать и уметь рабочий соответствующего разряда. Чем больше требуется знаний и опыта при выполнении конкретной работы, тем выше должен быть разряд работы и рабочего.

Тарифная сетка состоит из квалификационных разрядов. Ставка оплаты труда устанавливается для первого разряда. Для всех остальных разрядов оплата определяется умножением ставки первого разряда на тарифный коэффициент соответствующего разряда.

# 8. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

При проектировании технологических процессов решаются две главных задачи: техническая и экономическая. Другими словами технологический процесс должен обеспечить получение всех требований чертежа с минимальными затратами труда.

Проектирование технологических процессов имеет целью дать подробное описание процессов изготовления деталей и всего изделия. Технологические процессы разрабатываются при проектировании новых заводов или при организации производства новых изделий на действующих заводах.

## *8.1. Выбор заготовок и методов их изготовления*

### *8.1.1. Основные понятия и общие положения*

*Заготовка* – это предмет производства, из которого изменением формы и размеров, свойств материала и шероховатости поверхности изготавливают деталь или неразъемную сборочную единицу – узел.

Выбрать заготовку – это значит определить ее рациональный вид, определяющий конфигурацию заготовки, напуски, уклоны, толщину стенок, размеры отверстий, припуски на обработку, размеры заготовки, допуски на точность их выполнения, назначить технические условия на выполнение заготовки и выбрать оборудование.

Конфигурация заготовки вытекает из конструкции детали и определяется ее размерами и материалом, условиями работы детали в машине с учетом статических, динамических, температурных и других нагрузок.

Конструктор назначает технические требования, предъявляемые к детали, часто задает метод изготовления заготовки для определенного вида производства. В настоящее время число этих методов для каждого вида производства (литья, обработки давлением, прокатки, порошковой металлургии и др.) исчисляется многими десятками.

На основании рабочего чертежа детали технолог заготовительного цеха совместно с технологом механического цеха разрабатывают исходный чертеж заготовки, который в дальнейшем используют для разработки ТП ее изготовления и при проектировании технологической оснастки (штампов, пресс-форм, моделей, форм и др.). Этот чертеж является также исходным документом для разработки ТП механической обработки заготовки. Рабочий чертеж детали в процессе всей работы остается основным и контрольным документом технологической документации. При проектировании сложных и ответственных деталей в этой работе принимает участие конструктор изделия.

Технолог в процессе отработки детали на технологичность обязан проверить обоснованность принятых конструктором решений. Он может рекомендовать конструктору изменить вид заготовки, метод ее изготовления для совершенствования ТП изготовления заготовки в связи с увеличением программы выпуска, отсутствием оборудования на заводе, из-за возможности получения заготовки по кооперации или в связи с другими обстоятельствами.

Перечислим факторы, влияющие на выбор процесса и метода изготовления заготовки:

1. *Технологическая характеристика материала* – его свойства, определяющие возможность применения литья, пластической деформации, сварки, порошковой металлургии. Так, низкая жидкотекучесть и высокая склонность материала к усадке исключают его применение для литья в кокиль или литья под давлением из-за низкой податливости металлических форм. Сплавы, склонные к ликвации (неоднородность по химическому составу в сечении отливки), не применяют для центробежного литья и литья под давлением. Склонность сплава к поглощению газов вызывает на поверхности отливок пористость, что исключает изготовление отливки с гладкой, чистой поверхностью.

Для деформируемых материалов технологической характеристикой является пластичность, а для заготовок, получаемых сваркой или порошковой металлургией, свариваемость материалов.

2. *Физико-механические свойства материала в процессе формоизменения*. С целью их повышения в процесс вводят методы, обеспечивающие изготовление поковок с мелкозернистой и направленной волокнистой структурой, создают направленную кристаллизацию путем охлаждения форм, вакуумируют расплавы, используют комбинированные заготовки, позволяющие изготавливать нагруженные элементы конструкций из легированной стали, применяют другие мероприятия, вызывающие структурные изменения материала заготовки.

3. *Конструктивные формы, размеры детали, ее масса*. В процессе отработки детали на технологичность конструктивные формы упрощают для реализации выбранного метода изготовления исходной заготовки; проверяют соответствие напусков, уклонов, сопряжений, толщин стенок, правильность выбора разъемов штампов и форм. Основная цель при этом – возможность беспрепятственного заполнения металлом формы или штампа с последующим легким извлечением заготовки. При этом руководствуются ГОСТ 2665-85 для отливок и ГОСТ 7505-89 для поковок.

Размеры детали, ее масса оказывают решающее значение при выборе ряда прогрессивных методов, таких, как литье под давлением, в кокиль, по выплавляемым моделям, горячая объемная штамповка. Их применение ограничено техническими возможностями метода.

4. *Объем выпуска*. В единичном и мелкосерийном производствах в качестве заготовок применяют отливки, изготовленные в песчано-

глинистых формах, поковки, полученные ковкой и заготовки из горячекатаного проката. Все они имеют большие припуски и напуски. Стоимость материала заготовки составляет до 50 % себестоимости детали.

В крупносерийном и массовом производствах применяют заготовки, изготовленные специальными методами, которые уменьшают припуски на механическую обработку в среднем на 25 ... 30 %.

5. *Наличие технологического оборудования* – литейного, кузнечного, сварочного и других производств, возможность получения заготовок от специализированных заводов по кооперации. Большая номенклатура деталей машин, разные технические требования, предъявляемые к ним, требуют разработки разнообразных вариантов ТП и методов изготовления заготовок. Это делает задачу оптимального выбора заготовок сложной.

### *8.1.2. Выбор заготовок, его последовательность*

В производственных условиях технологи заготовительного и механического цехов могут встретиться с ситуацией, когда выбор заготовки предопределен, т. е. метод изготовления заготовки определенного вида производства задан конструктором, а технолог лишь уточняет его.

Вторая ситуация, когда выбор заготовки конструктор оставляет за технологом.

Первая ситуация характерна для массового, крупносерийного и серийного производств, вторая – для единичного, мелкосерийного и серийного.

Первый вариант является результатом длительного совместного труда конструктора с технологами механического и заготовительного цехов, основанный на опыте работы детали в процессе эксплуатации машины с учетом ее доработок и доводок. Это характерно для большинства ответственных деталей, определяющих работоспособность машин, например деталей блоков цилиндров и гильз, коленчатых и распределительных валов, торсионов, шатунов, поршневых колец, лопаток и дисков турбин, вкладышей и др. Известно, что исходной заготовкой блока цилиндров из серого чугуна автомобильного двигателя в массовом производстве является отливка в землю при машинной формовке, для блока цилиндров из алюминиевого сплава – отливка, изготовленная литьем под давлением или в кокиль; заготовками для гильз цилиндров в массовом производстве

служат отливки, выполненные методом центробежного литья. В последнее время применяют метод центробежного литья в облицованный кокиль (заготовки для двигателя КамАЗа). Преимущества центробежного литья и литья в кокиль позволяют при этом свести минимальный припуск на механическую обработку самой ответственной поверхности гильзы диаметром $120^{+0,03}$ – "зеркала цилиндра" – к $Z_{min}$ = 3,5 ... 5,5 мм.

Следует отметить, что выбор конструктором метода изготовления заготовки для ответственных деталей часто носит дифференцированный характер.

Объем выпуска определяет применение в ТП прогрессивных методов изготовления заготовок. Например, в массовом производстве шатунов (материал – стали 40Х, 45, 18ХНМ, 40ХНМА), наряду с жесткими техническими требованиями, предъявляются особые требования по прочности, которые в значительной степени определяются процессом изготовления заготовки. Обеспечить их можно включением в ТП операции штамповки на молоте или прессе. Однако массовость выпуска требует применения скоростных процессов, таких как заготовительное вальцевание на ковочных вальцах с последующим формоизменением заготовки на КГШП и чеканкой для повышения точности. Обжатие на ковочных вальцах длится 3 ... 4 с, штамповка на прессе производительнее штамповки на молоте в 4 раза (однако стоимость пресса, как правило, выше стоимости молота). Процесс обеспечивает заготовке предпочтительное расположение волокон материала, макроструктуру, точность размеров с допуском ± 0,25 мм при объемной чеканке и ± 0,05 мм при плоскостной, шероховатость поверхности *Ra* = 2,5 ... 1,25 мкм, коэффициент использования металла до 0,7 ... 0,75.

Часто для деталей массового производства разрабатывают новые процессы и специальные методы изготовления заготовок. В последнем случае, учитывая, что серийным производством выпускается 75 ... 80 % машиностроительной продукции, выбор ТП изготовления заготовок является задачей технико-экономической, определяющей эффективность производства. В этих условиях заготовку часто выбирает технолог.

Имея чертеж исходной заготовки, чертеж детали с указанием ее конфигурации, размеров, материала, технических условий, данные по объему выпуска, нормативные материалы, заготовку выбирают в следующей последовательности: процесс, метод, оборудова-

ние. Основой процесса является принятый метод изготовления заготовки. Структура процесса, его содержание определяется степенью сложности изготавливаемой заготовки и, соответственно, требует применения одного или нескольких методов для его выполнения.

В первую очередь рассматривают технологические возможности материала, приведенные конструктором на чертеже детали, влияние степени его легирования на обрабатываемость.

Если материал детали обладает литейными свойствами и в то же время хорошо обрабатывается давлением, то выбор процесса и метода изготовления заготовки связывают с обеспечением заданного качества детали, т. е. с техническим условием на изготовление.

В результате анализа исключают многие процессы и методы, устанавливают степень технического совершенства принятых решений, выбирают возможные варианты, уточняют их.

Для полной оценки вариантов, если располагают материалами, выполняют технико-экономический анализ, критерием которого является себестоимость. Варианты сравнивают по изменяющимся статьям затрат: стоимости материала, инструмента, технологической оснастки (штампы, пресс-формы, формы, модели и т. д.), оборудования, заработной плате, электроэнергии. Учитывают и другие статьи затрат, если они приводят к значительному изменению варианта.

Как видно, подобный расчет требует большого количества нормативных, справочных и фактических данных, поэтому затруднителен для выполнения. На практике для ориентировочных расчетов по экономике используют статистические материалы, приложения, номограммы, графические зависимости и т. п.

В серийном производстве вал из стали 45 можно изготовить горячей объемной штамповкой или из горячекатаного проката диаметром 90 мм (рис. 26, *а – в*). Для принятия решения воспользуемся данными, приведенными в табл. 1.

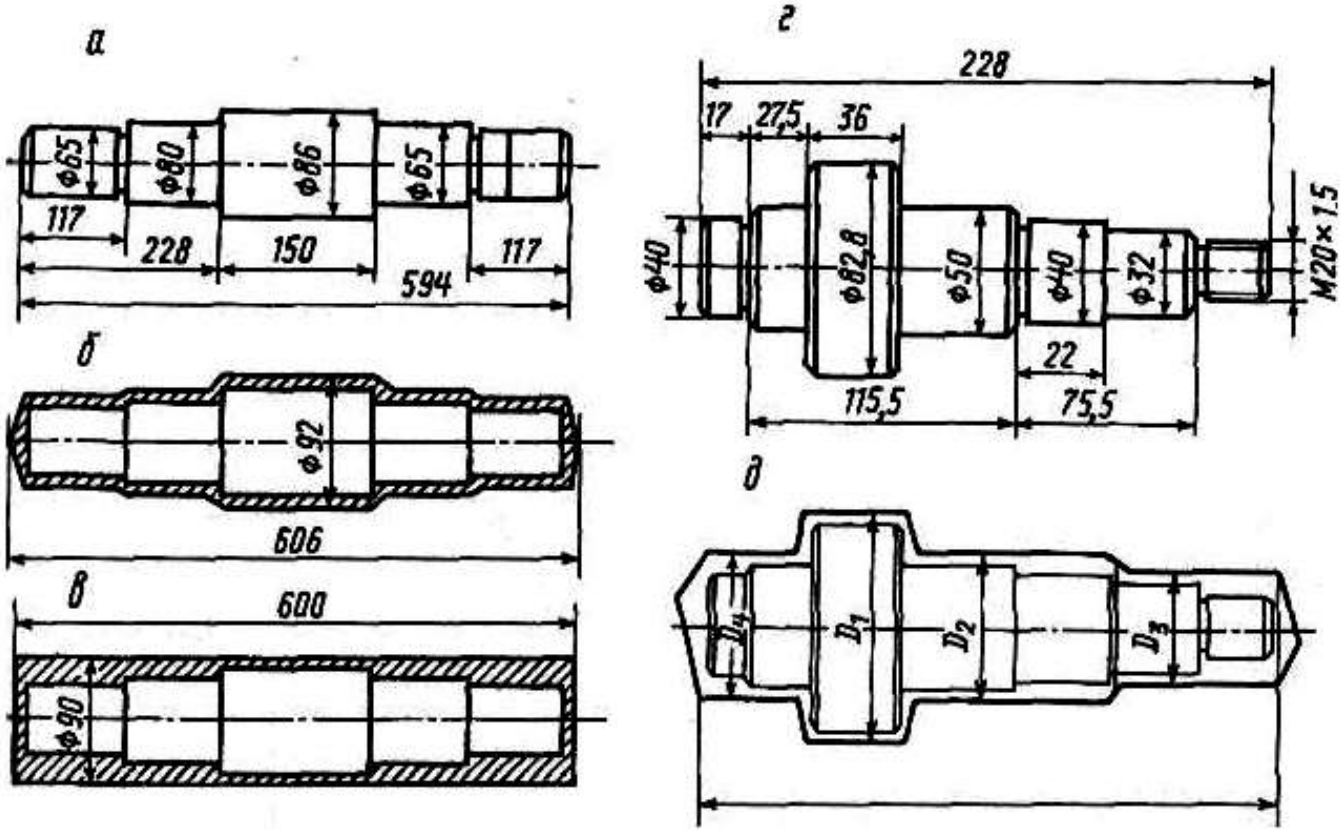



Рис. 26. Вал ступенчатый:
*а, г* – готовая деталь; *б* – штампованная заготовка; *в* – заготовка из горячекатаного проката; *д* – заготовка, полученная ковкой

Расход проката на одну заготовку составляет 30 кг. Следовательно, ее стоимость будет $\frac{955000}{1000} \cdot 30 = 2850$ у. е. Стоимость одной штамповки массой 25 кг – $\frac{255000}{1000} \cdot 25 = 6375$ у. е.

Таким образом, в рассматриваемом случае, целесообразно использовать горячекатаную заготовку.

Рассмотрим еще один пример. Для вала-шестерни, приведенного на рис. 26, *г* (материал сталь 40Х, масса детали 3,4 кг), с большими перепадами ступеней, чем на рис. 26, *а,* сопоставление

вариантов по данным табл. 1 дает аналогичный результат. Однако коэффициент использования материала для проката составляет 0,4, для штампованной заготовки – 0,66, причем разъемный штамп для ГКМ очень дорогой и окупится только в массовом производстве. Приемлемым вариантом для серийного производства будет ковка на молоте или прессе (рис. 26, *д*) с использованием универсального инструмента ($K_{им}$ = 0,58). При этом припуски на последующую механическую обработку регламентированы ГОСТ.

Более эффективно заготовку можно выбрать с использованием графических материалов. Так, заготовку для зубчатого колеса с одним венцом (рис. 27) из стали 18ХГТ можно изготовить, применяя в ТП методы свободной ковки, штамповки в подкладных и закрепленных штампах.

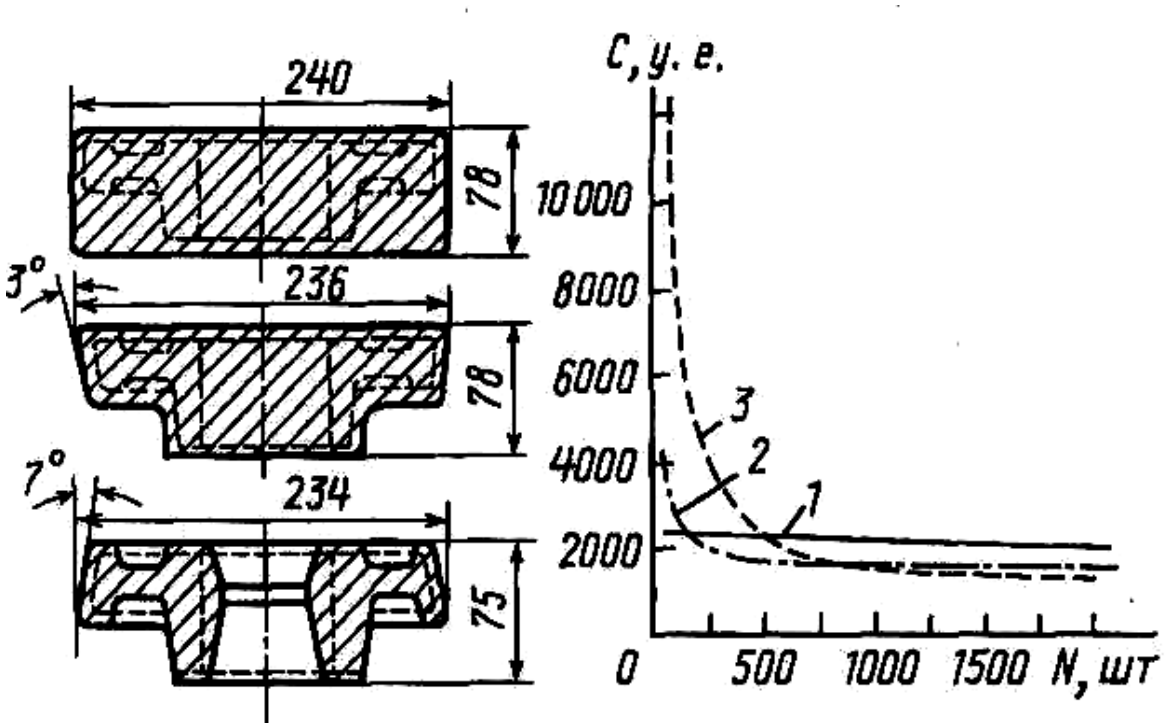



Рис. 27. Зависимость себестоимости *С* исходных заготовок для зубчатого колеса от метода изготовления и объема выпуска *N:*
*1* – ковка; *2* – штамповка в подкладных штампах; *3* – штамповка в закрепленных штампах

Таблица 1

**Средняя стоимость 1 т материала в условных денежных единицах, у. е.**

| | Сталь | Цветные металлы и сплавы |
|---|---|---|

| Заготовки | Сталь 45 | 45ХНМ | 95Х18 | алю-миний | бронза | латунь | медь |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Отливки* | | | | | | | |
| В песчаные формы | 400 | 4 00 | 2000 | 1700 | 1300 | – | – |
| В оболочковые формы | 1300 | | | | | 1000 | |
| По выплавляемым моделям | 3000 | – | – | – | – | – | – |
| Горячештампованные | 255 | 400 | 1250 | – | 1250 | – | |
| Холодноштампованные | 430 | 700 | 2650 | – | – | 1500 | 1540 |
| *Сортовой горячекатаный прокат* | | | | | | | |
| Мелкий до 19 мм | 110 | 288 | 300 | 800 | – | 800 | 950 |
| Средний 20 – 110 мм | 95 | 250 | 1200 | 600 | – | 700 | 900 |
| Крупный 120 – 150 мм | 67 | 165 | 955 | 500 | 850 | 600 | 850 |

*Примечание*. В условиях инфляции среднюю стоимость необходимо корректировать введением коэффициента.

Зависимость себестоимости изготовления исходной заготовки зубчатого колеса от объема выпуска при разных методах изготовления показывает, что для заготовок, изготовленных методом свободной ковки (см. рис. 27 – прямая 1), изменение объема выпуска практически не сказывается на себестоимости. Это объясняется стабильностью расходов на материал, инструмент и технологическую оснастку, оборудование, энергию и др. Для заготовок, полученных штамповкой в подкладных штампах (см. рис. 27 – кривая *2*), незначительное увеличение себестоимости при малых объемах выпуска объясняется небольшими затратами на инструмент. Увеличение себестоимости для заготовок, изготовленных в закрепленном штампе (см. рис. 27 – кривая *3*), связано с затратами на более дорогой инструмент.

В станкостроении потери металла при производстве отливок средней сложности из стали и чугуна составляют 35 ... 54 %, а при изготовлении исходных заготовок методами пластических деформа-

ций – 5 ... 37 %. Особенно велики потери металла при ковке из слитков на молоте (29 ... 37 %) и прессе (20 ... 33 %). При штамповке из проката на молотах потери составляют 13 ... 26 %, а на ГКМ – 5 ... 13 %.

Потери металла в стружку при механической обработке также зависят от исходных заготовок и составляют 30 ... 50 % для прутков стального проката, 30 ... 45 % – для поковок, 10 ... 30 % – для штампованных поковок, 15 ... 20 % для чугунных отливок в песчаные формы и 10 ... 15 % – для оболочкового литья.

Потери металла в стружку частично компенсируются при ее переплавке, однако 20 % металла стружки уходит на угар, часть улетучивается при окислении, теряется при транспортировке.

В среднем около 20 % металла теряется при изготовлении поковок на молотах и прессах и 30 ... 34 % при их последующей механической обработке. Отсюда следует, что общие потери металла при изготовлении деталей из таких поковок составляют около 50 %. Поэтому выбор метода с малыми припусками всегда приводит к снижению трудоемкости и себестоимости изготовления детали.

С применением ЭВМ на различных этапах технологического проектирования появилась возможность использования комплексных заготовок для групп деталей (рис. 28), сгруппированных по конструктивным и технологическим признакам. Группирование выполняют с учетом следующих предпосылок: 1) все множество размеров можно упорядочить по одному из них, например, по наибольшему диаметру; 2) разбивка по этому параметру через определенные интервалы образует микрогруппы; 3) возможные варианты группирования создают различные сочетания групп. Это приводит к изготовлению одной заготовки для группы деталей, а также экономии затрат на технологическую оснастку и при черновой обработке.

Выбор оптимального варианта изготовления исходной заготовки часто выполняют на ЭВМ на основе системного анализа и критериев по массе заготовки, трудоемкости, себестоимости, комплексным и другим критериям, характеризующим весь производственный цикл изготовления детали.

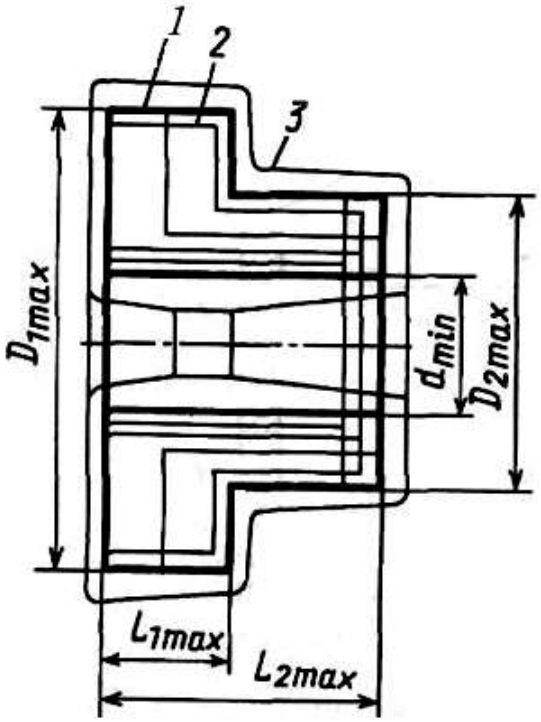



Рис. 28. Эскиз комплексной заготовки

## *8.2. Виды технологических процессов и технологическая документация*

В соответствии с ЕСТД различают *единичный технологический процесс, типовой технологический процесс и типовую технологическую операцию.*

*Единичный технологический процесс* – это такой технологический процесс, который относится к изделию одного наименования независимо от типа производства.

*Типовой технологический процесс* – это такой технологический процесс, который содержит одинаковую последовательность большинства технологических операций для группы изделий с общим конструктивным признаком.

*Типовая технологическая операция* – это такая операция, которая характеризуется единством содержания и последовательности переходов для группы изделий с общими конструктивными признаками.

Изложение технологических процессов может быть маршрутным (маршрутный технологический процесс), операционным (операционный технологический процесс) и маршрутно-операционным (маршрутно-операционный технологический процесс).

Маршрутный технологический процесс – это технологический процесс, выполняемый по документам, в которых содержание операций излагается без указания переходов и режимов резания.

Операционный технологический процесс – это процесс, выполняемый по документам, в которых содержание операций излагается с указанием переходов и режимов резания.

Маршрутно-операционный технологический процесс – это технологический процесс, в котором содержание отдельных операций излагается без указания переходов и режимов резания.

В соответствии с ЕСТД применяется следующая **основная технологическая документация.**

**Маршрутная карта** содержит описание технологического процесса по всем операциям в соответствующей последовательности. В маршрутной карте указывается оборудование, приспособления и инструмент. Приводятся данные по материальным и трудовым затратам.

**Карта эскизов** содержит графическую иллюстрацию технологического процесса изготовления изделий.

**Операционная карта** содержит описание операции технологического процесса с расчленением операции по переходам с указанием режимов резания.

Кроме перечисленных, в соответствии с ЕСТД применяется еще много других видов технологической документации.

**Некоторые основные требования к оформлению карты эскизов и операционной карты.**

На карте эскизов деталь изображается так, как она будет обрабатываться на станке. Обрабатываемые поверхности выделяются жирными или цветными линиями. Размеры, допуски и шероховатость проставляются такими, какими они получаются после данной операции. На эскизе условными значками указывается способ базирования и закрепления детали. На рис. 29 показан один из способов закрепления детали на токарно-винторезном станке.

Деталь установлена на центрах с поводковым устройством.

При заполнении операционной карты следует иметь в виду, что в пределах одной операции применяется сквозная нумерация всех переходов (технологических и вспомогательных). Технологический переход записывается глаголом неопределенной формы. Например: точить, шлифовать, но не точение, не шлифование. Написание перехода может выполняться следующим образом (для детали, изображенной на рис. 29). Можно записать:

1. Точить, шлифовать и т. д. пов. *1*,

или

2. Точить, шлифовать и т. д. до Ø26,5 на длину 40.

Указывать номер обрабатываемой поверхности (пов. *1*) можно одним из вариантов, указанных на рис. 29.

Исходными данными для проектирования технологических процессов являются рабочие чертежи, технические условия на изготовление изделия и производственная программа.

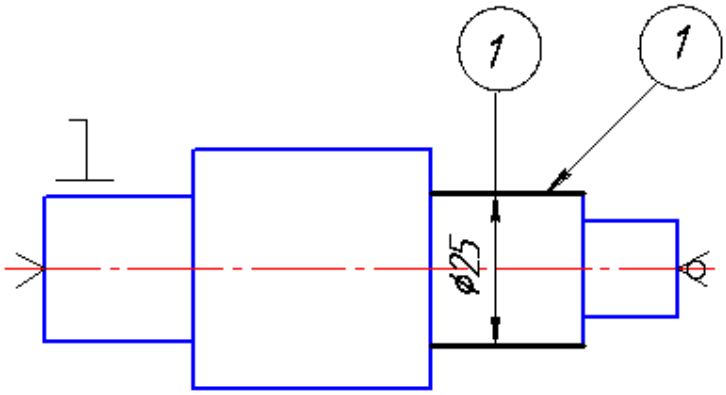



Рис. 29. Схема базирования детали на токарно-винторезном станке и варианты обозначения обрабатываемой поверхности *1*

При разработке технологических процессов применяются два метода: концентрации операций и дифференциации операций.

Сущность метода концентрации состоит в объединении в пределах одной операции большого количества переходов или даже нескольких простых операции в одну сложную операцию, выполняемую на одном сложном станке.

Сущность метода дифференциации состоит в разделении операций на простейшие, выполняемые на большом количестве сравнительно простых станков.

В современном машиностроении все больше стремятся применять принцип концентрации операции, так как при этом методе повышается производительность и точность.

### *8.3. Основы построения технологического маршрута и выбор метода обработки детали*

Приступая к разработке технологического процесса, необходимо, прежде всего, установить тип производства и выбрать вид заго-

товки. При разработке технологического маршрута нужно решить две главные задачи: назначить базы и установить последовательность обработки поверхностей.

На основании анализа технических требований к изделию назначают конструкторские и сборочные базы, устанавливаются технологические базы для всех операций.

При назначении технологических баз нужно правильно выбрать черновые и чистовые базы. Так, например, при обработке валов в качестве чистовой базы применяются центровые отверстия, а в качестве черновой базы при фрезеровании торцов и зацентровке используется наружная цилиндрическая поверхность вала.

После выбора баз устанавливается последовательность обработки поверхностей деталей.

Первыми обрабатываются базовые поверхности. Затем обрабатываются те поверхности, с которых снимается наибольший припуск, или те поверхности, на которых недопустимы никакие дефекты.

При назначении дальнейшей последовательности обработки следует руководствоваться следующим принципом: чем точнее и чище должна быть обработана поверхность, тем позднее ее следует обрабатывать. Если такие поверхности невозможно обработать последними, то их обработка должна быть повторена в виде отделочной обработки.

Поверхности, связанные точным взаимным расположением, следует обрабатывать с одной установки. Поверхности, которые в значительной степени снижают жесткость детали, должны обрабатываться последними.

Установив последовательность обработки поверхностей, приступают к выбору методов обработки.

Выбор метода обработки зависит от требований чертежа по точности и качеству обработанной поверхности.

Выбор метода обработки зависит от свойств обрабатываемого материала и характера заготовки. В первую очередь выбирают метод окончательной обработки, а затем выбирают промежуточные методы обработки. При выполнении промежуточных методов обработки достигается постепенное повышение точности от заготовки к готовой детали. При выборе методов обработки пользуются таблицами экономической точности обработки. Выбирая метод обработки, следует стремиться к такому, который обеспечивает достижение требований чертежа при меньшем количестве переходов. Желательно, чтобы

этим методом можно было обрабатывать возможно большее количество поверхностей. В тех случаях, когда обработка возможна различными методами, следует сопоставить их по производительности и экономичности.

*Выбор оборудования, приспособления и режущего инструмента*. Выбирая метод обработки, одновременно выбирают станок, на котором будет выполняться данная обработка. При выборе типа станка учитывается возможность выполнения требований чертежа. Кроме того, при выборе станка следует учитывать габариты детали, возможность более полного использования станка по мощности, соответствие паспортных данных станка расчетным значениям режима резания и др.

Одновременно с выбором станка выбирается приспособление. Если приспособление является принадлежностью станка (патрон, тисы), то указывается только его наименование. Если требуется специальное приспособление, то технологом разрабатывается схема приспособления, способ базирования и выдается задание на проектирование приспособления.

При выборе станка одновременно выбирается и необходимый режущий инструмент. Выбор типа инструмента зависит от вида станка, метода обработки, материала обрабатываемой детали, требований чертежа.

Выбор материала режущей части имеет большое значение. Для обработки стали применяют титановольфрамовые твердые сплавы.

Для обработки чугуна, цветных металлов и сплавов применяет вольфрамовые сплавы.

Минералокерамические сплавы применяется для чистовой обработки без ударной нагрузки.

Инструментальные стали применяют для сложных, фасонных инструментов, для инструментов, работающих при низких скоростях резания.

Алмазные инструменты для отделочной обработки при высоких скоростях резания. Из материалов для абразивных инструментов наиболее широко применяют электрокорунд и карбид кремния различных марок. Электрокорунд применяется при обработке стали. Карбид кремния черный – для обработки чугуна и цветных материалов. Карбид кремния зеленый – для обработки твердых сплавов.

Алмазные абразивные инструменты применяются, главным образом, для заточки и доводки режущих инструментов.

При разработке маршрута изготовления детали и его структуры рекомендуется следующая последовательность работы:

- выбрать тип заготовки;
- произвести технологическую разметку чертежа, пронумеровав все поверхности, подвергаемые механической обработке;
- в соответствии с рекомендациями таблиц среднеэкономических достижимых точностей обработки выбрать для каждой из пронумерованных поверхностей требуемое количество операций (переходов); составить из выбранных таким образом операций маршрут изготовления детали (рис. 30) и представить его в виде табл. 2;
- необходимо отметить, что для упрощения маршрута изготовления вала на его эскизе не полностью приведены его элементы и технические требования;
- название и краткое содержание операций, представленных в таблице, соответствуют требованиям стандарта ЕСТД (Правила записи операций и переходов. Обработка резанием).

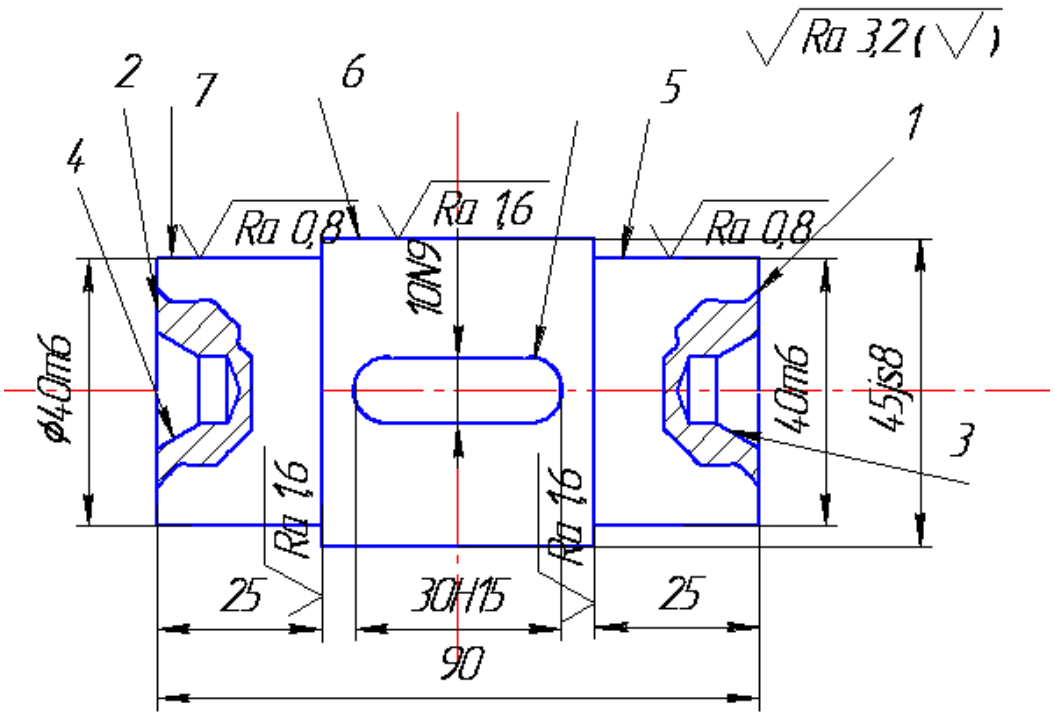
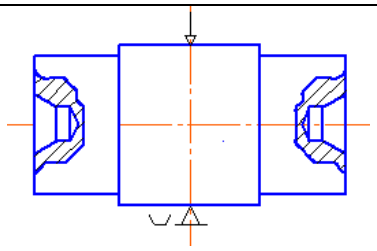
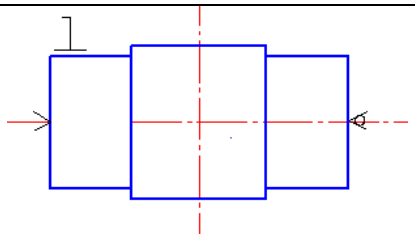
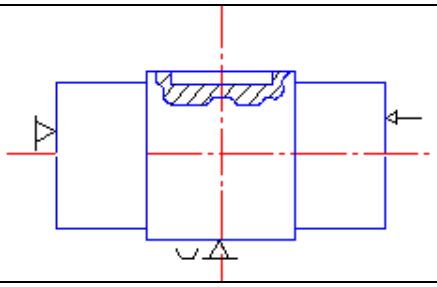
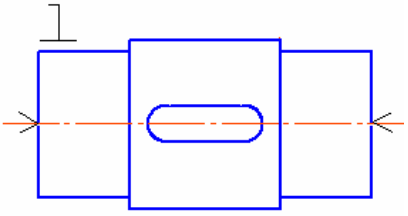



Рис. 30. Чертеж вала

Таблица 2

**Маршрут изготовления вала**

| Операция | Наименование, содержание операции | Схема базирования | Станок, оборудование, оснастка |
|---|---|---|---|
| 005 | *Фрезерно-центровальная* | | |
| | Фрезеровать торцы 1 и 2 и сверлить центровые отверстия 3 и 4 |  | Фрезерно-центровальный станок 2Г942, приспособление при станке |
| 010 | *Токарно-винторезная* | | |
| | Точить поверхности 5, 6 и 7 |  | Токарно-винторезный станок 16Т02П, вращающийся центр, поводковый патрон |
| 015 | *Вертикально-фрезерная* | | |
| | Фрезеровать шпоночный паз 8 |  | Шпоночно-фрезерный станок 6930, призма, упор |
| 020 | *Круглошлифовальная* | | |
| | Шлифовать поверхности 5, 6 и 7 |  | Круглошлифовальный ЗУ10В. Центры, хомутик |

*Примечание.* В таблице приведена только номенклатура необходимых операций, а не их количество, которое зависит от точности каждой обрабатываемой поверхности

### *8.4. Проектирование технологических процессов сборки*

Сборка является заключительным этапом в производстве машин. От качества сборочных работ в значительной степени зависит работоспособность, надежность и долговечность машин. Трудоемкость сборочных работ составляет в массовом производстве менее 20 % от трудоемкости механической обработки, в серийном – 20 – 40 %, в единичном – более 50 %. Исходными данными для проектирования технологических процессов сборки являются сборочные чертежи, технические условия на приемку и испытание изделий, производственная программа. Основным видом работ при сборке является выполнение различных соединений деталей. Соединения может быть выполнено подвижным или неподвижным.

Неподвижные соединения могут быть разборными и неразборными. Неподвижные неразборные соединения получают: сваркой, пайкой, склепыванием, прессованием, при этом охватывающая деталь нагревается или охлаждается охватываемая деталь.

Неподвижные разборные соединения получают путем соединения деталей с посадками, например: *n*6, *m*6, *K*6, *Js*6 резьбовым креплением, посадкой на конус.

Подвижные соединения осуществляется при посадках, например: *h*6, *g*6, *f*6 и др., а также при соединении шаровых, конических и винтовых поверхностей.

Технологический процесс сборки состоит из операций, главными из которых являются:

1. Соединение сопрягаемых деталей.
2. Контроль и регулирование точного взаимного расположения деталей.
3. Фиксирование правильного положения.
4. Очистка, промывка, пропитка, подкраска.
5. Если имеется электрическая часть, то отдельно выделяется электрическая сборка.

***Методы сборки***. Для получения требуемой точности замыкающего звена размерной цепи применяют следующие методы сборки: метод полной взаимозаменяемости; метод групповой взаимозаменяемости; метод неполной взаимозаменяемости; метод компенсаторов; метод пригонки по месту.

***Стадии сборки***. Многие детали соединяются с другими деталями, образуя сборочные единицы (узлы), и уже после этого направ-

ляются на общую сборку. Сборочный процесс состоит из следующих стадий:

1. Соединение деталей в сборочные единицы, агрегаты.
2. Общая сборка.
3. Регулирование.
4. Испытание (на холостом ходу, под нагрузкой и т. д.).
5. Окраска.
6. Консервация.

***Организационные формы сборки***. Различают стационарную и подвижную сборку. Стационарная сборка выполняется рабочим или группой рабочих на одном неподвижном рабочем месте.

Подвижная сборка характеризуется тем, что изделие в процессе сборки перемещается от одного рабочего места к другому. При этом передвижение может осуществляться и периодически, и непрерывно – принудительно.

Сборка машин, так же как и обработка, может осуществляться по принципу концентрации и дифференциации. При методе концентрации машина полностью собирается бригадой на одном рабочем месте (обычно в единичном производстве). При методе дифференциации процесс сборки расчленяется на отдельные операции, каждая из них выполняется на одном рабочем месте (подвижном или неподвижном). Иногда применяется построение сборки по смешанному методу. Общая сборка осуществляется по методу концентрации, а узловая – по методу дифференциации.

Технологические схемы, являясь первым этапом разработки технологического процесса, в наглядной форме отражают маршрут сборки изделия и его составных частей. Технологические схемы сборки составляют на основе сборочных чертежей изделия или узла (рис. 31).

На технологических схемах каждая деталь или сборочная единица обозначается прямоугольником, разделенным на 3 части. В верхней части прямоугольника указывают наименование детали или сборочной единицы, в левой нижней части – номер, присвоенный детали или сборочной единице на сборочных чертежах изделия, в правой нижней части – число собираемых элементов. Сборочные единицы обозначают буквами «Сб» (сборка). Базовыми называются детали или сборочные единицы, с которых начинается сборка. Каждой сборочной единице присваивается номер ее базовой детали. Например, «Сб. 3» – сборочная единица с базовой деталью *3* (седло).

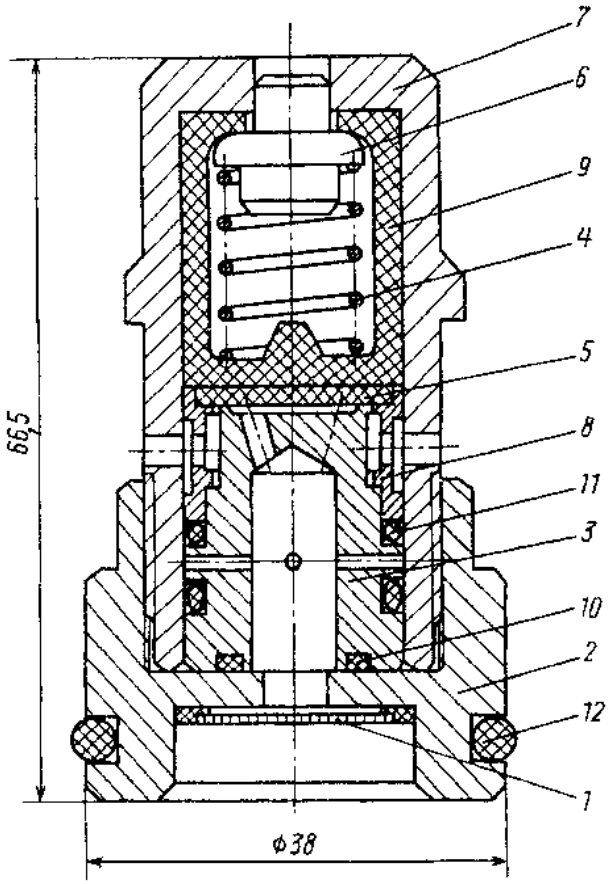



Рис. 31. Гидроклапан предохранительный

Технологическую схему сборки строят в следующей последовательности.

В левой части схемы (рис. 32, 33) указывают базовую деталь или базовую сборочную единицу. В правой части схемы указывают собираемое изделие в сборе. Эти два прямоугольника соединяют горизонтальной линией. Выше этой линии прямоугольниками обозначают все детали, входящие непосредственно в изделие, в порядке, соответствующем последовательности сборки. Ниже этой линии прямоугольниками обозначают сборочные единицы, непосредственно входящие в изделие.

Схемы сборки сборочных единиц могут строиться как отдельно (по приведенному выше правилу), так и непосредственно на общей схеме, развивая ее в нижней части схемы (под линией).

Технологические схемы сборки сопровождаются подписями, если они не очевидны из самой схемы, например, «Запрессовать», «Сварить», «Проверить на биение» и т. д.

Технологические схемы сборки одного и того же изделия многовариантные. Оптимальный вариант выбирают из условия обеспечения

заданного качества сборки, экономичности и производительности процесса при заданном масштабе выпуска изделий. Составление технологических схем целесообразно при проектировании сборочных процессов для любого типа производства. Технологические схемы упрощают разработку сборочных процессов и облегчают оценку изделия на технологичность.

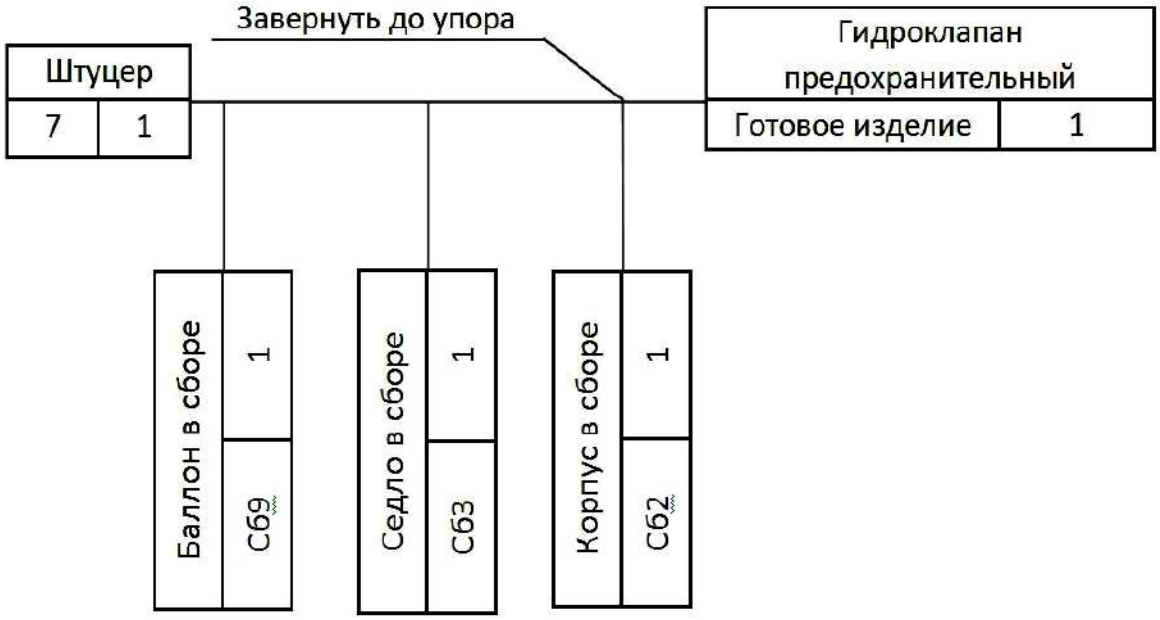



Рис. 32. Технологическая схема общей сборки

Технологические процессы сборки типовых сборочных единиц, сборки неподвижных разъемных соединений (резьбовых, шпоночных, шлицевых и т. п.), сборки неразъемных соединений (пластическим деформированием, сваркой, пайкой, склеиванием), сборки различных передач машин и механизмов (зубчатые, цепные и др.) описаны в соответствующей справочной литературе.

По принятым технологическим схемам общей и узловой сборки выявляют основные сборочные операции. Содержание сборочной операции устанавливают так, чтобы на каждом рабочем месте выполнялась однородная по своему характеру и технологически законченная работа, что способствует лучшей специализации сборщиков и повышению производительности их труда. Содержание операции зависит также от выбранного типа производства и метода работы (поточный или непоточный).

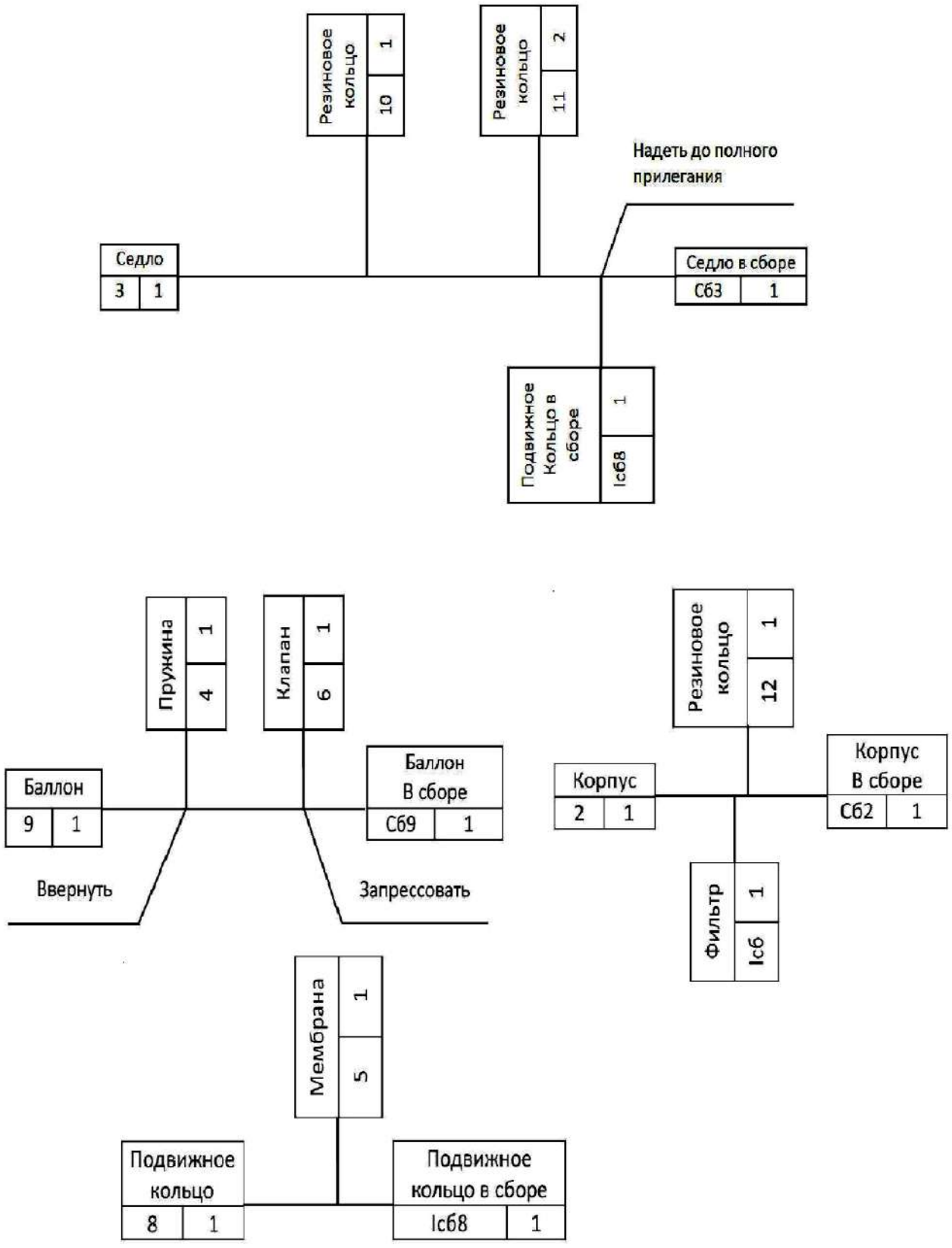



Рис. 33. Технологические схемы узловой сборки

### *8.5. Проектирование технологических процессов восстановления деталей*

В процессе эксплуатации отдельные элементы деталей изнашиваются и выходят из строя. При ремонте ставится задача восстановить работоспособность машины или узла.

Наиболее частой причиной выхода из строя является износ отдельных поверхностей детали. Проектирование технологических процессов восстановления состоит из следующих этапов:

**1. Анализ технического состояния детали.** При анализе состояния детали, прежде всего, встают вопросы: к какой группе должна быть отнесена деталь, и какие критерии использовать для этого.

*К первой группе* (годные для повторного использования) относят детали с износом в пределах допуска на изготовление или имеющих отклонение в пределах допустимых техническими требованиями на дефектацию и ремонт, а также с незначительными повреждениями (мелкие царапины или вмятины).

*Ко второй группе* (подлежащие восстановлению) относят детали с износом, превышающим допустимые значения, или с повреждениями, устранение которых (с учетом служебного назначения детали) по техническим и экономическим соображениям целесообразно.

В производственных условиях разработаны и реализованы десятки различных способов восстановления деталей. Технические возможности различных способов восстановления и рекомендуемая область их применения.

Для повышения надежности и долговечности капитально ремонтируемого горного оборудования большое значение имеют научно обоснованные способы и технологические процессы восстановления детали. Решение этого вопроса имеет большое хозяйственное значение особенно в связи с развитием восстановления деталей на специализированных предприятиях, фирмах, цехах в условиях крупносерийного, серийного и, возможно, единичного производства.

В отличие от технологического процесса изготовления деталей, процесс восстановления имеет специфические особенности. При изготовлении сырьем для готовых деталей служит заготовка, в то время как при восстановлении заготовкой является сама деталь. Поэтому целью технологического процесса восстановления деталей является не превращение заготовки в готовую деталь, путем оптимального варианта механической обработки, а возвращение детали утраченной

работоспособности наиболее рациональным способом, обеспечивающим необходимую долговечность детали при наименьшей стоимости ее восстановления. Таким образом, выбор рационального способа является одним из основных вопросов при разработке технологических процессов восстановления детали.

При выборе баз необходимо руководствоваться теми же принципами, что и при изготовлении новой детали.

При восстановлении необходимо использовать те же базы, что и при изготовлении новой детали. Следует иметь в виду, что при восстановлении деталей специальные приспособления применяются довольно редко. Как правило, при установке приходится применять выверку деталей.

Выбор способа восстановления зависит от конструктивно-технологических особенностей и условий работы деталей, величины их износов, эксплуатационных свойств самих способов, определяющих долговечность отремонтированных деталей, стоимости их восстановления.

Конструктивно-технологические особенности деталей определяются:

- их структурными характеристиками – геометрической формой и размером, материалом и термообработкой;
- поверхностной твердостью, точностью изготовления, шероховатостью поверхности;
- характером сопряжения (типом посадки);
- условиями работы – характером нагрузки, родом и видом трения, величиной износа за эксплуатационный период.

Проанализировав параметры детали, приходим к выводу, что данную деталь можно отнести к группе, подлежащих восстановлению, так как износ детали превышает допустимые значения, устранение которых по техническим и экономическим соображениям целесообразно.

**2. Выбор способа восстановления** проводится согласно технологическому критерию, критерию долговечности и технико-экономическому критерию ($К_{тэ}$). Правильность выбранного варианта восстановления определяется с помощью технико-экономического анализа. Такой анализ осуществляется по технологической себестоимости. В технологическую себестоимость включаются затраты на материал, основная заработная плата с начислениями и расходы на

амортизацию оборудования, приспособления, инструмента и электроэнергию.

По данным расчета выбираем способ восстановления детали с наименьшим $K_{тэ}$.

**3. Разработка технологического маршрута восстановления.** Следует иметь в виду, что перед нанесением покрытия необходимо проводить механическую обработку поверхности детали, чтобы пространственно разделить межфазную границу покрытия – деталь и плоскость действия наибольших касательных напряжений. В противном случае, при дальнейшей механической обработке или при эксплуатации, может произойти локальное или полное отделение покрытия от детали, что сведет на нет все усилия по ее восстановлению.

**4. Выбор оборудования, приспособлений, инструмента для механической обработки** производится с учётом типа производства, материала детали и т. п.

Выбор оборудования проводится с учётом типа производства и числа деталей в партии.

**5. Расчет припусков при восстановлении размеров детали**. Определяют припуски на обработку и рассчитывается толщина наращиваемого слоя.

Толщина наращиваемого слоя при восстановлении на сторону

$$t = u + \rho + t_{предв} + t_{чист} + t_{черн},$$

где $u$ – износ поверхности на сторону;

$\rho$ – искажение геометрической формы изношенной поверхности:

$t_{предв.}$ – припуск на предварительною обработку перед восстановлением;

$t_{чист.}$ – припуск на чистовую обработку;

$t_{черн.}$ – припуск на черновую обработку.

**6. Расчёт режимов восстановления, механической обработки и нормирование операции (**рассмотрен в [5]).

Проверка правильности назначения режимов резания по мощности станка, кВт

$$N_{рез} = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60} \le N_{ст},$$

где $N_{ст}$ – мощность двигателя на станке.

Нормирование операций механической обработки – определение полного времени восстановления детали.

**7. Разработка технической документации.**

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Воробьев Л. К.* Технология машиностроения и ремонт машин. – М.: Высшая школа, 1981. – 344 с.

*Дмитриев В. Т ., Боярских Г. А.* Проектирование технологических процессов восстановления деталей и ремонтных баз горных предприятий. – Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2001. – 140 с.

*Егоров М. Е., Дементьев В. И., Дмитриев В. Л.* Технология машиностроения. – М.: Высшая школа, 1976. – 533 с.

*Технология машиностроения*: В 2-х кн. Кн. 1. Основы технологии машиностроения: учеб. пос. для вузов / Э. Л. Жуков, И. И. Козарь, С. Л. Мурашкин; под редакцией С. Л. Мурашкина. – М.: Высшая школа, 2003. – 278 с.

*Технология машиностроения*: В 2-х кн. Кн. 2. Производство деталей машин: Учеб. пос. для вузов / Э. Л. Жуков, И. И. Козарь, С. Л. Мурашкин [и др.]; под редакцией С. Л. Мурашкина. – М.: Высшая школа, 2003. – 295 с.

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ ..... 3
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ..... 4
1.1. Производственный и технологический процессы ..... 4
1.2. Типы производства, формы организации и виды технологических процессов ..... 6
1.3. Структура технологического процесса и его основные характеристики .. 8
2. ТИПЫ ПРОИЗВОДСТВА ..... 12
3. КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОБРАБОТАННЫХДЕТАЛЕЙ ... 19
3.1. Влияние качества поверхностного слоя на эксплуатационные свойства детали ..... 19
3.2. Факторы, влияющие на качество поверхностного слоя ..... 23
3.3. Изменение физико-механических свойств поверхностного слоя ..... 25
3.4. Технологическая наследственность ..... 26
3.5. Методы оценки качества поверхностного слоя ..... 32
4. БАЗЫ И БАЗИРОВАНИЕ ..... 33
4.1. Основные принципы выбора баз ..... 34
4.2. Правило шести точек при базировании ..... 36
5. ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ ..... 37
5.1.Факторы, влияющие на точность обработки ..... 38
5.2. Определение погрешностей обработки ..... 40
6. ПРИПУСКИ НА ОБРАБОТКУ ..... 45
6.1. Определение и основные понятия ..... 45
6.2. Факторы, влияющие на величину припуска ..... 47
6.3. Методы расчета припуска ..... 49
7. ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОГО НОРМИРОВАНИЯ ..... 50
7.1. Состав нормы времени ..... 51
7.2. Методы определения нормы времени ..... 51
8. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ..... 54
8.1. Выбор заготовок и методов их изготовления ..... 54
8.2. Виды технологических процессов и технологическая документация ..... 64
8.3. Основы построения технологического маршрута и выбор метода обработки детали ..... 66
8.4. Проектирование технологических процессов сборки ..... 71
8.5. Проектирование технологических процессов восстановления деталей. 76
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ..... 79

Учебное издание

Татьяна Петровна Глинникова
Сергей Александрович Волегов

# ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

*Учебное пособие*
по курсу «Технология машиностроения»
для студентов специальности
130602 – «Машины и оборудование
нефтяных и газовых промыслов» (МНГ)
направления
130600 – «Оборудование и агрегаты
нефтегазового производства»
*очного и заочного обучения*

Редактор *В. В. Баклаева*

Подписано в печать
Бумага писчая. Формат бумаги 60 × 84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. 5,0. Уч. изд. л. 4,65. Тираж 180 экз. Заказ №

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уральский государственный горный университет»

Т. П. Глинникова, С. А. Волегов

# ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

***Справочно-методическое пособие***
**по заполнению технологических карт**
**15.03.01«Машиностроение»,**
***очного и заочного обучения***

**Екатеринбург**
**2019**

Федеральное агентство по образованию
ГОУ ВПО
«Уральский государственный горный университет»

Т. П. Глинникова, С. А. Волегов

# ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

*Справочно-методическое пособие*
по заполнению технологических карт «Оборудование и технология повышения износостойкости и восстановления деталей машин и аппаратов» (МШС) направление 150700.62 «Машиностроение», 151000 –«Технологические машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов» (ТМО) и среднего профессионального образования 151031 – «Монтаж и техническая эксплуатация промышленного оборудования (по отраслям)» *очного и заочного обучения*

Издание УГГУ Екатеринбург, 2008

**Г54**

Рецензент: *М .Л. Хазин*, д-р техн. наук, профессор кафедры ЭГО
Уральского государственного горного университета

Справочно-методическое пособие рассмотрено на заседании кафедры

эксплуатации горного оборудования г. (протокол № ) и рекомендован для издания в УГГУ

Глинникова Т. П., Волегов С. А.
Г54 ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ / Справочно-методическое пособие по оформлению технологических карт.
Т. П. Глинникова, С. А Волегов – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2008. – 54 с.

В справочно-методическом пособии рассмотрены основные требования стандартов 1974 и 1982 г.г. по оформлению маршрутных и операционных карт, карт эскизов, а также основные правила записи технологических переходов и базирования деталей с методическими указаниями и примерами.

Для студентов направления 150700.62 – «Машиностроение», направления 151000 – «Технологические машины и оборудование» и среднего специального образования 151031 «Монтаж и эксплуатация промышленного оборудования» очного и заочного обучения.

© Глинникова Т. П., Волегов С. А., 2011
© Уральский государственный горный университет, 2011

# ОФОРМЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Разработка технологического процесса механической обработки детали заканчивается составлением и оформлением комплекта документов технологического процесса.

Состав и формы карт, входящих в комплект документов, зависят от вида технологического процесса (единичный, типовой или групповой), типа производства и степени использования разработчиком средств вычислительной техники и автоматизированной системы управления производством.

В маршрутном технологическом процессе содержание операций излагается только в маршрутной карте без указания технологических переходов. Этот процесс применяется в единичном и мелкосерийном типах производства.

В операционном технологическом процессе маршрутная карта содержит только наименование всех операций в технологической последовательности, включая контроль и перемещение, перечень документов, применяемых при выполнении операции, технологическое оборудование и трудозатраты. Сами операции разрабатываются на операционных картах. Применяется при серийном типе производства.

В маршрутно-операционном технологическом процессе, применяемом при крупносерийном и массовом типах производства, предусматривается краткое описание содержания отдельных операций в маршрутной карте, а остальные операции оформляются на операционных картах.

При выполнении курсового и дипломного проектирования студентами рекомендуется операционная или маршрутно-операционная степень детализации описания технологического процесса. ***Конкретно степень детализации описания технологического процесса оговаривается с руководителем работы (!).***

# 1.МАРШРУТНАЯ КАРТА

Маршрутная карта является основным и обязательным документом любого технологического процесса. Формы и правила оформления маршрутных карт, применяемых при отработке технологических процессов изготовления или ремонта изделий в основном и вспомогательном производствах, регламентированы согласно ГОСТ 3.1118–82 форма 1 (Формы и правила оформления маршрутных карт) **или ГОСТ 3.1105–74 форма 3.**

К заполнению граф технологических документов предъявляются следующие требования (ГОСТ 3.1118–82 форма 1).

Каждая строка мысленно делится по горизонтали пополам и информацию записывают в нижней ее части, оставляя верхнюю часть свободной для внесения изменений.

Для изложения технологических процессов в маршрутной карте используют способ заполнения, при котором информацию вносят построчно несколькими типами строк. Каждому типу строки соответствует свой служебный символ. Служебные символы условно выражают состав информации, размещаемой в графах данного типа строки формы документа, и предназначены для обработки содержащейся информации средствами механизации и автоматизации. Простановка служебных символов является обязательной в любом случае. В качестве обозначения служебных символов приняты прописные буквы русского алфавита, проставляемые перед номером соответствующей строки. Указание соответствующих служебных символов для типов строк в зависимости от размещаемого состава ин-

формации в графах маршрутной карты следует выполнять в соответствии с табл. 1. При заполнении информации на строках, имеющих служебный символ «*О*», следует руководствоваться требованиями, которые устанавливают правила записи операций и переходов (разд. 2).

При операционном описании технологического процесса на маршрутной карте номер перехода следует проставлять в начале строки.

При заполнении информации на строках, имеющих служебный символ «*Т*», следует руководствоваться требованиями соответствующих классификаторов, государственных и отраслевых стандартов на кодирование (обозначение) и наименование технологической оснастки.

Информацию о применяемой на операции технологической оснастке записывают в следующей последовательности:

1) приспособления;

2) вспомогательный инструмент;

3) режущий инструмент;

4) слесарно-монтажный инструмент;

5) специальный инструмент;

6) средства измерения.

Разделение информации по каждому средству технологической оснастки следует выполнять через знак «;» .Сведения, вносимые в отдельные графы и строки маршрутной карты, выбираются из табл. 2. Для удобства поиска соответствующих граф карты номера пунктов таблицы продублированы выносными линиями на полях

рис. 1.

**Основные надписи в маршрутной карте (ГОСТ 3.1105–74 форма 3) следует выполнять в соответствии с указанием табл. П2.1. и рис. П2.1, рис. П2.2.**

Таблица 1

**Сведения, вносимые в графы, расположенные на строке маршрутной карты**

| Обозначение служебного символа | Содержание информации, вносимой в графы, расположенные на строке |
|---|---|
| *А* | Номер цеха, участка, рабочего места, где выполняется операция; код и наименование операции |
| *Б* | Код, наименование оборудования и информация по трудозатратам |
| *К* | Информация о комплектации изделия (сборочной единицы) составными частями с указанием наименования деталей, сборочных единиц, их обозначений, кода единицы величины, единицы нормирования, количества на изделие и нормы расхода |
| *М* | Информация о применяемом основном материале и исходной заготовке, о применяемых исходных и комплектующих материалах, кодах единицы величины, единицы нормирования, количестве на изделие и нормы расхода |
| *О* | Содержание операции (перехода) |
| *Т* | Информация о применяемой при выполнении операции технологической оснастке |
| *Р* | Информация о режимах обработки |

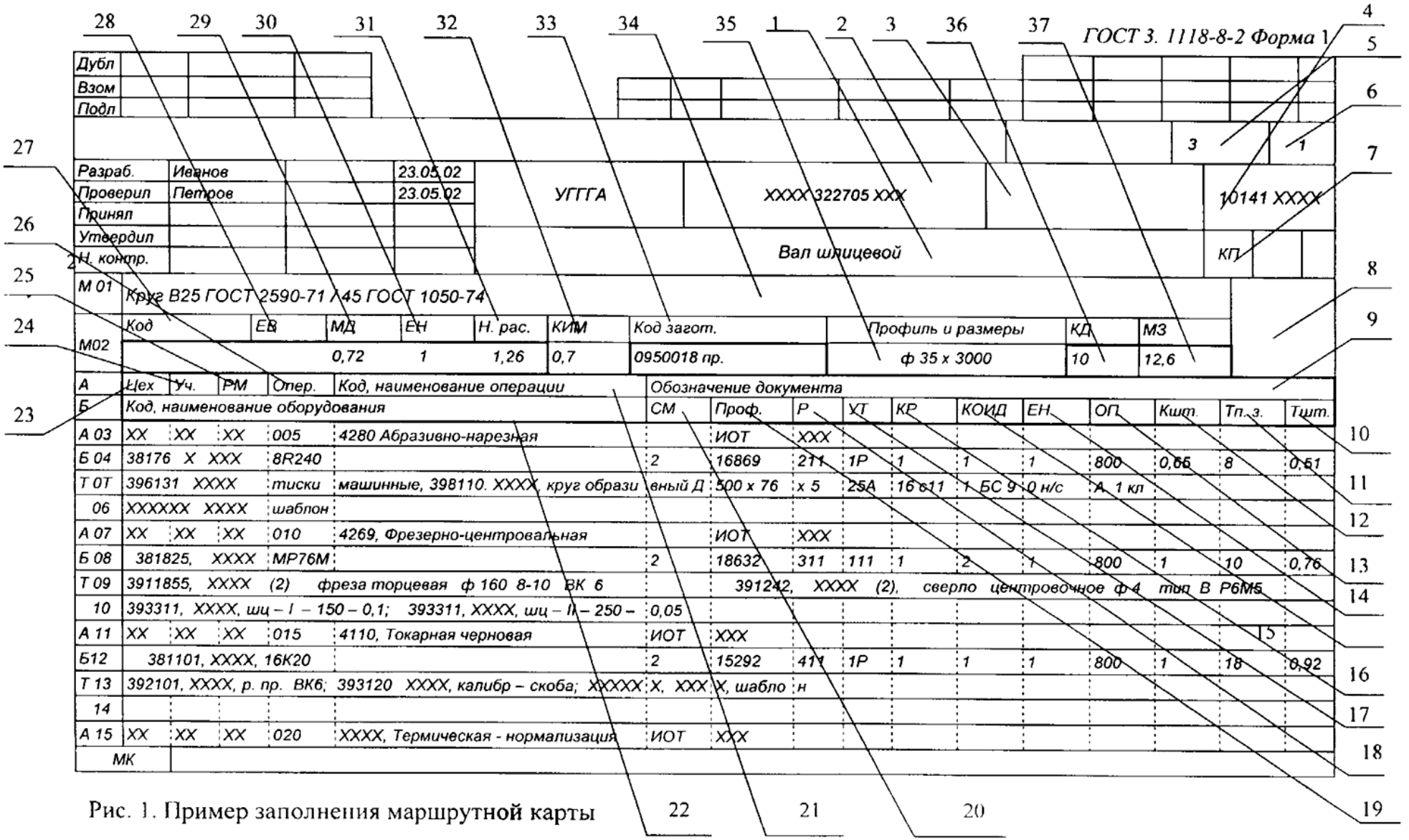



Рис. 1. Пример заполнения маршрутной карты

Таблица 2

**Сведения, вносимые в отдельные графы и строки маршрутной карты**

| Номер пункта поиска | Наименование (условное обозначение графы) | Служебный символ | Содержание информации |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | – | – | Наименование изделия (детали, сборочной единицы) по основному конструкторскому документу |
| 2 | – | – | Обозначение изделия по основному конструкторскому документу или код ступени классификации по конструкторскому классификатору |
| 3 | – | – | Код классификационных группировок технологических признаков для типовых и групповых технологических процессов по технологическому классификатору [1,2] |
| 4 | – | – | Обозначение документа по ГОСТ 3.1201-85 (Система обозначения технологической документации) |
| 5 | – | – | Общее количество листов документа |
| 6 | – | – | Порядковый номер листа документа |
| 7 | – | – | Литера, присвоенная технологическому документу. При дипломном проектировании записывать «*ДП*», при курсовом – «*КП*» |
| 8 | – | – | Графа для особых указаний |
| 9 | обозначение документа | | Обозначение документов, применяемых при выполнении данной операции, например, *ИОТ* – инструкция по охране труда |
| 10 | $T_{шт.}$ | *Б* | Норма штучного времени на операцию, мин |
| 11 | $T_{п.з.}$ | *Б* | Норма подготовительно-заключительного времени на операцию, мин |

Продолжение табл. 2

<table>
<tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr>
<tr><td rowspan="3">12</td><td rowspan="3">$К_{шт}$</td><td rowspan="3">Б</td><td>Коэффициент штучного времени при многостаночном обслуживании, зависящий от количества обслуживаемых станков</td></tr>
<tr><td><table>
<tr><td>Количество станков</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td></tr>
<tr><td>$К_{шт}$</td><td>1</td><td>0,65</td><td>0,48</td><td>0,39</td><td>0,35</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td></td></tr>
<tr><td>13</td><td>ОП</td><td>Б</td><td>Объем производственной партии, штуки</td></tr>
<tr><td>14</td><td>ЕН</td><td>М02 Б</td><td>Единица нормирования, на которую установлена норма расхода материала</td></tr>
<tr><td>15</td><td>КОИД</td><td>Б</td><td>Количество одновременно обрабатываемых заготовок при выполнении одной операции</td></tr>
<tr><td>16</td><td>КР</td><td>Б</td><td>Количество исполнителей, занятых при выполнении операции</td></tr>
<tr><td>17</td><td>УТ</td><td>Б</td><td>Код условий труда. Включает в себя цифру – условия труда:<br>1 – нормальные;<br>2 – тяжелые и вредные;<br>3 – особо тяжелые, особо вредные;<br>и букву, указывающую вид нормы времени:<br>Р – аналитически-расчетная;<br>И – аналитически-исследовательская;<br>Х – хронометражная;<br>О – опытно-статистическая.</td></tr>
<tr><td>18</td><td>Р</td><td>Б</td><td>Разряд работы, необходимый для выполнения операции. Код включает три цифры: первая – разряд работы по тарифно-квалификационному справочнику,<br>две следующие – код формы и системы оплаты труда:<br>10 – сдельная форма оплаты труда;<br>11 – сдельная система оплаты труда прямая;<br>12 – сдельная система оплаты труда премиальная;<br>13 – сдельная система оплаты труда прогрессивная;<br>20 – повременная форма оплаты труда;<br>21 – повременная система оплаты труда простая;<br>22 – повременная система оплаты труда премиальная</td></tr>
</table>

Продолжение табл. 2

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| 19 | *ПРОФ.* | *Б* | Код профессии согласно классификатору |
| 20 | *СМ* | *Б* | Код степени механизации труда.<br>Указывается цифрой:<br>1 – наблюдение за работой автоматов;<br>2 – работа с помощью машин и автоматов;<br>3 – вручную при машинах и автоматах:<br>4 – вручную без машин и автоматов;<br>5 – вручную при наладке машин |
| 21 | *Код, наименование оборудования* | *Б* | Код оборудования. Включает в себя высшую (шесть первых цифр) и низшую (четыре цифры после точки) классификационные группировки |
| 22 | *Код, наименование операции* | *А* | Код операции согласно классификатору технологических операций |
| 23 | *Цех* | *А* | Номер цеха, в котором выполняется операция |
| 24 | *Уч.* | *А* | Номер участка |
| 25 | *РМ* | *А* | Номер рабочего места (В курсовом проекте позиции 23, 24, 25 заполняются условным кодом «ХХ») |
| 26 | *Опер* | *А* | Номер операции в технологической последовательности изготовления, контроля и перемещения. Рекомендуемая нумерация операций: 000, 005, 010 и т. д. |
| 27 | *Код* | *М02* | Код материала. Графа не заполняется, ставится прочерк |
| 28 | *ЕВ* | *М02* | Код единицы величины - массы, длины, площади и т. п. детали или заготовки. Для массы, указанной в «кг» – код 166; в «г» – 163; в «т» – 168. Допускается вместо кода указывать единицы измерения величины |

Окончание табл. 2

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| 29 | *МД* | *М02* | Масса детали по конструкторскому документу |
| 30 | *ЕН* | *М02, Б* | Единица нормирования, на которую установлена норма расхода материала или норма времени, например, 1, 10, 100 |
| 31 | $Н_{расх}$ | *М02, К* | Норма расхода материала |
| 32 | *КИМ* | *М02* | Коэффициент использования материала |
| 33 | *Код заготовки* | *М02* | Код заготовки по классификатору. Допускается указывать вид заготовки (отливка, прокат, штамповка и т. д.) |
| 34 | – | *М01* | Наименование, сортамент, размер и марка материала, обозначение стандарта, технических условий. Запись выполняется на уровне одной строки с применением разделительного знака дроби «/», например лист БОН-2,5×1000×2500 ГОСТ 19903-74/Ш–IVВ ст. 3 ГОСТ 14637–79 |
| 35 | *Профиль и размеры* | *М02* | Обозначение профиля и размера заготовок. Рекомендуется указывать толщину, ширину и длину, сторону квадрата или диаметр и длину, например, 20×50×300, диаметром 35. Профиль допускается не указывать |
| 36 | *КД* | *М02* | Количество деталей, изготавливаемых из одной заготовки |
| 37 | *МЗ* | *М02* | Масса заготовки |

*Примечание.* Установлена пятизначная структура основного кода характеристики документации (ХХХХХ).

Первые две цифры – вид документации:

01 – комплект технологической документации;

10 – маршрутная карта;

20 – карта эскизов;

42 – ведомость оснастки;

44 – ведомость деталей к типовому (групповому) технологическому процессу (операции);

60 – операционная карта;

62 – карта наладки;

67 – карта кодирования информации.

Третья цифра – вид технологического процесса (операции) по организации:

0 – без указания;

1 – единичный процесс (операция);

2 – типовой процесс (операция);

3 – групповой процесс (операция).

Последние две цифры - вид технологического процесса по методу выполнения:

00 – без указания;

02,03 – технический контроль;

41,42 – обработка резанием;

50, 51 – термообработка.

21 – обработка давлением;

04 – перемещение

***Пример***. Маршрутная карта единичного процесса обработки резанием – 10141.XXXX. Последние четыре разряда (XXXX) – резерв дополнительного обозначения по отраслевому классификатору.

Наименование операции обработки резанием должно отражать применяемый вид оборудования и записываться именем прилагательным в именительном падеже в соответствии с табл.3.

Таблица 3

**Группы операции обработки резанием**

| Наименование группы операций | Применяемое оборудование (станки) |
|---|---|
| 1 | 2 |
| Автоматно-линейная | Автоматические линии |
| Агрегатная | Агрегатные |
| Долбёжная | Долбёжные |
| Зубообрабатывающая | Зубофрезерные, зубострогальные, зубошлифовальные и др. |

Продолжение табл. 3

| 1 | 2 |
|---|---|
| Комбинированная | Сверлильно-фрезерные и др. |
| Отделочная | Хонинговальные, суперфинишные, доводочные, полировальные |
| Отрезная | Отрезные |
| Программная | Станки с программным управлением |
| Протяжная | Протяжные |
| Расточная | Расточные |
| Резьбонарезная | Гайконарезные, резьбофрезерные и др. |
| Сверлильная | Сверлильные |
| Строгальная | Строгальные |
| Токарная | Токарные, токарно-винторезные, многорезцовые и др. |
| Фрезерная | Фрезерные (кроме зубо-резьбофрезерных) |
| Шлифовальная | Шлифовальные (кроме зубошлифовальных) |

## 2.ОПЕРАЦИОННАЯ КАРТА

Структура построения операционной карты (ОК) идентична маршрутной. Запись информации выполняется построчно с привязкой к соответствующим служебным символам (разд. 1).

***Операционная карта механической обработки по ГОСТ 3.1404–74 форма 1 составляется на конкретную операцию и заполняется в соответствии указаниями табл. П2.2, П3.1, П3.2 и рис. П2.2.***

Указание единиц величины следует выполнять в заголовках или подзаголовках соответствующих граф. Допускается указывать единицы величины параметров технологических режимов после их числовых значений, например, 40 мм; 0,2 мм /об; 36 мм /мин.

Указание данных по технологическим режимам следует выполнять после записи состава применяемой технологической оснастки.

При указании данных по технологической оснастке информацию следует записывать в следующей последовательности:

1) приспособления;

2) вспомогательный инструмент;

3) режущий инструмент;

4) средства измерения.

В целях разделения информации по группам технологической оснастки и поиска необходимой информации допускается перед указанием состава применять условное обозначение видов: приспособлений – «*ПР*»; вспомогательного инструмента – «*ВИ*»; режущего инструмента – «*РИ*»; средств измерений – «*СИ*». Например, ***СИ. АВВХХХ. Пробка 24Н7 - пр.***

При описании содержания перехода необходимо указывать данные по $T_О$ и $T_В$. Это следует выполнять на уровне строки, где заканчивается описание содержания перехода под служебным символом «*О*».

Большинство граф операционной карты соответствует аналогичным графам маршрутной карты. Информацию по дополнительным графам следует вносить в соответствии с рис. 2 и табл. 4.

Запись содержания перехода следует выполнять в соответствии с рекомендациями табл. П3.1 и П3.2. Полную запись делают при необходимости перечисления всех выдерживаемых размеров. Сокращенная используется при ссылке на условное обозначение

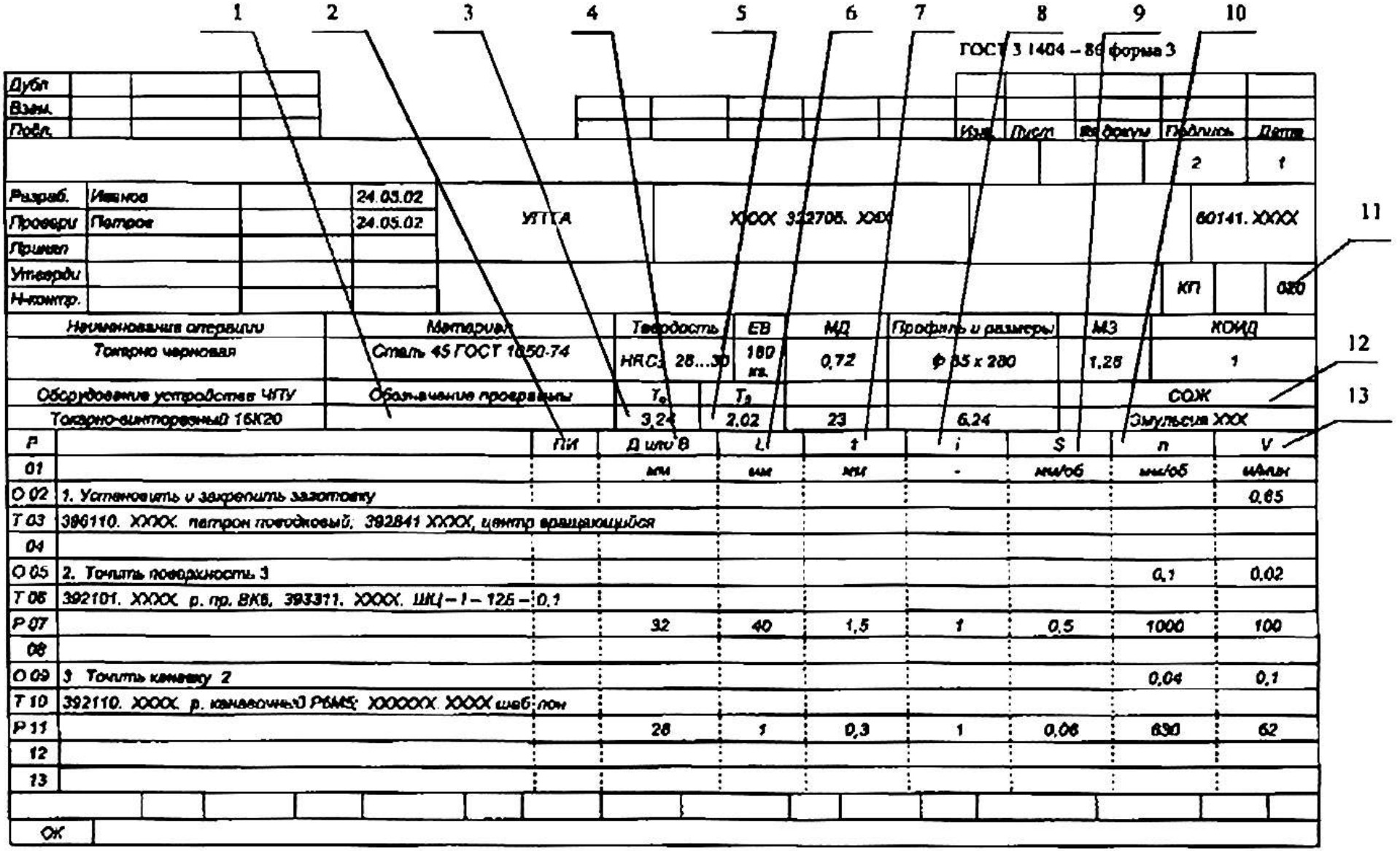



Рис. 2. Пример заполнения операционной карты

конструктивного элемента обрабатываемого изделия. Данная запись выполняется ***при достаточной графической*** информации. Для промежуточных переходов, не имеющих графических иллюстраций, в содержании следует указывать исполнительные размеры с их предельными отклонениями и при необходимости шероховатость обработанной поверхности и другие технические требования. Например, «Точить поверхность 3, выдерживая $d = 40_{-0,34}$ и $l = 100 \pm 0,4$».

Таблица 4

**Информация по дополнительным графам операционной карты**

| Номер пункта поиска | Наименование (условное обозначение графы) | Содержание информации |
|---|---|---|
| 1 | – | Графы для записи содержания перехода, информации по оснастке, режущему и измерительному инструменту |
| 2 | *ПИ* | Номер позиции инструментальной наладки. Графа заполняется для станков с ЧПУ |
| 3 | $T_О$ | Норма основного времени на операцию, мин |
| 4 | *Д* или *В* | Расчетный размер обрабатываемого диаметра (ширины) детали. Данные по "*Д*" или "*В*" указываются с учетом величины врезания и перебега |
| 5 | $T_В$ | Норма вспомогательного времени на операцию, мин |
| 6 | $L$ | Расчетный размер длины рабочего хода с учетом величины врезания и перебега |
| 7 | $t$ | Глубина резания |
| 8 | $i$ | Число рабочих ходов |
| 9 | $S$ | Подача |
| 10 | $n$ | Частота вращения шпинделя |
| 11 | $V$ | Скорость резания |
| 12 | – | Номер операции |
| 13 | *СОЖ* | Информация по применяемой смазочно-охлаждающей жидкости |

Переходы (основные и вспомогательные) нумеруются арабскими цифрами 1, 2, 3 ***... ( Для карт по ГОСТ 3.1404-74 форма 1 и 1а вспомогательные переходы обозначаются прописными буквами РУССКОГО алфавита: А, Б, В, Г и т. д. Например, « А Установить и закрепить заготовку »). Прием «Снять деталь » указывается в конце операции.***

В общем случае в содержание перехода включается:

1) ключевое слово, характеризующее метод обработки, выраженное глаголом в неопределенной форме (табл. 5);

2) наименование (существительное в винительном падеже) обрабатываемой поверхности, конструктивных элементов или предметов производства, например, «отверстие», «фаску», «канавку», «заготовку» и т. п.

3) информация о размерах обработки резанием или их условных обозначений, приведенных на операционных эскизах и указанных там арабскими цифрами в окружности диаметром 6 ... 8 мм (табл. П1.1 и П1.2);

4) дополнительная информация, характеризующая количество одновременно или последовательно обрабатываемых поверхностей, характер обработки, например, «предварительно», «последовательно», «по копиру», «начерно», «начисто».

**Основные надписи операционной карты (ГОСТ 3.1404-74 форма 1 и 1а) следует выполнять в соответствии с указанием табл. П3.2 и рис. П2.2.**

Параметры шероховатости обрабатываемой поверхности указываются только обозначениями на операционном эскизе. Допуска-

ется указывать в тексте содержание операции информацию о параметре шероховатости предварительно обрабатываемых поверхностей (промежуточных переходов), если это нельзя указать на операционном эскизе, например, «фрезеровать предварительно поверхность *1*, выдерживая высоту 70 ± 0,5, *Rz* = 50».

## 3.КАРТА ЭСКИЗОВ

*Карта эскизов* – основной графический документ, дающий наглядную информацию о выполняемой технологической операции.

Эскизы следует выполнять с соблюдением масштаба или без соблюдения масштаба, но с примерным соблюдением пропорций. При разработке технологической операции необходимо помнить, что сначала разрабатывается и полностью оформляется эскиз на карте эскизов. На рис. 3 **(и рис. П2.3)** представлены примеры оформления карты эскизов. Нумерация обрабатываемых поверхностей (табл. П3.2), проставляемая в кружочках, начинается с цифры 1. Последовательность простановки номеров в кружочках рекомендуется вести по ходу часовой стрелки. Нумерация относится только ***к конкретной рассматриваемой операции*** (установу). На последующих операциях (установах) нумерация опять начинается с цифры 1. При этом, естественно, одна и та же поверхность заготовки на разных операциях (установах) может иметь различный номер.

***На карте эскизов деталь изображается в таком виде, как она обрабатывается на станке. На карте эскизов указывают те***

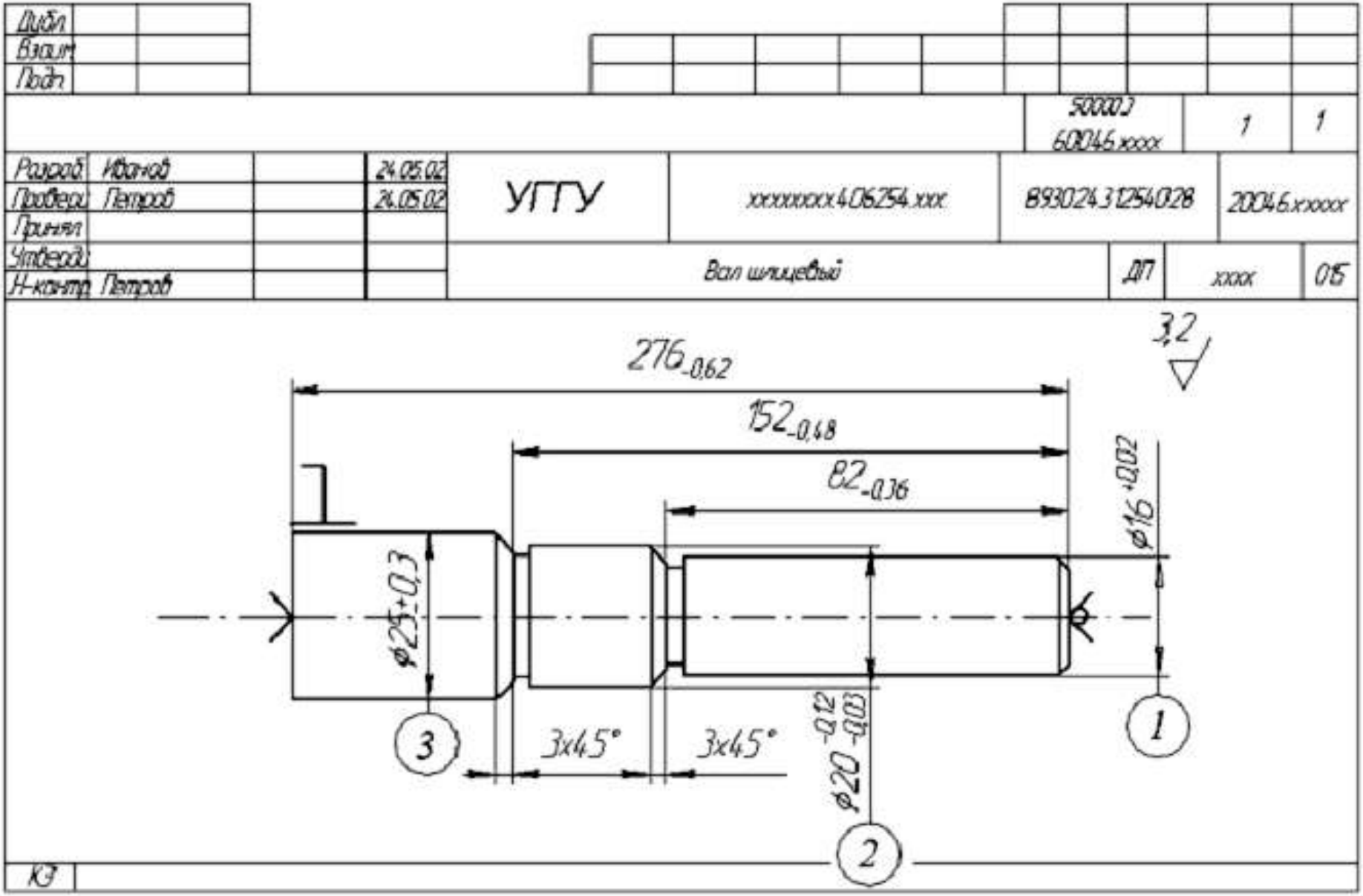



Рис.3 Пример заполнения карты эскизов

***размеры, которые выполняются на данной операции (!). Размеры, допуски и высота шероховатости указываются такими, какие будут получены после выполнения рассматриваемой операции (!).***

Обрабатываемые поверхности выделяются ***цветом*** или ***жирными*** линиями и обозначаются цифрами в кружочках. При этом возможны два варианта см. табл. П3.1.

При заполнении основной надписи в карте эскизов (в верхней части) необходимо помнить, что средняя графа из трех граф, обведенных жирной линией (пункт 3 табл. 2), не заполняется.

**Основные надписи на карте эскизов (ГОСТ 3.1103–74 форма 5) следует выполнять в соответствии с указанием табл. П3.3 – П3.6 и рис. П2.3.**

Для большей наглядности в курсовых и дипломных проектах некоторые эскизы, по согласованию с руководителем, оформляются на листе формата А1 в полуконструктивном виде (эскизы наладок). При этом на одном листе формата А1 можно разместить от двух до четырех эскизов. На эскизе наладки показывается все то же, что и на карте эскизов, и дополнительная информация:

– теоретическая схема базирования заготовки выполняется по ГОСТ 21495–76 (Базирование и базы в машиностроении) либо по [3]; при этом опорные точки рекомендуется выполнить цветным карандашом (красным, зеленым), чтобы отличить их от условных знаков опор, зажимов приспособления;

– режущий инструмент;

– траектория движения режущего инструмента для станков с

ЧПУ (по мере необходимости);

– таблица с режимами резания;

– некоторые элементы конструкции станочного приспособления (по мере необходимости). Над каждым эскизом наладки указывается наименование операции, ее номер согласно маршрутной карте и модель технологического оборудования (станка).

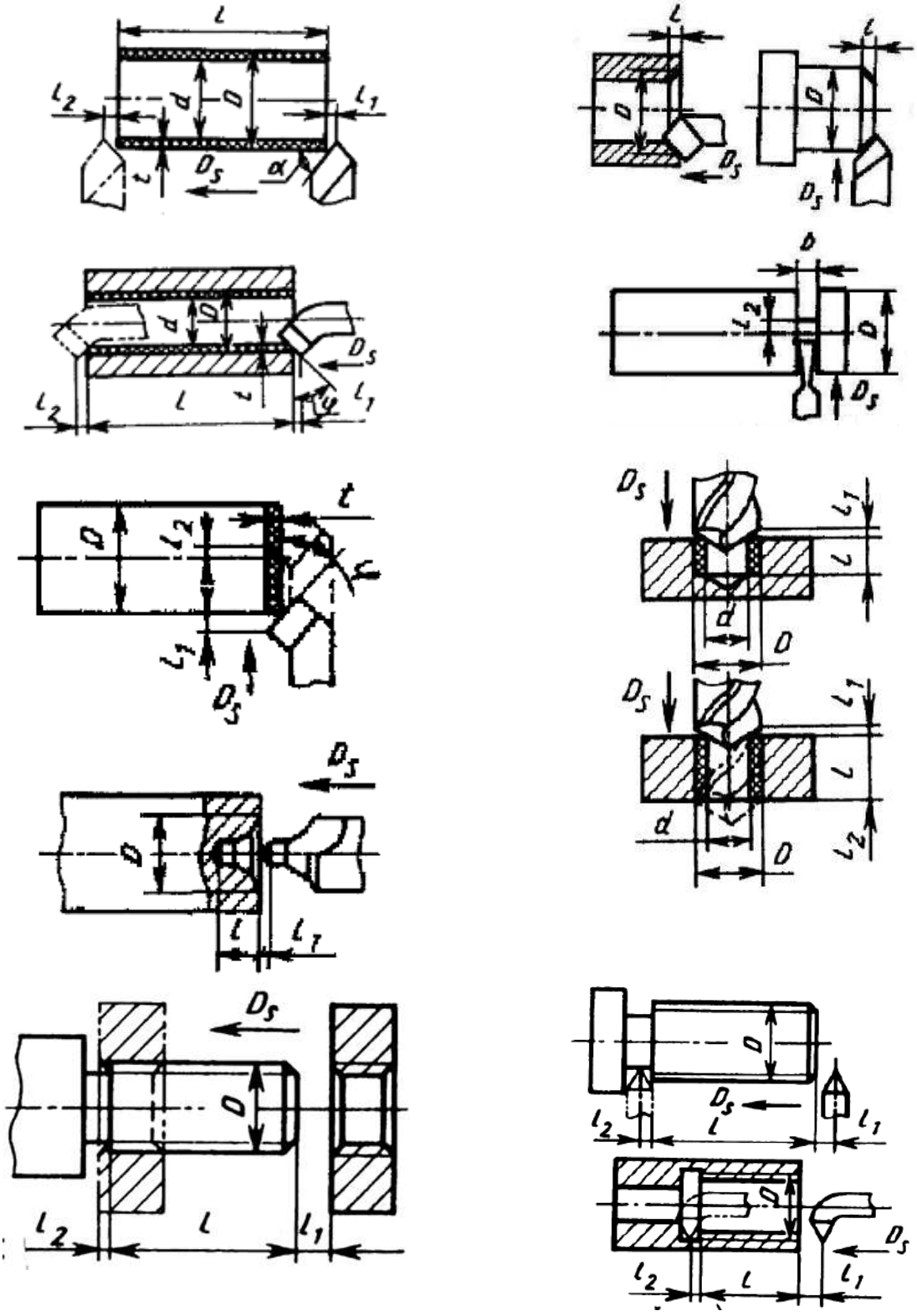
Таблица 5

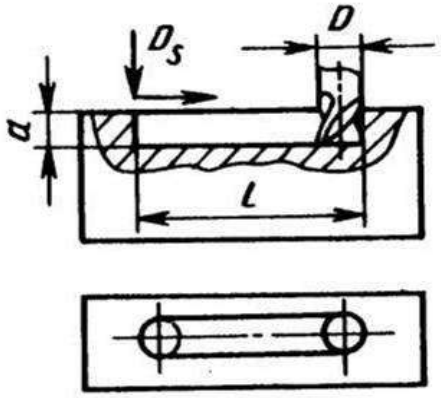
**Ключевые слова технологических переходов**

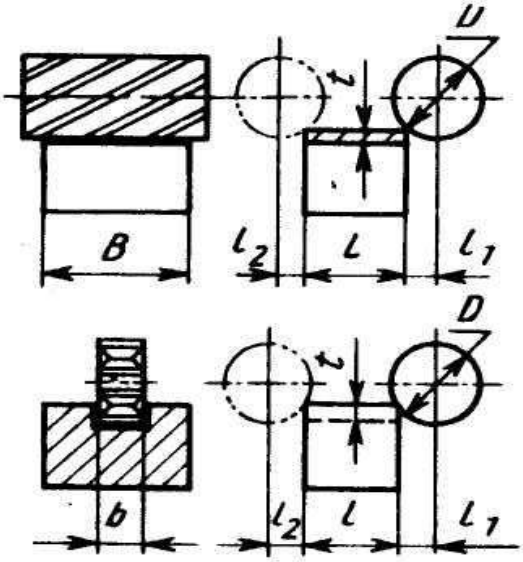
| Вид механической обработки | Ключевое слово при обработке резанием |
|---|---|
| Точение | Точить |
| Растачивание | Расточить |
| Сверление | Сверлить |
| Рассверливание | Рассверлить |
| Развертывание | Развернуть |
| Протягивание | Протянуть |
| Долбление | Долбить |
| Зенкерование | Зенкеровать |
| Зенкование | Зенковать |
| Фрезерование | Фрезеровать |
| Отрезание | Отрезать |
| Подрезание | Подрезать |
| Полирование | Полировать |
| Шлифование | Шлифовать |
| Центрование | Центровать |
| Шевингование | Шевинговать |
| Переустановка и закрепление | Переустановить и закрепить |
| Установка и закрепление | Установить и закрепить |
| Суперфиниш | Суперфинишировать |
| Снятие | Снять |
| Переустановка | Переустановить |
| Закрепление | Закрепить |

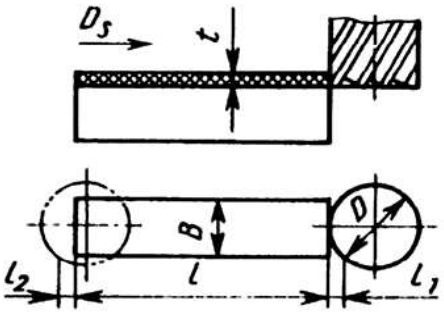
**ПРИЛОЖЕНИЕ 1**

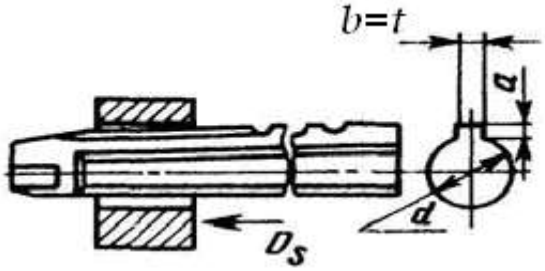
## Глубина резания *t* для некоторых методов обработки

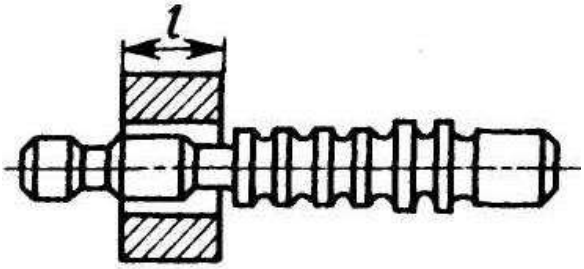


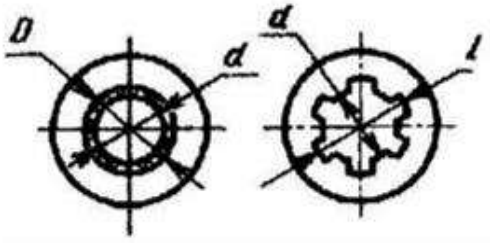

D
$D_S$
a
l

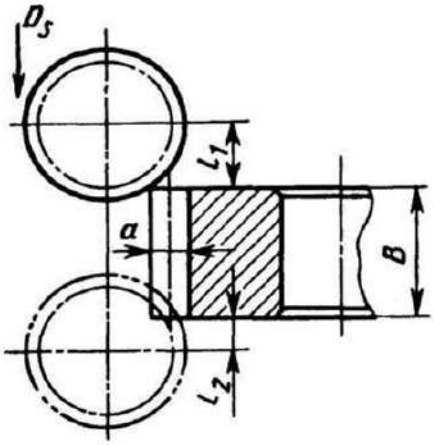

U
t
B
$l_2$
l
$l_1$
D
t
b
$l_2$
l
$l_1$

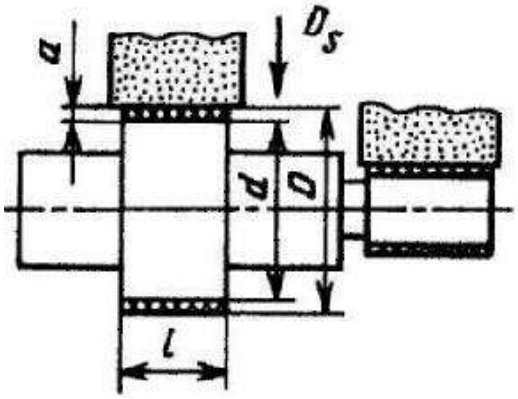

$D_S$
t
B
D
$l_2$
l
$l_1$

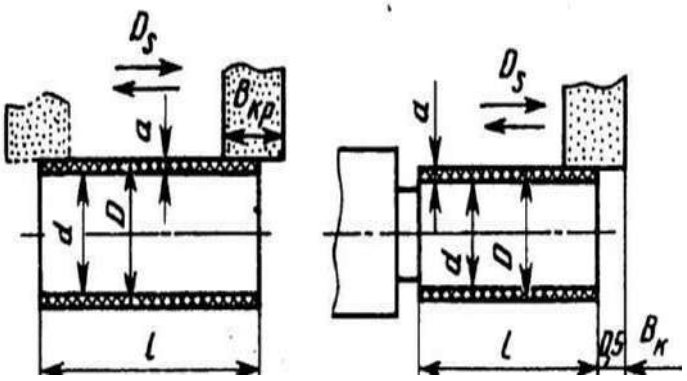

b=t
a
d
$D_S$

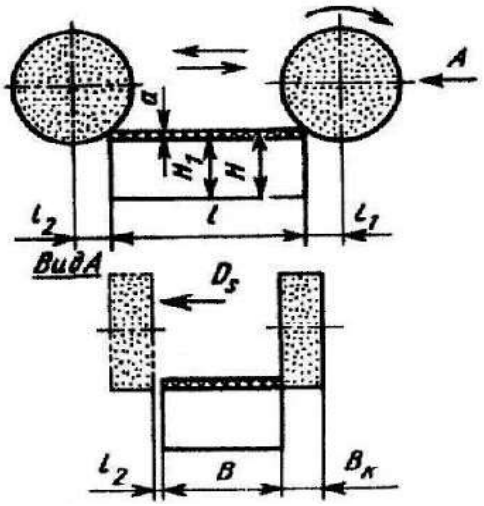

l

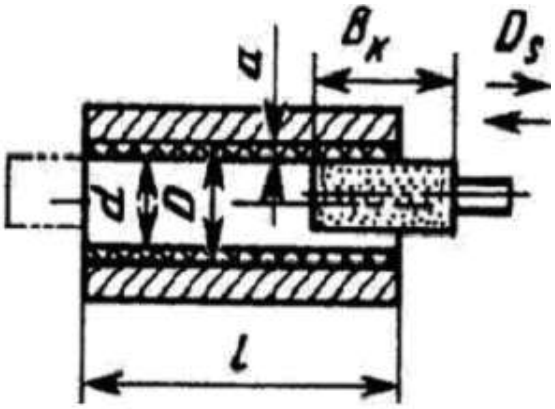

D
d
d
l

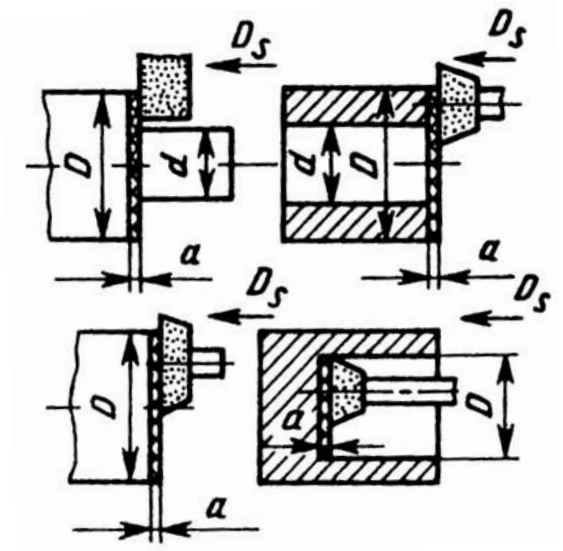

$D_S$
$l_1$
a
B
$l_2$

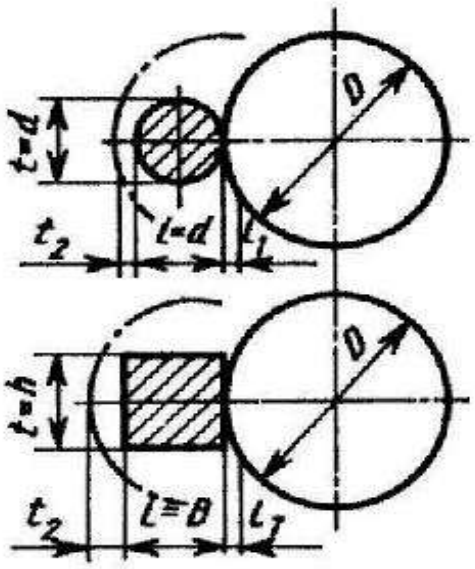

a
$D_S$
d
D
l

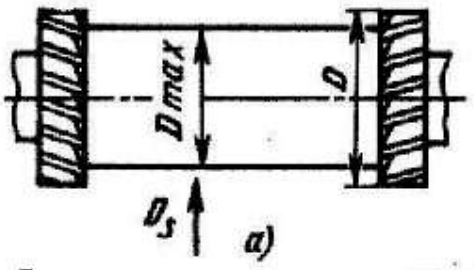

$D_S$
$B_{кр}$
a
d
D
l
$D_S$
a
d
D
l
0,5
$B_к$

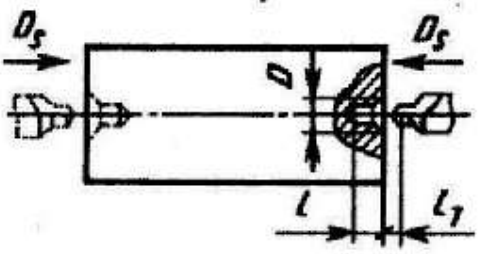

A
a
$H_1$
H
$l_2$
l
$l_1$
Вид A
$D_S$
$l_2$
B
$B_к$


a
$B_к$
$D_S$
d
D
l


$D_S$
$D_S$
D
d
d
D
a
a
$D_S$
$D_S$
D
a
D
a


D
t=d
$t_2$
l=d
$l_1$
D
t=h
$t_2$
l=B
$l_1$


$D_{max}$
D
$D_S$
a)


$D_S$
$D_S$
D
l
$l_1$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

# Оформление карт по ГОСТ 3.1404 - 74

Таблица П2.1

**Сведения, вносимые в отдельные графы и строки маршрутной карты**

| Номер графы | Содержание графы |
|---|---|
| 1 | 2 |
| 1 | Наименование организации разработчика технологического процесса (кафедра ЭГО) |
| 2 | Обозначение детали по конструкторскому документу |
| 3 | Наименование детали по конструкторскому документу, на которую составлен технологический документ |
| 4 | Обозначение технологического документа (ГОСТ 3.1201–74)* |
| 5 | Литера технологического документа * |
| 6 | Обозначение технологического процесса – не заполнять |
| 7 | Наименование и марка материала |
| 8 | Не заполнять |
| 9 | Не заполнять |
| 10 | Масса детали по конструкторскому документу |
| 11 | Не заполнять |
| 12 | Профиль и размер заготовки |
| 13 | Количество деталей, изготовляемых из одной заготовки * |
| 14 | Масса заготовки |
| 15 | Количество деталей, на которое установлена норма расхода материала (например, 1, 10, 100 … шт) * |
| 16 | Норма расхода материала *) |
| 17 | Коэффициент использования материала (отношение массы детали по конструкторскому чертежу к массе заготовки) * |
| 18 | Номер цеха * |
| 19 | Номер участка * |
| 20 | Номер операции |
| 21 | Заполнять наименование операции без её содержания |
| 22 | Обозначение документа, содержащего описание операции * |
| 23 | КОД, наименование (модель) и инвентарный номер технологического оборудования * |
| 24 | Данные записывать в графе дробью, в числителе указывается коэффициент штучного времени, при многостаночном обслуживании, в знаменателе – КОД профессии по классификатору * |

Окончание табл.П2.1

| 1 | 2 |
|---|---|
| 25 | Данные записываются дробью. В числителе количество рабочих, занятых в операции, в знаменателе – разряд работы. Заполнять только разряд работы * |
| 26 | Записывать дробью. В числителе количество одновременно обрабатываемых деталей при выполнении операции. В знаменателе количество деталей, на которое установлена норма времени (1, 10, 100 шт. …) * |
| 27 | Записывается дробью. В числителе КОД тарифной сетки, в знаменателе КОД вида нормы * |
| 28 | Объём партии в штуках |
| 29 | Записывается дробью. Числитель – норма подготовительно-заключительного времени на партию. Знаменатель – норма штучного времени на операцию |

Примечание
* – не заполнять

Таблица П2.2

**Сведения, вносимые в отдельные графы и строки операционной карты**

| Номер графы | Содержание графы |
|---|---|
| 1 | 2 |
| 1 | Наименование организации разработчика технологического процесса (кафедра ЭГО) |
| 2 | Обозначение детали по конструкторскому документу |
| 3 | Наименование детали по конструкторскому документу |
| 4 | Обозначение технологического процесса * |
| 5 | Обозначение технологического документа * |
| 6 | Номер цеха * |
| 7 | Номер участка * |
| 8 | Номер операции по маршрутной карте |
| 9 | Наименование операции |
| 10 | Наименование и марка материала |
| 11 | Масса детали по конструкторскому документу |
| 12 | Профиль, размеры заготовки для данной операции |
| 13 | Твердость заготовки, поступившей в обработку |
| 14 | Масса заготовки для данной операции |
| 15 | Количество деталей, одновременно обрабатываемых на станке |

Окончание табл.П2.2

| 1 | 2 |
|---|---|
| 16 | Наименование, модель, инвентарный номер технологического оборудования |
| 17 | КОД * и наименование приспособления |
| 18 | Наименование охлаждающей среды |
| 19 | Номер перехода |
| 20 | Содержание перехода |
| 21, 22 23 | КОД *) и наименование вспомогательного, режущего и измерительного элемента |
| 24 | Диаметр или ширина детали |
| 25 | Длина рабочего хода (расчетная длина) |
| 26 – 30 | Режим резания |
| 31 | Норма основного времени на переход |
| 32 | Норма вспомогательного времени на переход |
| 33 | Порядковый номер листа |
| 34 | Общее количество листов |

Таблица П2.3

**Заполнение карты эскизов**

| Номер графы | Содержание графы |
|---|---|
| 1 | Обозначение детали по конструкторскому документу |
| 2 | Наименование детали по конструкторскому документу |
| 3 | Обозначение технологического процесса ГОСТ 3.1201–74 – не заполнять |
| 4 | Обозначение технологического документа по ГОСТ 3.1201–74 – не заполнять |
| 5 | Номер операции |

ГОСТ 3.1105 – 74 форма 3

| Инв. № подп. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

6

| 1 | Маршрутная карта | 2 | 4 |
|---|---|---|---|
| Кафедра ЭГО | | 3 | Литера 5 |

| Материал | | Код единицы величины | Масса детали | Заготовка | | | | Единица нормирования | Норма расхода | Коэфф. использ. матер. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Наименование, марка | Код | | | Код и вид | Профиль и размеры | Кол. дет. | Масса | | | |
| 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |

| Номер | | | Наименование и содержание операции | Обозначение документа | Оборудование (код, наименование, инвентарный номер) | Коэф. штучн. врем. | Кол-во раб. | Кол. одн. обрабат. деталей | Код тар. сетки | Объем производственный, партии | $T_{пз}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| цеха | Участка | операции | | | | Код профессии | Разряд работы | Единица нормирования | Код вида нормы | | $T_{шт}$ |
| 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | Разработал | | | | Лист |
| | | | | | | | | | | | Проверил | | | | |
| | | | | | | | | | | | Нормиров. | | | | Листов |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | Нормоконтр. | | | | |

Рис. П2.1. Обозначение граф маршрутной карты

ГОСТ 3.1404 – 74 форма 1

| Инв.№ подп. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв.№ дубл. | Подпись и дата | | 4 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | |

| 1<br>Кафедра ЭГО | **Операционная карта механической обработки** | 2 | 5 |
|---|---|---|---|
| | | 3 | |

| Номер цеха | Номер участка | Номер операции | **Наименование операции** | Наименование и марка материала | Масса детали | Заготовка | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | Профиль и размеры | Твердость | Масса |
| 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |

| Количеств. одноврем. обр. дет | Оборудование (наименование, модель) | Приспособление (код и наименование) | 17 | | охлаждение |
|---|---|---|---|---|---|
| 15 | 16 | | | | 18 |

| Номер пере- | Содержание перехода | Инструмент ( код и наименование) | | | расч. размеры | | $t$ | $i$ | Режим обработки | | | $T_O$ | $T_B$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Вспомогательный | Режущий | Измерительный | диаметр, ширина | Длина | | | $S$ | $n$ | $V$ | | |
| 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | | Проверил | | | | Лист |
| | | | | | | | | | | | | разработал | | | | 33 |
| | | | | | | | | | | | | Нормиров. | | | | Листов |
| | | | | | | | | | | | | | | | | 34 |
| | Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | Изм. | Лист | №докум | Подпись | Дата | | Нормоконтр | | | | |

Рис. П2.2. Обозначение граф операционной карты

| Инв. № подп. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

ГОСТ 3.1105 – 74 форма 5

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | | 3 |
| | 1 | | 4 |
| **Карта эскизов** | 2 | | |
| | | | Номер операции |
| | | | 5 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | Разработал | | | | Лист |
| | | | | | | | | | | Проверил | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | Листов |
| Изм | Лист | № докум. | Подпись | Дата | Изм | Лист | № Докум. | Подпись | Дата | Нормоконтр | | | | |

Рис. П2.3. Обозначение граф карты эскизов

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

## Оформление карты эскизов и операционной (ГОСТ 3.1702 – 79)

Таблица П3.1

**Примеры полной и сокращенной записи содержания переходов обработки резанием**

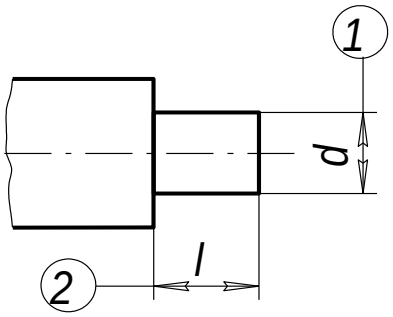
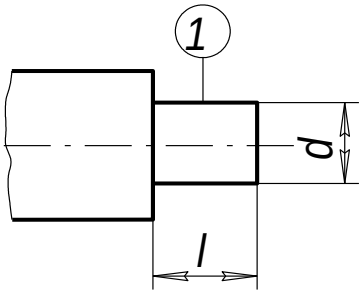
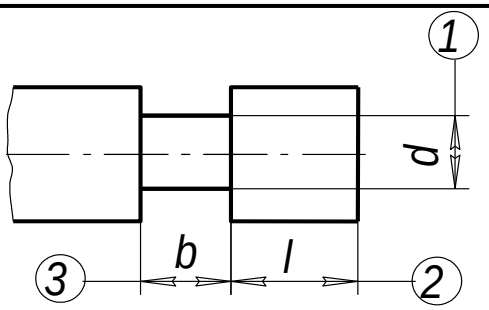
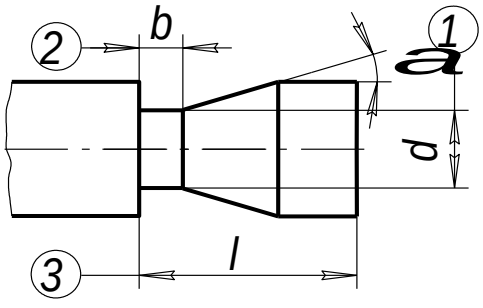
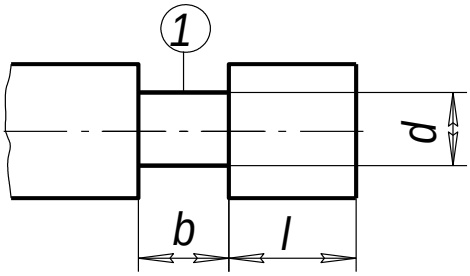
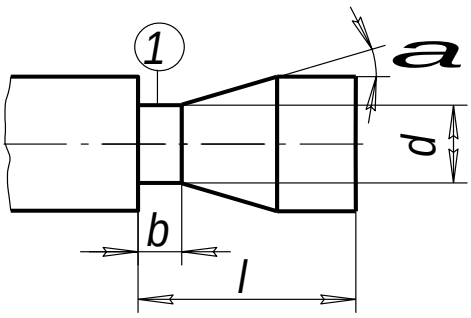
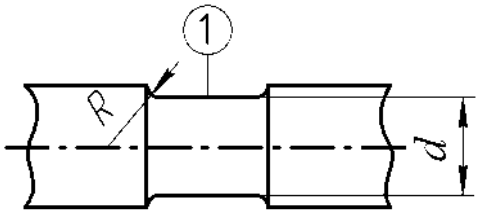
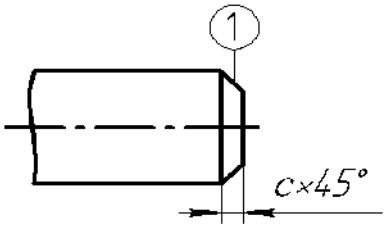
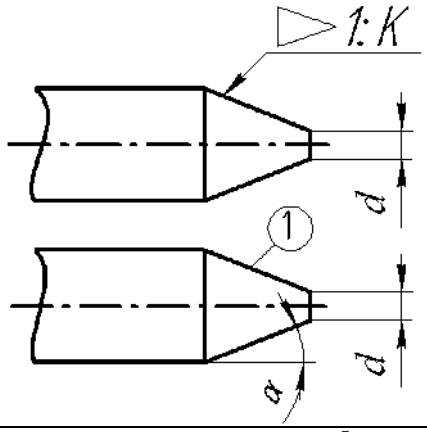
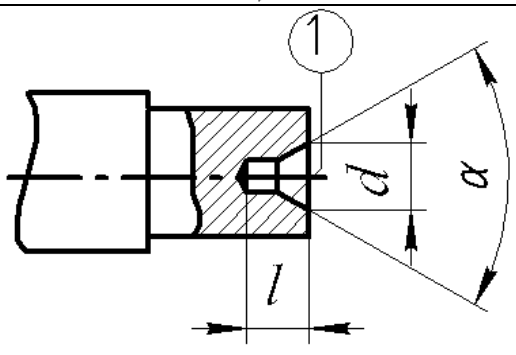
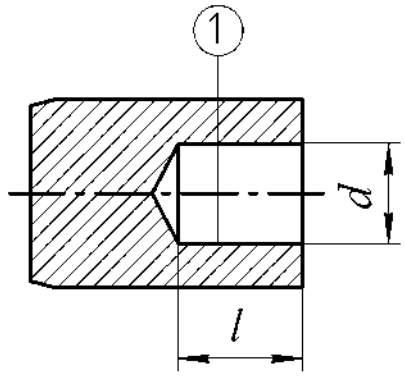
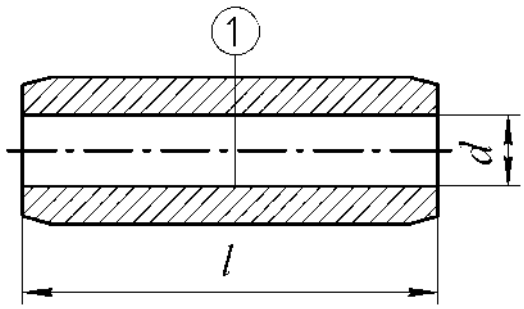
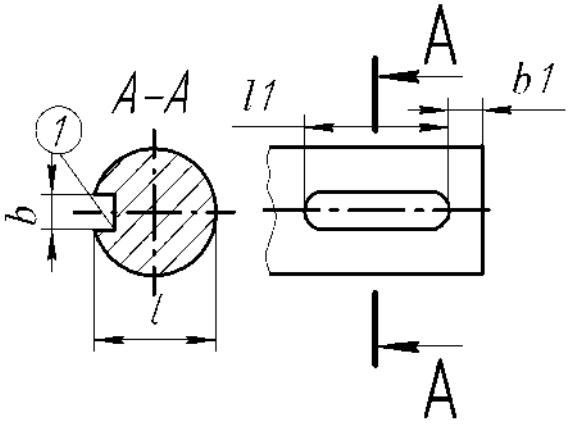
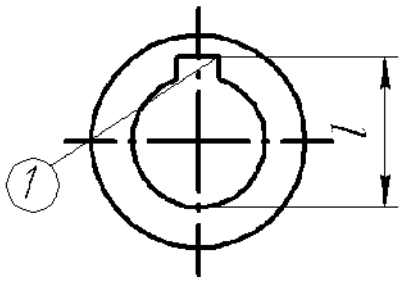
| Эскиз и запись переходов | Эскиз и сокращенная запись переходов |
|---|---|
| 1 | 2 |
|  Точить (шлифовать, притереть, полировать и т) п.поверхность выдерживая размеры 1 и 2 |  Точить (шлифовать,притереть, полировать и т. п.) поверхность 1 |
|  <br>  Точить (шлифовать, довести, полировать и т) канавку, выдерживая размеры 1-3 и угол a |  <br>  Точить (шлифовать, довести, полировать и т) канавку 1 |

Таблица П3.2

**Пример сокращенной записи переходов обработки резанием**

| Эскиз | Запись перехода сокращенная |
|---|---|
| 1 | 2 |
|  | Точить (шлифовать и т.п.) выточку 1 |
|  | Точить (шлифовать, полировать и т.п.) фаску, выдерживая размер 1 |
|  | Точить (шлифовать, притереть и т.п.) конус, выдерживая размер 1и 2 |
|  | Центрировать торец 1 |

Продолжение табл. П3.2

| 1 | 2 |
|---|---|
|  | Сверлить (зенкеровать, развернуть и т.п.) отверстие 1 |
|  | Сверлить (рассверлить, зенкеровать и т.п.) отверстие 1 |
|  | Фрезеровать шпоночный паз 1 |
|  | Долбить (протянуть) шпоночный паз 1 |

Продолжение табл. П3.2

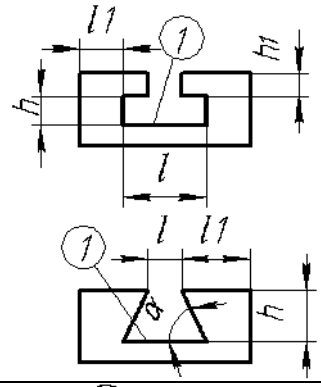
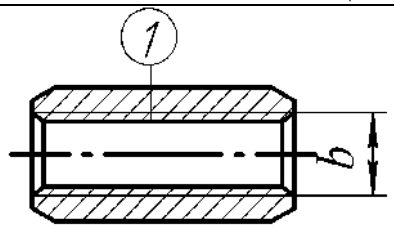
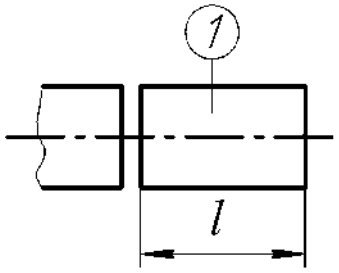
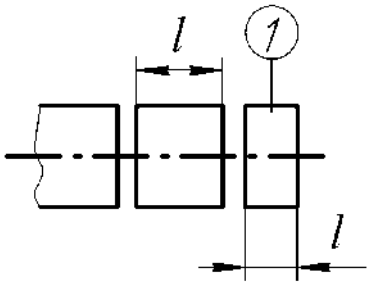
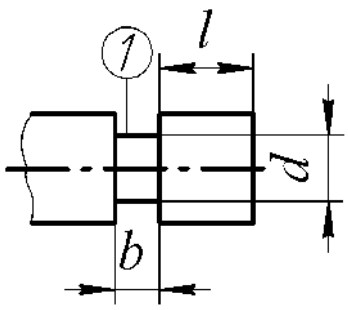
| 1 | 2 |
|---|---|
|  | Фрезеровать (протянуть) паз 1 |
|  | Нарезать (шлифовать, довести и т.п.) резьбу 1 |
|  | Отрезать деталь (заготовку) 1 |
|  | Отрезать 2 заготовку 1 |
|  | Врезаться в поверхность 1 (надрезать деталь по поверхности 1) |

Таблица П3.3

**Обозначение опор**

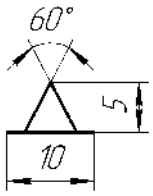
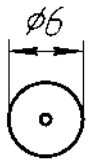
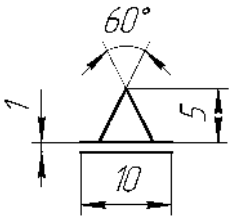
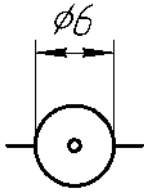
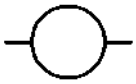
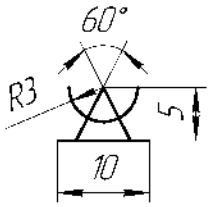
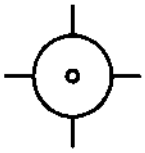
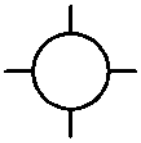
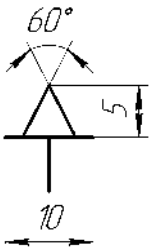
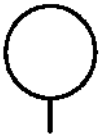
| Наименование опоры | Обозначение опоры на видах | | |
|---|---|---|---|
| | спереди, сзади | сверху | снизу |
| 1. Неподвижная |  |  |  |
| 2. Подвижная |  |  |  |
| 3. Плавающая |  |  |  |
| 4. Регулируемая |  |  |  |

Таблица П3.4

## Обозначение зажимов

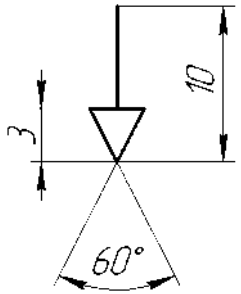
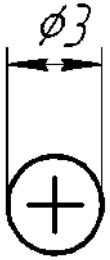
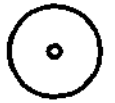
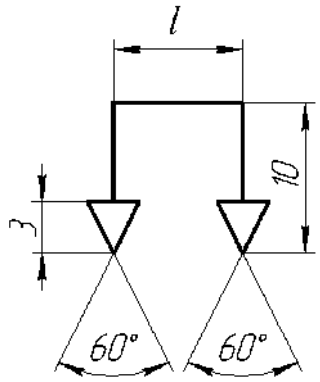
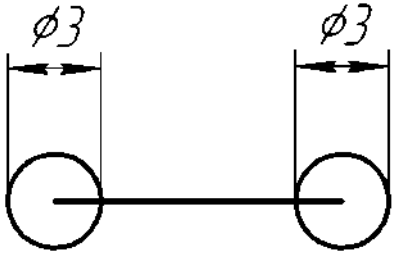
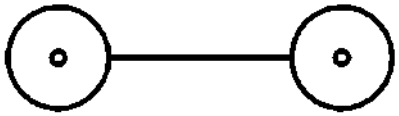
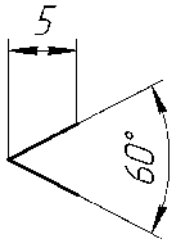
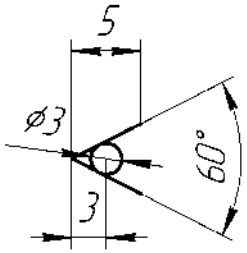
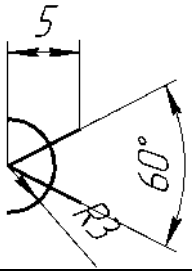
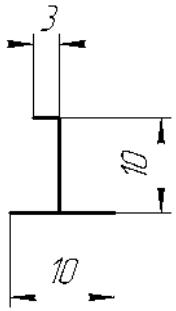
| Наименование зажима | Обозначение зажима на видах | | |
|---|---|---|---|
| | спереди, сзади | сверху | снизу |
| 1.Одиночный |  |  |  |
| 2.Двойной |  |  |  |

Таблица П3.5

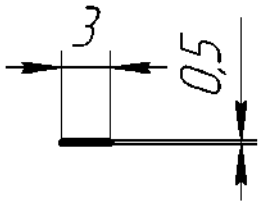
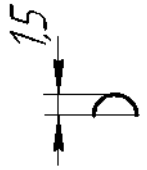
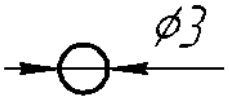
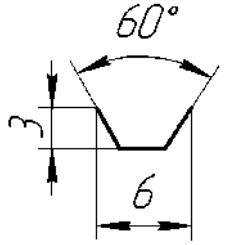
## Обозначение установочных и форм рабочих поверхностей устройств

| Наименование установочного устройства | Обозначение установочного устройства на видах | | |
|---|---|---|---|
| | спереди, сзади, снизу | слева | справа |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1. Центр неподвижный |  | Без обозначения | Без обозначения |
| 2. Центр вращающийся |  | То же | То же |
| 3. Центр плавающий |  | То же | То же |

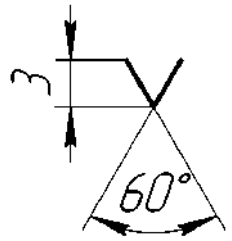
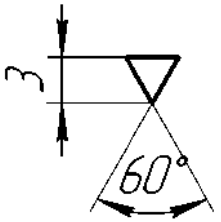
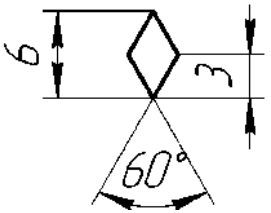
Продолжение табл. П3.5

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| 4. Оправка цилиндрическая |  | Без обозначения | Без обозначения |
| 5. Оправка шариковая |  | Без обозначения | Без обозначения |
| 6. Патрон поводковый |  | Без обозначения | Без обозначения |

Продолжение табл. П3.5

| Наименование формы рабочей поверхности | Обозначение формы рабочей поверхности на всех видах |
|---|---|
| 1 | 2 |
| 1. Плоская |  |
| 2. Сферическая |  |
| 3. Цилиндрическая (шариковая) |  |
| 4. Призматическая |  |

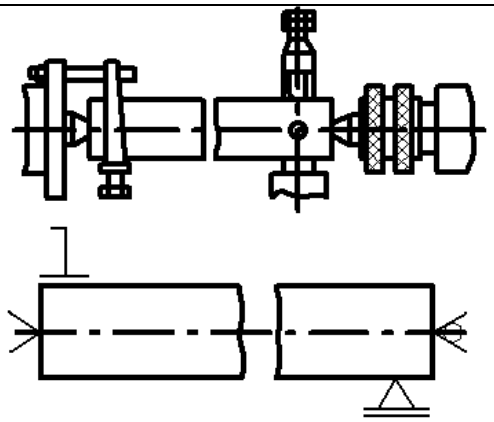
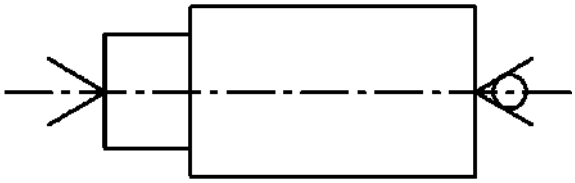
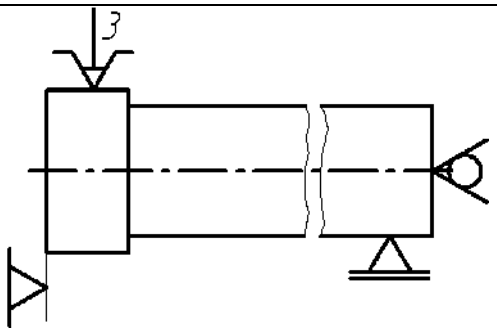
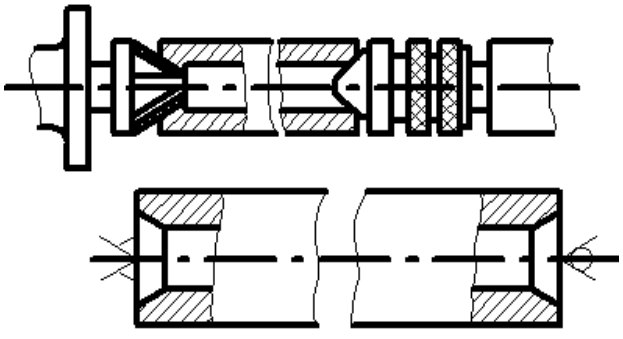
Окончание табл. П3.5

| 1 | 2 |
|---|---|
| 5. Коническая |  |
| 6. Трехгранная |  |
| 7. Ромбическая |  |

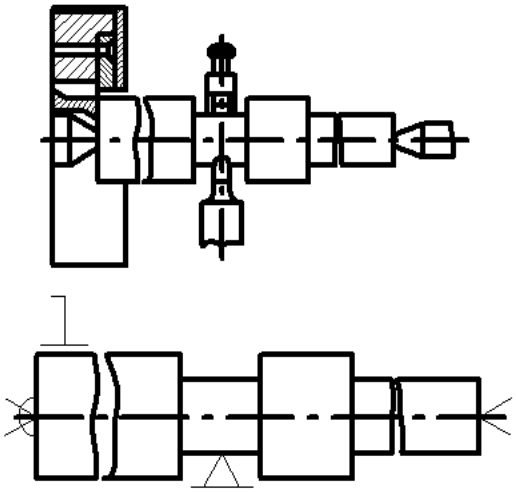
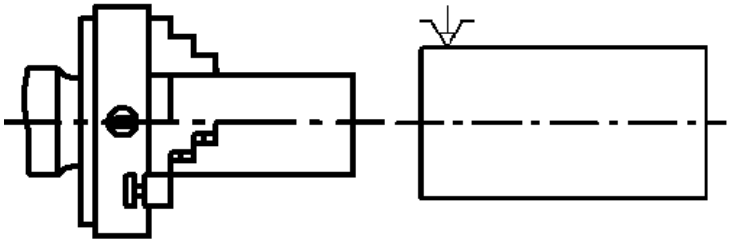
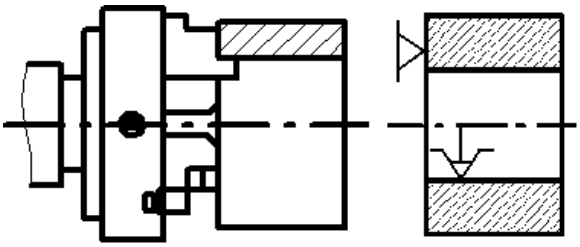
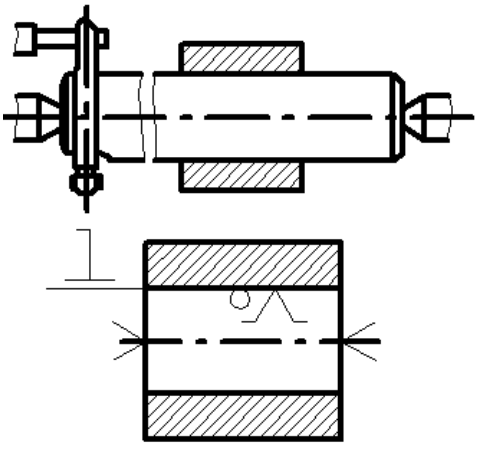
Примечание. Указание прочих форм рабочей поверхности опор, зажимов и установленных устройств следует выполнять в соответствии с требованиями, установленными отраслевыми НТД

Таблица П3.6

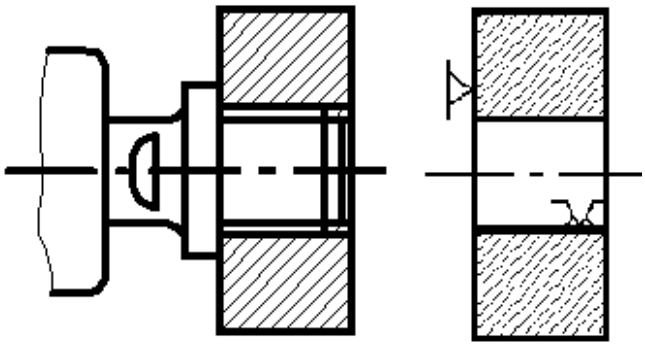
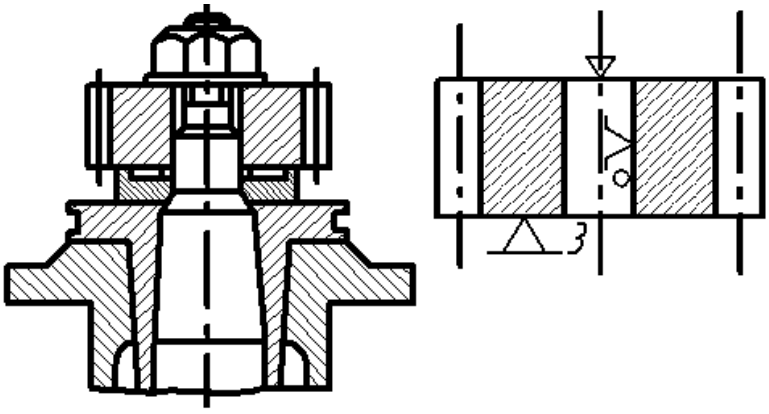
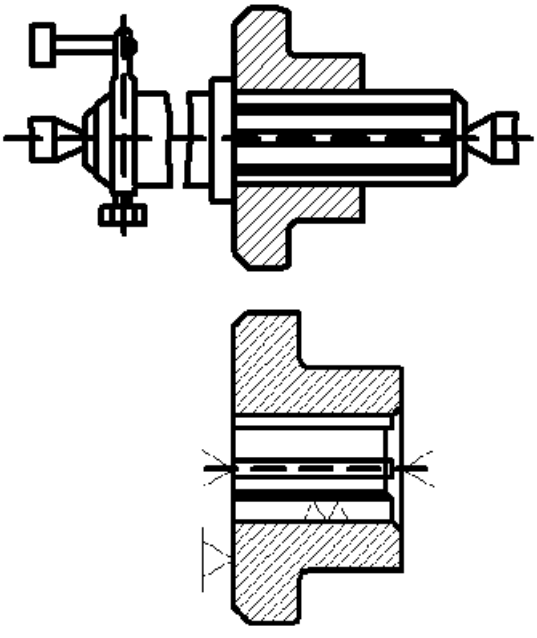
## Примеры схем установки изделий

| Описание способа установки | Схема установки и обозначения |
|---|---|
| 1 | 2 |
| 1. В центрах с поводком с вращающимся центром и подвижным люнетом |  |
| 2. В поводковом патроне с подвижным вращающимся центром |  |
| 3. В трехкулачковом патроне с механическим устройством зажима, с упором в торец, с подвижным вращающимся центром и с креплением в подвижном люнете |  |
| 4.В центрах с рифленым и вращающимся центром |  |

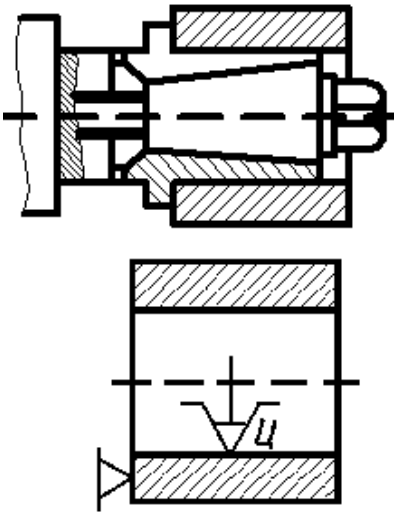
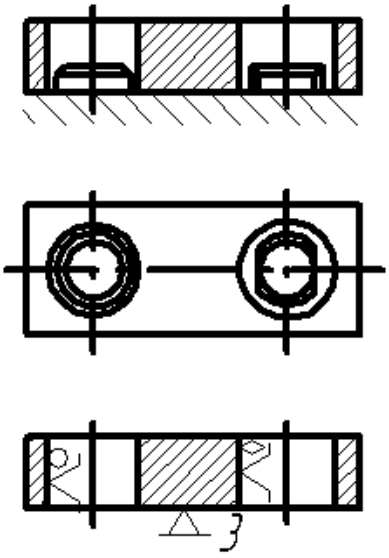
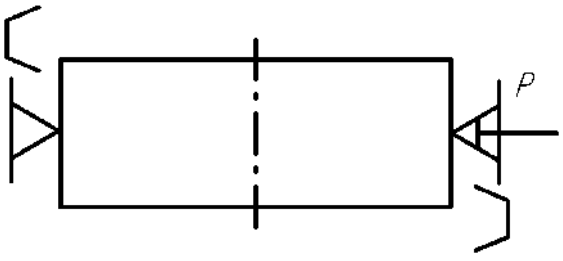
Продолжение табл. П3.6

| 1 | 2 |
|---|---|
| 5. В центрах с плавающим центром в поводковом патроне и неподвижным люнетом |  |
| 6. В трехкулачковом самоцентрирующем патроне с базированием по наружному диаметру без упора в торец |  |
| 7. В трехкулачковом самоцентрирующем патроне в разжим с базированием по торцу |  |
| 8. На жесткой центровой конусной или цилиндрической оправке с натягом в центрах с базированием по отверстию |  |

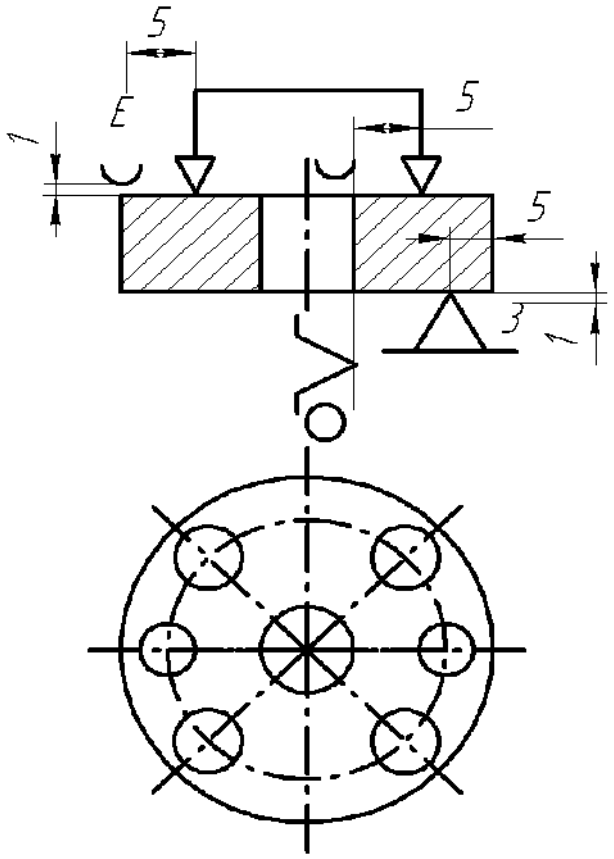
Продолжение табл. П3.6

| 1 | 2 |
|---|---|
| 9. На резьбовой консольной оправке с базированием по резьбе |  |
| 10. На жесткой оправке с креплением по торцу |  |
| 11. На шлицевой оправке в центрах с базированием по отверстию |  |

Продолжение табл. П3.6

| **1** | 2 |
|---|---|
| 12. На разжимной консольной оправке с базированием по отверстию |  |
| 13. На плоскость, круглый и срезанный пальцы с вертикальными осями |  |
| 14. В тисках с призматическими губками и пневматическим зажимом |  |

Окончание табл. П3.6

| 1 | 2 |
|---|---|
| 15. В кондукторе с центрированием на цилиндрический палец, с упором на три неподвижные опоры и с применением электрического устройства двойного зажима, имеющего сферические рабочие поверхности |  |

**ПРИЛОЖЕНИЕ 4**

## Примеры оформления технологических карт по ГОСТ 3.1404–74

ГОСТ 3.1105 – 74 форма 3

| Инв. № подп. | Подпись и дата | Взам. инв № | Инв. № дубл. | Подпись и дата |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

| Кафедра ЭГО | Маршрутная карта | Шестерня | Литера А |
|---|---|---|---|

| Материал | | Код единицы величины | Масса детали | Заготовка | | | | Единица нормирования | Норма расхода | Коэфф. использ. матер. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Наименование, марка | Код | | | Код и вид | Профиль и размеры | Кол. дет. | Масса | | | |
| Сталь 40Х | 12 | | 6,2 | поковка | Ø156х86 | 1 | 10,5 | 1 | 12,1 | 0,51 |

| Номер цеха | Номер участка | Номер операции | Наименование и содержание операции | Обозначение документа | Оборудование (код, Наименование, инвентар-ный номер) | Коэф. штучн. врем. | Кол-во раб. | Кол. одн. обрабат. деталей | Код тар. сетки | Объем производ-ствен. партии | $T_{пз}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | Код профессии | Разряд работы | Единица нормирования | Код вида нормы | | $T_{шт}$ |
| 1 | 1 | 3 | Ковка | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| 7 | 2 | 5 | Токарно-винторезная | | Ток.- винт. | 1 | 1 | 1 | □ | 150 | 27 |
| | | | | | 16К20 | □ | 2 | 2 | □ | | 3,45 |
| 7 | 2 | 7 | Токарно-винторезная | | Ток.- винт. | 1 | 1 | 1 | □ | 150 | 27 |
| | | | | | 16К20 | □ | 2 | 1 | □ | | 4,74 |

| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | Проверил | Нормиров. | Нормоконтр. | Лист | Листов |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

| Инв. № подп. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв.№Дубл. | Подпись и дата |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

ГОСТ 3.110 5 – 74 Форма 3а

| Номер | | | Наименование и содержание операции | Обозначение документа | Оборудование (код, наименование, Инвентар-ный номер) | Коэф. штучн. врем. | Кол-во раб. | Кол. одн. обрабат. деталей | Код тар. сетки | Объем производ ственн. партии | $T_{пз}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| цеха | Участка | операции | | | | Код профессии | Разряд работы | Единица нормирования | Код вида нормы | | $T_{шт}$ |
| | | | | | | | | | | | |
| 7 | 2 | 9 | Контрольная | | Контрольн. | | | | | | |
| | | | | | стол | | | | | | |
| 1 | 2 | 11 | Термическая | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| 7 | 2 | 13 | Токарно-винторезная | | Ток.- винт. | 1 | 1 | 1 | □ | 150 | 27 |
| | | | | | 16К20 | □ | 2 | 2 | □ | | 6,7 |
| | | | | | | | | | | | |
| 7 | 2 | 15 | Токарно-винторезная | | Ток.- винт. | 1 | 1 | 1 | □ | 150 | 27 |
| | | | | | 16К20 | □ | 2 | 1 | □ | | 5,21 |
| | | | | | | | | | | | |

| Изм | Лист | № докум. | Подпись | Дата | Изм. | № Докум. | Подпись | Дата | Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | | | |

лист

листов

| Инв. № подп. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № Дубл. | Подпись и дата |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

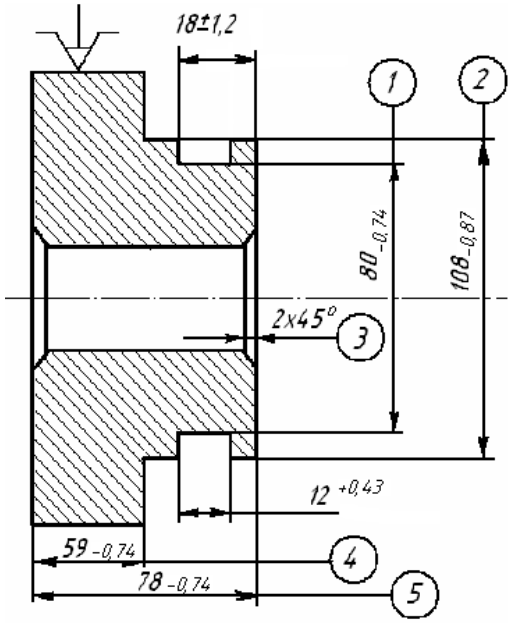
ГОСТ 3.1105 – 74 форма 5

# Карта эскизов

## *Шестерня*

Номер операции

*15*




*Rz80*

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | Разработал | | | | Лист |
| | | | | | | | | | | Проверил | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | Листов |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | Изм. | Лист | № Докум. | Подпись | Дата | Нормоконтр. | | | | |

ГОСТ 3.1404 – 74 форма 1

| Инв.№ подп. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв.№ дубл. | Подпись и дата |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

| Кафедра ЭГО | **Операционная карта механической обработки** | ***Шестерня*** |
|---|---|---|

| Номер цеха | Номер участка | Номер операции | **Наименование операции** | Наименование и марка материала | Масса детали | Заготовка: Профиль и размеры | Заготовка: Твердость | Заготовка: Масса |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 2 | 15 | *Токарно-винторезная* | *40Х* | *6,2* | *Ø156×86* | *НВ 269* | - |

| Количеств. одноврем. обр. дет | **Оборудование (наименование, модель)** | Приспособление (код и наименование) | | | охлаждение |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | *Токарно-винторезный 16К20* | | *3х кулачков. патрон* | | |

| Номер пере- | Содержание перехода | Инструмент ( код и наименование) | | | расч. размеры | | $t$ | $i$ | Режим обработки | | | $T_О$ | $T_В$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Вспомогательный | Режущий | Измерительный | диаметр, ширина | Длина | | | $S$ | $n$ | $V$ | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| *А* | *Установить деталь,* | | | | | | | | | | | | *0,45* |
| | *закрепить* | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| *1* | *Подрезать торец 5* | | *Резец* | *Штангенц* | *140* | *45* | *4* | *4* | *0,4* | *315* | *138* | *0,2* | *2,59* |
| | | | *подрезной* | *ц.д.–0,1мм* | | | | | | | | | |
| | | | *Т15К6* | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | | Проверил | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | | | | разработал | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | Нормиров. | | | | | Листов |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | Изм. | Лист | №докум | Подпись | Дата | Нормоконтр | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

ГОСТ 3.1404 – 74 форма 1а

| Инв. № подп. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв.№ дубл. | Подпись и дата |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

Номер операции: 15

| Номер перехо- | Содержание перехода | Инструмент (код и наименование) | | | расч. размеры | | $t$ | $i$ | Режим обработки | | | $T_О$ | $T_В$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Вспомогательный | Режущий | Измерительный | диаметр, ширина | Длина | | | $S$ | $n$ | $V$ | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | Точить поверхн.2 | | Резец | Штангенц | 140 | 21 | 4 | 4 | 0,39 | 315 | 138 | 0,3 | 1,59 |
| | с подрезанием торца | | проход- | ц.д.–0,1мм | | | | | | | | | |
| | ступени 4 | | упорный | | | | | | | | | | |
| | | | Т15К6 | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Точить канавку 1 | | Резец | Штангенц | 108 | 15 | 12 | 1 | 0,12 | 200 | 68 | 1,05 | 0,4 |
| | | | отрезной | ц.д.–0,1мм | | | | | | | | | |
| | | | Т15К6 | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | Расточить фаску 3 | | Резец | | 55 | 3 | 2 | 1 | 0,1р | 200 | 35 | 0,12 | 0,6 |
| | | | проход- | | | | | | | | | | |
| | | | Т15К6 | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | Лист |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | Листов |
| | Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | Изм | Лист | № Докум. | Подпись | Дата | Нормоконтр | | | | |

ГОСТ 3.1404 – 74 форма 1а

| Инв. № подп. | Подпись и дата | взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | |
| | | | | Номер операции | 15 | |

| Номер перехода | Содержание перехода | Инструмент (код и наименование) | | | расч. размеры | | $t$ | $i$ | Режим обработки | | | $T_О$ | $T_В$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Вспомогательный | Режущий | Измерительный | диаметр ширина | Длина | | | $S$ | $n$ | $V$ | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | Притупить острые | | Резец про- | | 139 | 1,5 | 0,5 | 1 | 0,1р | 200 | 89 | 0,1 | 0,15 |
| | кромки | | ходной | | 108 | 1,5 | 0,5 | 1 | 0,1р | 200 | 89 | 0,1 | 0,15 |
| | | | Т15К6 | | | | | | | | | | |
| 6 | Открепить – снять | | | | | | | | | | | | |
| | деталь | | | | | | | | | | | | 0,2 |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | Контроль | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | Проверить $Ø 108_{-0,74}$ | | | Инструмент | | | | | | | | | |
| | $Ø 80_{-0,74}$; $Ø 78_{-0,74}$ | | | операции | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | Изм. | Лист | № Докум | Подпись | Дата | Нормоконтр | | | | | листов |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |

# ЛИТЕРАТУРА


1. Технологический классификатор деталей машиностроения и приборостроения. Ч.1. М., 1974.
2. Технологический классификатор деталей машиностроения и приборостроения Ч.2. М., 1975.
3. Маталин А. А. Технология машиностроения. Л.: Машиностроение, 1985. 496 с.
4. Справочник технолога-машиностроителя: В 2т. / Под ред. Л. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. Т.1.М.: Машиностроение, 1985. 656 с.
5. Справочник технолога-машиностроителя: В 2-х т. Т. 1 /Под ред. А .М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Суслова. М.:Машиностроение-1, 2001. 912 с.
6. Обработка металлов резанием: Справочник технолога./А. А. Панов, В. В. Аникин, Н. Г. Бойм и др.; Под общ. ред. А. А. Панова.- М.: Машиностроение 1988.736 с.: ил.
7. Общемашиностроительные нормативы вспомогательного времени на обслуживание рабочего места и подготовительно-заключительного для технического нормирования: Серийное производство. - М.: Машиностроение, 1974. 421 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ОФОРМЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ..... 2
1.МАРШРУТНАЯ КАРТА ..... 4
2.ОПЕРАЦИОННАЯ КАРТА ..... 13
3.КАРТА ЭСКИЗОВ ..... 18
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Глубина резания $t$ для некоторых методов обработки ..... 22
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Оформление карт по ГОСТ 3.1404 - 74 ..... 25
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Оформление карты эскизов и операционной (ГОСТ 3.1702 – 79)..... 0
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Примеры оформления технологических карт по ГОСТ 3.1404–74 ..... 0
ЛИТЕРАТУРА..... 0

Учебное издание

Татьяна Петровна Глинникова
Сергей Александрович Волегов

# ОСНОВЫ ТЕХНОЛДОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

*Справочно-методическое пособие*
по оформлению технологических КАРТ
«Оборудование и технология повышения износостойкости и восстановления деталей машин и аппаратов» (МШС) направление 150700.62 «Машиностроение», 151000 –«Технологические машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов» (ТМО) и среднего профессионального образования 151031 – «Монтаж и техническая эксплуатация промышленного оборудования (по отраслям)» *очного и заочного обучения*

Редактор Баклаева В.

Подписано в печать 2007 г. Бумага писчая. Формат 60 × 84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 300. Заказ №

Издательство УГГУ
620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

**Министерство образования и науки РФ**
**ФГБОУ ВПО**
**«Уральский государственный горный университет»**

**Т. П. Глинникова, С. А. Волегов**

# «Основы технологии машиностроения»

***Лабораторный практикум***
**для студентов специальностей 15.03.01«Машиностроение», 15.03.02 – «Технологические машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов» (ТМО) и среднего профессионального образования**

**Екатеринбург**

**2019**

Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВПО
«Уральский государственный горный университет»

Т. П. Глинникова, С. А. Волегов

# «Основы технологии машиностроения»

*Лабораторный практикум*
для студентов специальностей «Оборудование и технология повышения износостойкости и восстановления деталей машин и аппаратов» (МШС) направление 15.03.01 «Машиностроение», и среднего профессионального образования 15.03.02 – «Монтаж и техническая эксплуатация промышленного оборудования (по отраслям)» *очного и заочного обучения*

Издание УГГУ Екатеринбург, 2019

Г54

Рецензент: *А. П. Комиссаров*, д-р техн. наук, профессор кафедры ГМК Уральского государственного горного университета

Лабораторный практикум рассмотрен на заседании кафедры эксплуатации горного оборудования _____ 2018 г. (протокол № 6) и рекомендовано для издания в УГГУ.

**Глинникова Т. П., Волегов С. А.**
Г54 «Основы технологии машиностроения» *Лабораторный практикум* для студентов специальностей «Оборудование и технология повышения износостойкости и восстановления деталей машин и аппаратов» (МШС) направление 150700.62 «Машиностроение», 151000 –«Технологические машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов» (ТМО) и среднего профессионального образования 151031 – «Монтаж и техническая эксплуатация промышленного оборудования (по отраслям)» *очного и заочного обучения*
/ Т. П. Глинникова, С. А. Волегов. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2018. – 50 с.

*Лабораторный практикум* содержит практические задания и упражнения, способствующие усвоению пройденного предмета «Основы технологии машиностроения».

© Глинникова Т. П., Волегов С. А., 2018
© Уральский государственный горный университет, 2019

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1
# ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ (ГОСТ 2789 – 73)

**Цель работы**

Усвоить и закрепить методику определения некоторых параметров шероховатости поверхности, а также изучить зависимости шероховатости от основных параметров режущего инструмента и элементов режима резания.

**Краткие теоретические сведения**

Шероховатость обработанной поверхности оказывает существенное влияние на износоустойчивость наружной поверхности детали, характер посадки (сохранение гарантированного зазора или натяга), силу трения в сопряженных узлах механизма, смазку и антикоррозионную способность рабочей поверхности.

Имеющиеся шероховатости на обработанной поверхности изделия – это следы режущего инструмента в результате главного и вспомогательного движений.

Измерение профиля шероховатости можно производить как в направлении подачи, так и в направлении главного движения.

В первом случае (рис. 1.1) мы определим поперечную шероховатость, а во втором – продольную.

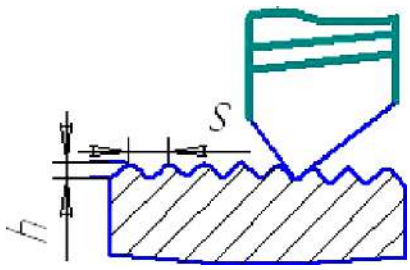



Рис. 1.1. Схема определения поперечной шероховатости

Согласно рис. 1.1 можно определить поперечную шероховатость при токарной обработке по формуле

$$h = R - \frac{\sqrt{4R^2 - S^2}}{2} \qquad (1.1)$$

или приближенно

$$h = \frac{S^2}{8R}, \qquad (1.2)$$

где $h$ – высота шероховатости, мм; $S$ – подача резца, мм/об; $R$ – радиус при вершине резца, мм.

*Шероховатостью поверхности* называется совокупность неровностей с относительно малыми шагами, образующими рельеф поверхности деталей в пределах базовой длины.

Настоящая работа выполняется на токарно-винторезном станке. Режим резания при точении определяется глубиной резания ($t$), подачей ($S$) и скоростью резания ($V$).

В основном, влияние на величину шероховатости оказывают: скорость резания ($V$), подача ($S$), радиус при вершине резца ($R$) и главный угол в плане φ (рис. 1.2.).

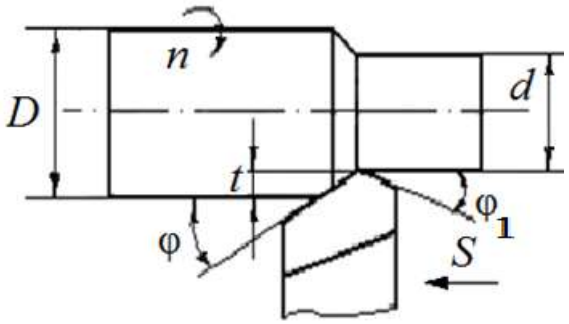



Рис. 1.2. Схема обработки заготовки при определении продольной шероховатости

Глубина резания определяется по формуле

$$t = \frac{D - d}{2}.$$

*Подача* – это величина перемещения инструмента за один оборот детали.

Скорость резания определяется по формуле

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000},$$

где $n$ – частота вращения детали в мин.,

$$n = \frac{V}{\pi \cdot D} \cdot 1000.$$

Из параметров режима резания на шероховатость наибольшее влияние оказывают подача и скорость резания. Глубина резания практически не влияет на шероховатость. Теоретически, из чисто геометрических построений, можно подсчитать высоту гребешков шероховатости по формуле

$$Rz = S \frac{\sin\varphi \cdot \sin\varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)}$$

(1.3)

Из анализа формул (1.1) и (1.2) следует, что высота шероховатости снижается с уменьшением подачи, а также с увеличением радиуса при вершине резца.

Опыты показывают, что теоретические расчеты не совпадают с действительными размерами шероховатости. Объясняется это тем, что в формулах не учитываются упругие деформации, вырывание частиц металла по границам зерен, нарост на режущих поверхностях инструмента, в процессе резания всегда имеют место пластические деформации срезаемого слоя, вибрации и др. факторы. Степень влияния каждого фактора на шероховатость обработанной поверхности обусловлена не только геометрией режущего инструмента, но также будет во многом зависеть от вида обрабатываемого материала, режима резания (*V, S, t*), охлаждения режущего инструмента, изношенности оборудования и т. д.

Следует иметь в виду, что фактическая шероховатость никогда не соответствует расчетной, так как формула (1.3) не учитывает влияние скорости резания. В настоящей работе ставится задача установить эмпирические зависимости шероховатости от подачи и скорости резания.

**Оборудование:**

1. Токарно-винторезный станок.
2. Резцы, проходные твердосплавные.
3. Специальные образцы (два).
4. Микроскоп МИС–11или портативный измеритель шероховатости *TR* 100.
5. Угломер.
6. Эталоны шероховатости.

**Порядок выполнения работы**

1. Измеряется геометрия резца (α°, γ°, φ°, φ°).
2. Замеряется диаметр образца (рис. 1.3).
3. Подсчитывается необходимое значение частоты вращения шпинделя по заданной скорости резания. Полученное значение уточняется по станку (выбирается ближайшее меньшее, имевшееся на станке).

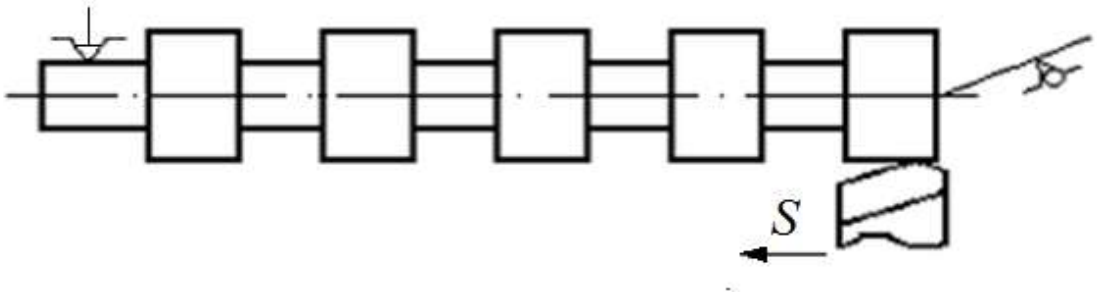



Рис. 1.3. Схема настройки

4. Принимаются фактические значения подачи в соответствии с паспортными данными станка, т. е. принимается ближайшее меньшее к заданным значениям в первой и второй сериях опытов.

**Первая серия опытов**

Устанавливается зависимость шероховатости от подачи.

Величина подачи принимается последовательно: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 мм/об. Глубина резания принимается 0,3 мм. Скорость резания принимается 30 м/мин. После обточки на каждой ступени замеряется высота шероховатости, данные заносятся в табл. 1.1.

На каждой ступени шероховатость измеряется по три раза.

Таблица 1.1

Зависимость шероховатости от подачи

| Подача, мм/об | Высота шероховатости, мкм | | | | Расчетное значение шероховатости, мкм |
|---|---|---|---|---|---|
| | $Rz_1$ | $Rz_2$ | $Rz_3$ | $Rz_{ср}$ | |
| | | | | | |

По результатам экспериментальных данных строится график зависимости шероховатости ($Rz$) от подачи ($S$) в логарифмических координатах (рис. 1.4).

Для построения графика следует пользоваться логарифмической линейкой. График строится по $Rz_{ср}$.

По построенному графику определяется показатель степени $m$ в формуле: $Rz = C_s \cdot S^m$ как тангенс угла наклона прямой

$$\left( m = tg\alpha = \frac{a}{b} \right).$$

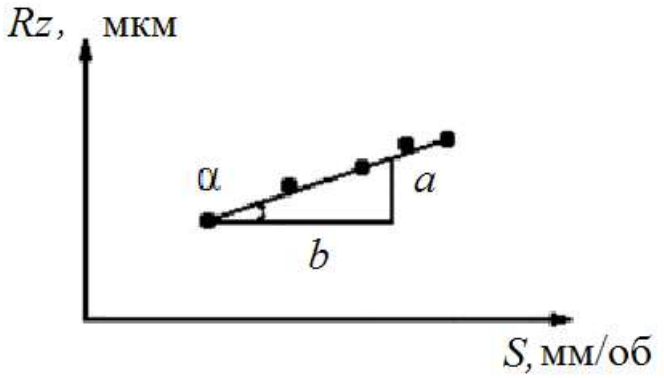



Рис. 1.4. Зависимость шероховатости от подачи

Затем определяем постоянный коэффициент ($C_S$), характеризующий условия, в которых проводился эксперимент.

**Вторая серия опытов**

Устанавливается зависимость шероховатости от скорости резания.

Скорость резания принимается последовательно: 10; 20; 30; 40; 50 или 40; 50; 60; 70; 80 м/мин. Подача принимается 0,2 мм/об, а глубина резания – 0,3 мм.

После обточки на каждой ступени замеряется высота шероховатости, данные заносятся в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Зависимость шероховатости от скорости

| Скорость резания, м/мин | Высота шероховатости, мкм | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $Rz_1$ | $Rz_2$ | $Rz_3$ | $Rz_{ср}$ |
| | | | | |

По результатам экспериментов строится график зависимости $Rz = f(V)$ в логарифмических координатах и так же определяются показатель степени ($n$) и постоянный коэффициент ($C_V$) в формуле

$$Rz = C_V \cdot V^n.$$

Для этого в формулу подставляют соответствующие значения из таблицы 1.2. По найденным значениям $C_V$ подсчитывается среднее арифметическое.

**Указания по измерению шероховатости**

Существуют различные способы измерения шероховатости поверхности. В настоящей работе используется оптический прибор – двойной микроскоп – МИС–11 .

Прибор предназначен для измерения шероховатости по параметру *Rz*. Его можно использовать также для оценки шероховатости по показателю *Ra.*

Диапазон измерения по параметрам высоты профиля составляет 20 ÷ 0,6 мкм.

Прибор МИС–11, принцип действия которого основан на методе светового сечения, представляет собой систему двух микроскопов (рис. 1.5).

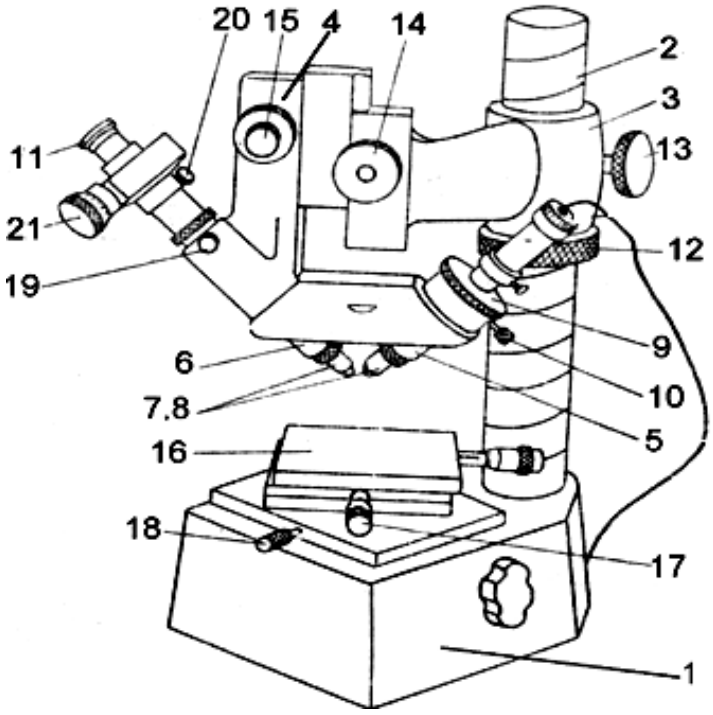



Рис. 1.5. Двойной микроскоп МИС –11:

*1* – основание; *2* – колонка; *3* – кронштейн; *4* – держатель тубусов; *5* – проецирующий микроскоп; *6* – наблюдательный микроскоп; *7, 8* – объективы; *9* – регулировочная гайка; *10* – зажимной винт; *11* – окуляр; *12* – гайка; *13* – винт; *14* – винт грубой подачи; *15* – микровинт; *16* – предметный стол; *17* – микровинт; *18, 19* – стопорные винты; *20* – винт; *21* – барабан окулярного микроскопа

Один микроскоп называется *осветительным*. Он служит для создания плоского пучка света, направляемого от источника через щелевую диафрагму и объектив *7* на контролируемую поверхность изделия. Другой микроскоп, имеющий объектив *8* и окуляр 11, называется *измерительным*. Он служит для рассматривания светящейся линии, полученной в результате пересечения плоской полосы света с контролируемой поверхностью. Оси микроскопов составляют между собой прямой угол. Биссектриса этого угла совпадает с нормалью к контролируемой поверхности.

Светящаяся линия пересечения копирует действительный профиль поверхности. Спроектированная объективом измерительного микроскопа в фокальную плоскость окуляра, эта линия в увеличенном виде, например в *X* раз, воспроизводит высоту и шаг шероховатости поверхности.

Шероховатость поверхности анализируют в следующей последовательности:

а) поднять кронштейн *3* с держателем *4* микроскопа, вращая гайку *12* при отстопоренном винте *13*;

б) на предметный столик *16* положить призму глубоким пазом вверх. В глубокий паз призмы установить деталь;

в) произвести грубую фокусировку поверхности детали, опуская держатель *4* вращением гайки *12*;

г) установить кронштейн *3* так, чтобы биссектриса угла осей тубусов микроскопов *5* и *6* проходила примерно через центр детали, а плоскость осей тубусов располагалась перпендикулярно поверхности детали. Зафиксировать положение кронштейна стопорным винтом *13;*

д) опуская или поднимая микроскопы вращением винта *14*, получить резкое изображение поверхности, которое с помощью микровинта *15* установить в середине поля зрения окуляра;

е) включить прибор в сеть с напряжением *6* вольт;

ж) изменяя винтом *9* наклон осветительного микроскопа, получить изображение световой щели в поле зрения окуляра и совместить это изображение с ранее полученным резким изображением участка контролируемой поверхности;

з) отфокусировать изображение световой щели гайкой *10*. Из двух границ изображения щели обычно одна получается более резкой. По ней в дальнейшем и следует производить измерения;

и) при отстопоренном винте *20* повернуть окулярный микрометр *11* так, чтобы ось барабана *21* составляла с осью контролируемой детали угол примерно в 450º. Затем, вращая барабан, совместить горизонтальную линию перекрестия окуляра с вершиной одного из выступов. Перемещая деталь при помощи микровинта *17,* добиться, чтобы горизонтальная линия перекрестия касалась выбранной вершины в пределах всего поля зрения окуляра. После этого положение окуляра микрометра зафиксировать винтом *20*, а предметный столик – винтом *18*.;

к) выбрать наиболее характерный участок поверхности детали для измерения шероховатости. Необходимо при этом помнить, что

поле зрения окуляра может не охватывать всю заданную длину и для выполнения всех измерений потребуется смещать деталь при помощи винта *17*. По делениям винта *17* следить, чтобы величина смещения не превысила заданной базовой длины;

л) измерить в пределах базовой длины высоту микронеровностей у десяти обработанных поверхностей.

Для измерения каждой микронеровности горизонтальную линию перекрестия подвести сначала к вершине изгиба щели по выбранной стороне, например, верхней (рис. 1.6). Снять отсчет А1 по барабану окулярного микрометра *21*. Затем горизонтальную линию перекрестия подвести ко дну впадины по той же стороне щели (рис. 1.6). Снова снять отсчет А2 по барабану. Следует помнить, что барабан может сделать полный оборот, соответствующий 100 делениям. Отсчет полных оборотов барабана производится при помощи двойного штриха, который перемещается относительно неподвижной шкалы окуляра одновременно с перекрестием барабана (одно деление неподвижной шкалы соответствует одному полному обороту барабана). Отсчеты А1 и А2 (с учетом полных оборотов) занести в тетрадь лабораторных работ и вычислить разность

$$H1 = A1 - A2.$$

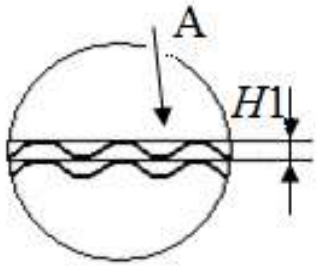



Рис. 1.6. Профиль поверхности под микроскопом

м) по пяти разностям отсчетов найти среднее арифметическое значение А.

Высота неровностей $Rz = A \times E$, где $E$ – цена деления барабана окулярного микроскопа, зависящая от фокусного расстояния, которое указывается на оправе объектива *7* и *8*.

По полученным расчетным и экспериментальным данным построить зависимости: $Rz = f(S)$ при $t = \text{const}$, $S = \text{const}$ и $Rz = f(s)$ при $V = \text{const}$, $t = \text{const}$.

Сделать выводы по работе.

С целью экономии времени при измерении предлагается упрощенная методика измерения. Для точного измерения следует изме-

рить пять максимальных выступов, а затем пять впадин, после чего вычислить шероховатость.

Для измерения соответствующей шероховатости следует правильно выбрать объективы. Для выбора можно пользоваться табл. 1.3, 1.4.

Таблица 1.3

Выбор объектива в зависимости от шероховатости поверхности

| Фокусное расстояние объектива, мм | Высота шероховатости, мкм | Коэффициент увеличения |
|---|---|---|
| 25,0 | 40–6,3 | 0,85 |
| 13,9 | 20–3,2 | 0,475 |
| 8,2 | 6,3–1,6 | 0,285 |
| 4,3 | 3,2–0,8 | 0,14 |

Таблица1.4

Зависимость цены деления от фокусного расстояния

| Фокусное расстояние, мм | 4,25 | 8,16 | 13,89 | 25,02 |
|---|---|---|---|---|
| Цена деления, мкм | 0,143 | 0,391 | 0,474 | 0,862 |

Содержание отчета

В отчете должно быть название работы, цель, оборудование, схема настройки, соответствующие протоколы, графики и полученные формулы, выводы.

## ПОРТАТИВНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ШЕРОХОВАТОСТИ TR 100

### 1. Принцип работы и особенности конструкции

Действие прибора (рис. 1.7) основано на принципе ощупывания неровностей исследуемой поверхности алмазной иглой щупа и преобразования, возникающих при этом механических колебаний щупа в изменения напряжения, пропорциональные этим колебаниям. Результаты измерения параметров шероховатости выводятся на жидкокристаллический дисплей.

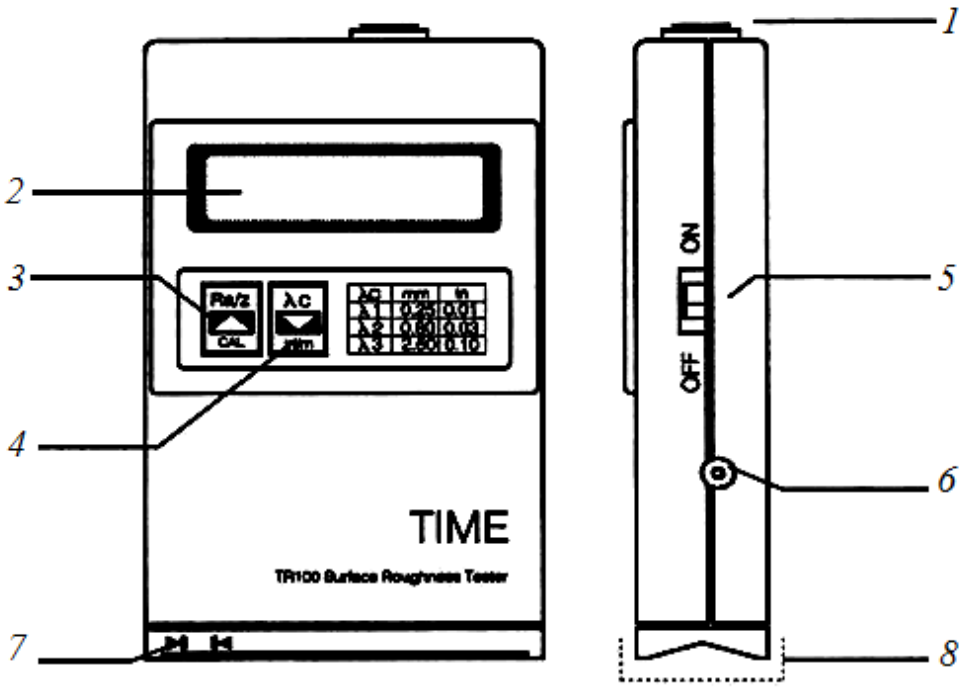



Рис.1.7 Конструкция базового блока
*1* – кнопка запуска измерения, *2* – ЖК экран, *3* – клавиатура (кнопка) 1, *4* – клавиатура (кнопка) 2, *5* – Вкл\выкл выключатель, *6* – зарядное гнездо, *7* – контактный щуп, *8* – защитный колпачок для контактного щупа.

## 2. Основные технические характеристики

- Параметры измерения: *Ra, Rz.*
- Длина перемещения (мм): 6.
- Выборочная длина (мм) : 0,25, 0,80, и 2,5.
- Оценочная длина (мм): 1.25, 4.0, и 5,0
- Диапазон измерения (мкм): *Ra*: 0,05 ÷ 10,0, *Rz*: 0,1 ÷ 50
- Погрешность показа: ± 7 %.

## 3. Эксплуатационный режим

### 3.1 Эксплуатация

При включении прибора кратковременно происходит полный показ экрана. После звукового сигнала, прибор готов к работе (на экране появляются измеряемые параметры и выборочная длина для предыдущего испытания).

Перед началом измерения, выберите необходимый параметр *Ra* или *Rz* и необходимую выборочную длину – 2,5 (табл. 1.5).

Таблица 1.5.

Рекомендации по выбору длин отрезков

| *Ra* (мкм) | *Rz* (мкм) | Рекомендуемые длины отрезков |
|---|---|---|
| > 40–80 | > 160– 320 | 8 |
| > 20–40 | > 80– 160 | |
| > 10–20 | > 40– 80 | |
| > 5–10 | > 20– 40 | 2.5 |
| > 2.5– 5 | >10– 20 | |

После включения прибора, нажимают клавишу 

и выбирают *Ra* или *Rz*, затем нажимают клавишу 

и выбирают 2,5.

После того, как параметры выбраны, измерение можно начинать. Местоположение метки ▶| |◀ соответствует испытуемой области. Поставьте прибор меткой на исследуемую область, нажмите кнопку пуска, измерение начнётся автоматически. Когда прозвучит два сигнала, измерение закончено, и на экране появится измеренное значение.

Внимание!

Во время движения датчика держите прибор на контролируемой детали устойчиво, чтобы не уменьшить точность измерения.

## 3.2. Контроль напряжения батареи

Если виден значок «BAT» в верхнем левом углу экрана, то напряжение батареи понижено и необходима подзарядка.

Когда экран показывает «BAT» и раздаётся сигнал, то это указывает на то, что напряжение достигло самого низкого предела и зарядка должна быть выполнена немедленно.

Выключать прибор лучше после каждого измерения, чтобы экономить энергию и если необходимо, делать подзарядку.

Датчик – это измерительная часть прибора, соблюдайте особую осторожность. После каждого использования прибора, надевайте защитное покрытие, и избегайте ударов.

## ЛИТЕРАТУРА

Егоров М. Е. и др. Технология машиностроения, М.: Высшая школа, 1976, 526 с.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2
# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ФОРМЫ ПРИ ТОЧЕНИИ НЕЖЕСТКИХ ЗАГОТОВОК

## Цель работы

Изучение влияния жесткости заготовки на точность формы и размеров детали при обработке на токарном станке.

## Краткие теоретические сведения

Суммарная погрешность обработки состоит из элементарных погрешностей. Определение величины суммарной погрешности играет особую роль для практики машиностроения.

Наиболее ощутимое влияние на ожидаемую точность, т. е. суммарную погрешность оказывают:

- упругие деформации технологической системы;
- погрешность установки заготовок;
- износ режущего инструмента;
- погрешность настройки инструмента;
- геометрическая точность металлорежущего оборудования;
- погрешность, зависящая от тепловых воздействий.

Эти факторы не остаются постоянными. Изменения характерны как для лезвийного, так и для абразивного инструмента.

Основные причины, вызывающие изменение силовых факторов

При обработке партии заготовок с предварительной настройкой инструмента на размер, приходится снимать слои материала различной глубины. Колебание глубины от $t_{max}$ до $t_{min}$ подчиняется определенному закону распределения и вызывает колебание сил резания. Кроме того, режущий инструмент при своем движении встречает негомогенные участки материала с различной твердостью. Это также

приводит к колебанию величины силы резания. Наряду с этим, на колебание сил резания оказывает влияние износ инструмента [1].

Силы резания (рис. 2.1). вызывают упругие отжатия (деформации) элементов технологической системы, а колебания сил резания приводят к постоянному изменению упругих отжатий.

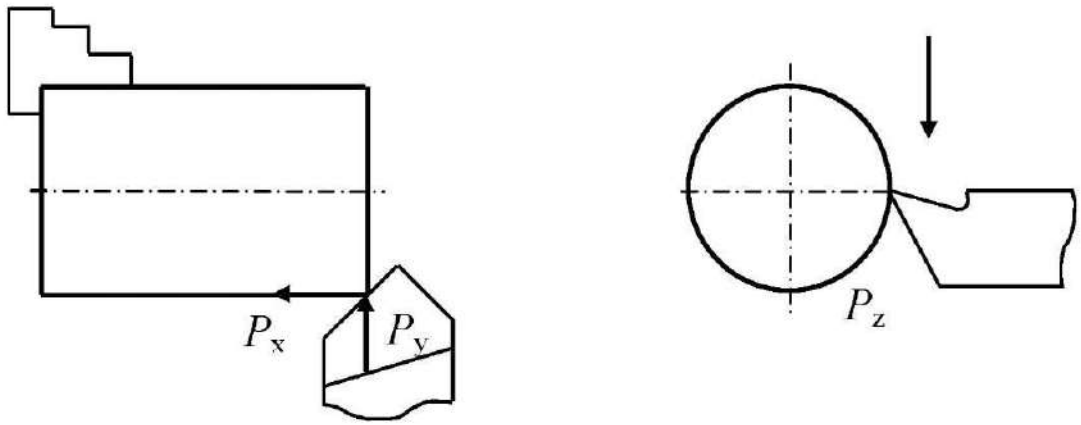



Рис. 2.1. Схемы сил резания, действующих при обработке вала на токарном станке

Силы резания определяются по эмпирическим формулам, например [1]:

$$P_y = C_p \cdot S^y \cdot V \cdot t_ф^x \cdot (HB)^n,$$

где $S$ – подача, мм/об; $V$ – скорость резания, м/мин; $HB$ – твердость обрабатываемого материала по Бринелю; $C_p$ – коэффициент, характеризующий условия обработки; $y$, $x$, $n$ – показатели степеней, выбираемые в соответствии с конкретными условиями обработки; $t_ф$ – фактическое значение глубины резания, мм.

Упругие перемещения технологической системы являются функцией силы и жесткости [2].

$$y = f(P, j).$$

К силам, порождающим упругие перемещения, относятся: сила резания, сила зажима, центробежная сила и т. д.

Жесткость технологической системы и соответствующие ей упругие перемещения определяются как жесткостью заготовки – $j_{заг}$, так и жесткостью части технологической системы, с которой связан обрабатывающий инструмент.

Относительное упругое перемещение инструмента и заготовки можно определить по формуле:

$$y = y_з + y_д + y_п,$$

где $y$ – упругое относительное перемещение инструмента и заготовки; $y_з$ – упругое перемещение заготовки относительно станины станка; $y_д$ – собственные упругие деформации заготовки; $y_п$ – упругое перемещение инструмента относительно станины станка.

Рассмотрим влияние силы резания на упругие деформации заготовки при ее консольном закреплении (см. рис. 2.1). Подобная схема базирования широко применяется на токарных, шлифовальных и зубообрабатывающих станках.

На деформацию заготовки наибольшее влияние оказывает составляющая сила резания $P_y$, некоторое влияние также оказывают силы резания $P_x$ и $P_z$ . Практически влияние последних учиты вается тем, что при испытании жесткости нагружение системы производят силой, совпадающей по направлению с суммарной силой резания, хотя расчет жесткости ведут только по составляющей $P_y$.

Величина деформации заготовки зависит от схемы ее закрепления. При консольном закреплении в патроне токарного станка (см. рис. 2.1) наибольшее ее отжатие имеет место на правом свободном конце [2].

$$y_{\max} = \frac{P_y \cdot l^3}{3E \cdot J} \ ,$$

где $l$ – вылет детали, мм; $E$ – модуль упругости материала заготовки, МПа; $J$ – момент инерции сечения заготовки, мм$^4$.

При консольном закреплении вид отклонения формы заготовки в продольном сечении – конусность.

При обработке заготовок на металлорежущих станках большую роль играет их жесткость, которая предопределяет точность и производительность обработки, место и усилие зажима, режимы и др. факторы процесса обработки и его результаты. При обработке консольно закрепленных прутковых заготовок на токарных станках с увеличением вылета консоли увеличивается прогиб заготовки вследствие действия сил резания. Поэтому часто при обработке маложестких заготовок на токарных станках применяют промежуточные опоры (люнеты). При обработке заготовок на станках имеют место выбор зазоров между узлами станка, а также упругие деформации узлов станка, приспособления и инструмента в направлении действия силы резания. Но при выполнении данной работы ими можно пренебречь, так как они во много раз меньше упругой деформации заготовки.

## Применяемое оборудование, приборы, материалы и инструменты

- Токарный станок с трехкулачковым патроном.
- Резец проходной.
- Пруток из стали 45 (ГОСТ 1050–88) ∅15 – 25 мм и длиной $l$ = 230 – 300 мм. Чем больше диаметр заготовки, тем больше должна быть ее длина.
- Микрометр с пределами измерений 0 – 25 мм, с ценой деления 0,01 мм.
- Штангенциркуль с пределами измерений 0 – 250 мм, с ценой деления 0,1 мм.

## Порядок выполнения работы

Заготовка – пруток устанавливается в трехкулачковом патроне токарного станка согласно схеме, приведенной на рис. 2.2.

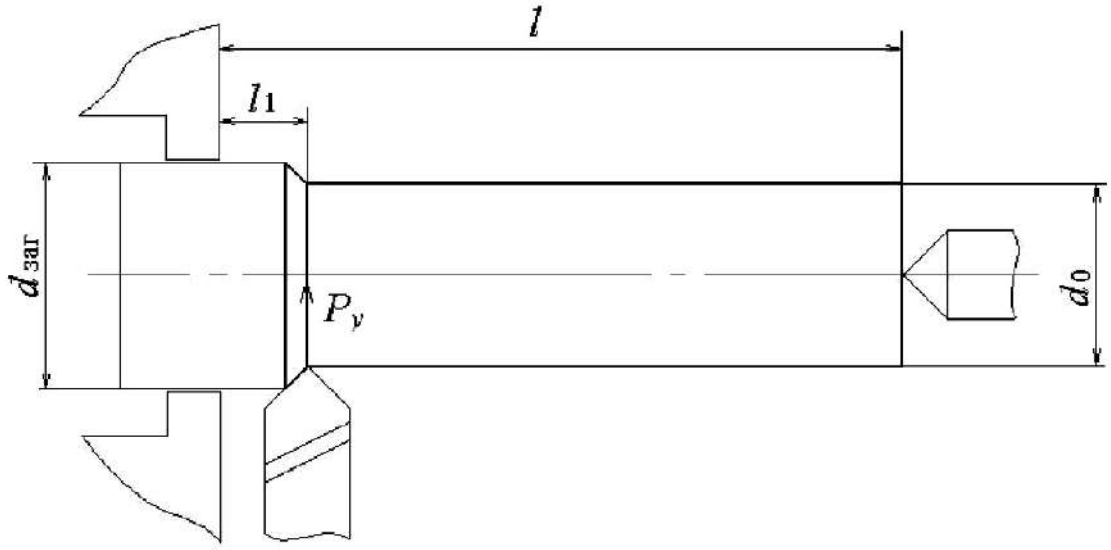



Рис. 2.2. Схема установки заготовки

Для заготовки с диаметром $d_0$ = 15 мм длина консольной части должна составлять $l$ = 160 мм, а при $d_0$ = 25 мм – $l$ = 200 мм. После установки заготовка обрабатывается на размер $d_0$ для устранения погрешностей установки и погрешностей формы заготовки, что обеспечивает равномерность припуска при последующей обработке.

Рекомендуется свободный консольный конец заготовки зафиксировать с помощью заднего центра. Предварительная обработка выполняется с небольшой подачей $S$ и глубиной резания $t$. После этого микрометром выполняется замер полученного диаметра заготовки $d_0$ и результат заносится в отчет.

Затем задний центр отводится от консольного конца заготовки и выполняется ее обтачивание по всей длине (кроме технологически необходимого участка $l_1 \leq 10$ мм).

При этом рекомендуются следующие диапазоны параметров используемого режима резания:

1) частота вращения шпинделя – $n$ = 200 – 500 об/мин;
2) подача $s$ = 0,1 – 0,3 мм/об;
3) глубина резания $t$ = 0,5 – 1,0 мм.

После токарной обработки производится замер диаметров $d_1$, $d_2$ и $d_3$ в сечениях, соответствующих наибольшей длине вылета заготовки $l$, середине заготовки 0,5$l$ и наименьшей длине вылета $l_1$ (рис. 2.3).

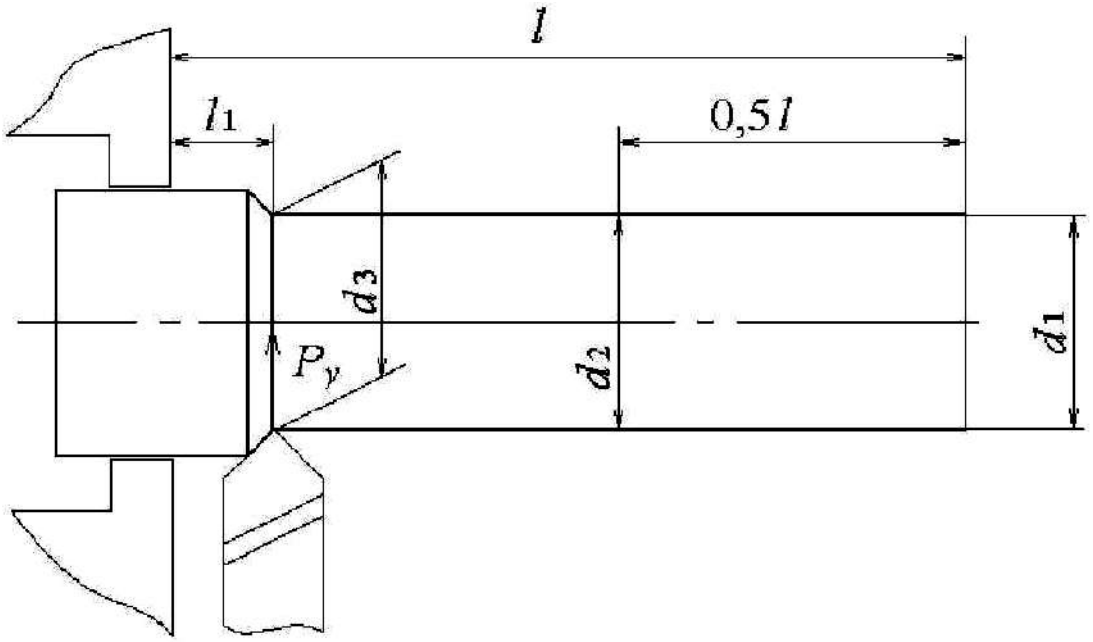



Рис. 2.3. Схема замера диаметров и размеров длин обработанной заготовки

Измерение диаметров выполняется микрометром с точностью до 0,01 мм, измерение длин – штангенциркулем с точностью до 0,1 мм. Результаты измерения заносятся в таблицу.

## Методика выполнения работы и обработки результатов наблюдений

Необходимо произвести расчет ожидаемой погрешности формы заготовки после ее обработки под действием радиальной составляющей усилия резания $P_y$ (влиянием сил $P_z$ и $P_x$ пренебрегаем).

При наружном продольном точении радиальная составляющая силы резания может быть определена по формуле [1]:

$$P_y = 10\, C_p \cdot s^y \cdot t^y \cdot V^n \cdot K_p, \quad (1)$$

где $C_p = 243$ при обработке конструкционной стали с $\sigma_в = 750$ МПа твердосплавными резцами; $t$ – глубина резания, мм;, $S$ – подача, мм/об., $V$ – скорость резания, м/мин.

Пренебрегая уменьшением глубины резания на конце заготовки, принимаем

$$t = \frac{d_o - d_з}{2}. \quad (2)$$

Скорость резания рассчитывается по формуле [1]

$$V = \frac{\pi \cdot d_0 \cdot n}{1000}. \quad (3)$$

Значения коэффициентов $x, y, n, K_p$ приведены [1].

Прогиб консольно закрепленной заготовки у (мм) под действием радиальной составляющей силы резания $P_y$ рассчитывается по следующей формуле [2] :

$$y = \frac{P_y \cdot l^3}{3E \cdot J}, \quad (4)$$

где $J$ – осевой момент инерции сечения, мм$^4$;
для тел круглого сечения:

$$J = \frac{\pi \cdot d_0^4}{64}, \quad (5)$$

$E$ – модуль упругости материала заготовки:

$E = 2{,}1 \cdot 10^5$ МПа – для стали; $E = 1{,}05 \cdot 10^5$ МПа – для чугуна [1].

Определяются прогибы $y$ и расчетные диаметры в трех сечениях заготовки на расстояниях $l$; $0{,}5l$ и $l_1$.

Все расчетные величины заносятся в таблицу.

Таблица 2.1

Экспериментальные и расчетные величины диаметров заготовки

| Параметр образца | Положение сечений | | |
|---|---|---|---|
| | $l$ = | 0,5$l$ = | $l_1$ = |
| Диаметр до обработки | $d_0$ = | | |
| Диаметр после обработки | $d_1$= | $d_2$ = | $d_3$ = |
| Прогиб | $y_1$ = | $y_2$ = | $y_3$ = |
| Расчетный диаметр $d_{р1} = d_0 - 2t + 2y$ | $d_{р1}$ = | $d_{р2}$ = | $d_{р3}$ = |

Сделать выводы на основе сопоставления фактически полученных диаметров с их расчетными величинами.

## Отчет по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Цель работы.
2. Схему замера диаметров и размеров длин обработанной заготовки (рис. 2.3).
3. Параметры используемого режима резания.
4. Расчет ожидаемых диаметров заготовки (см. табл. 2.1).
5. Параметры экспериментальных и расчетных величин диаметров заготовки (таблица).
6. Выводы по работе.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Чем объяснить разницу в расчетных и замеренных диаметрах?
2. Будут ли совпадать расчетные и замеренные диаметры в условиях обеспечения абсолютно жесткой заделки (крепления) детали в патроне?
3. Будут ли уменьшаться погрешности обработки при увеличении глубины резания и подачи?
4. Какую геометрическую форму будет иметь вал после обработки его с консольной установкой в патроне?
5. Какая форма детали получится в случае обработки вала в центрах?
6. Уменьшится ли погрешность формы детали при обработке материалов с меньшим модулем упругости?
7. Объясните появление такого вида отклонения профиля продольного сечения, как седловидность (или корсетность).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник технолога–машиностроителя. В 2–х т. Т.2 / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова, А. Г. Суслова – 5–е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001– 944 с.
2. Егоров М. Е. и др. Технология машиностроения, М.: Высшая школа, 1976, 526 с.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

### Цель работы

Ознакомиться с методикой использования методов математической статистики в технологии машиностроения и научиться использовать статистический метод исследования для определения точности обработки.

### Краткие теоретические сведения

Метод математической статистики получил широкое распространение для обработки результатов различных исследований. В технологии машиностроения он применяется для анализа точности технологических процессов, работы металлорежущего оборудования и статистического контроля в процессе производства.

Задачами статистического анализа точности технологического процесса являются определение:

1. Суммарной точности механической обработки деталей.
2. Точности настройки станка.
3. Стабильности разработанного технологического процесса с выявлением и анализом причин, вызывающих его нарушение.

Металлорежущим станкам присущи погрешности взаимного расположения узлов и деталей – отклонение от параллельности, соосности, перпендикулярности и т. д. Поэтому при получении заданных размеров партии деталей неизбежны погрешности. Одни могут уве-

личивать размер детали, другие – уменьшать его. Алгебраическая сумма погрешностей, действующих одновременно, образует суммарную или результирующую погрешность обработки. Она является мерой точности выбранного метода обработки и режимов резания.

Для определения ожидаемой суммарной погрешности обработки пользуются следующими тремя методами:

1. С помощью таблиц экономической точности обработки.
2. Статистическим методом анализа точности обработки.
3. Расчетно-аналитическим методом.

Полученный размер детали является случайным событием, а значение размера – случайной величиной. Все случайные размеры обладают закономерностями, которые можно изобразить в виде кривых распределения в зависимости от вида погрешности.

Погрешности, возникающие в результате различных причин подразделяются на *систематические* (постоянные и переменные) и *случайные*.

*Систематические постоянные погрешности* не изменяются по величине при обработке одной или нескольких партий заготовок и возникают под влиянием действия постоянного фактора.

*Пример*

1. Погрешность изготовления оборудования, приспособлений и т. п.

   а) неперпендикулярность оси отверстий и базовой поверхности заготовки в результате неперпендикулярности оси шпинделя и плоскости стола вертикального сверлильного станка;

   б) ошибки межосевого расстояния отверстий вследствие неправильно выдержанных расстояний в кондукторе;

   в) погрешность изготовления мерного инструмента.
2. Неправильная градуировка шкалы.
3. Отклонение от нормальной температуры в помещении. Систематические переменные погрешности могут влиять на точность обработки непрерывно или периодически,

   непрерывно влияющая погрешность.

   *Пример*

1. Погрешность, вызванная размерным износом режущего инструмента.
2. При обработке длинных валов наблюдается конусность.
3. а) периодически влияющая погрешность.

4. Погрешность, возникающая в результате температурной деформации станка в период его пуска до состояния теплового равновесия.
5. Накопленная погрешность микрометра, которая не сказывается при измерении малых величин, но сказывается при измерении больших величин.

*Случайные погрешности* – погрешности непостоянные по величине и знаку. Они возникают в результате большого количества не связанных между собой факторов. Определить момент их появления и величину случайных погрешностей значительно сложнее, поэтому сложнее и оказывать на них влияние. Зачастую повлиять на случайные погрешности можно лишь путем коренного изменения технологического процесса (например, вместо токарной обработки ввести шлифовальную).

Погрешность партии деталей называют постоянной, если погрешности деталей в партии одинаковы. Такая погрешность получается под действием постоянных факторов, неизменных в точение всей обработки партии деталей. У постоянной погрешности поле рассеивания равно нулю, т. е. рассеивание отсутствует.

Погрешность партии деталей называют закономерно изменяющейся, если по ходу обработки можно проследить закономерность в изменении погрешности деталей.

В этом случае форма кривой распределения зависит от закона изменения общего действия факторов, вызывающих погрешность.

Благодаря случайным погрешностям, размеры деталей в партии (серии) получаются различными с колебанием в пределах допуска.

При проведении статистических исследований часто заменяют опытные кривые распределения известными математическими кривыми распределения.

Исследования показали, что при работе на настроенных металлорежущих станках, когда нет резко доминирующих погрешностей по величине и по времени, распределение действительных размеров партии деталей обычно соответствует закону нормального распределения Ляпунова-Гаусса. Уравнение этой кривой имеет вид:

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{x^2}{2\sigma^2}},$$

где $y$ – частота появления погрешности; $e$ – основание натурального логарифма, равное 2,7182; $\sigma$ – среднее квадратичное отклонение размера.

Особенностью кривой нормального распределения является то, что с увеличением σ кривая сплющивается, ветви раздвигаются (рис. 3.1). Следовательно, σ является мерой рассеивания размеров.

Для оценки точности токарной обработки в работе применяется статистический метод исследования, который позволяет путём анализа кривых рассеяний размеров подсчитать процент брака, т. е. установить пригодность процесса для достижения определённой величины заданного допуска. В результате действия случайных погрешностей происходит рассеяние действительных размеров исследуемой величины, которое можно представить в виде таблиц или графиков. Для этого производится измерение 25 деталей.

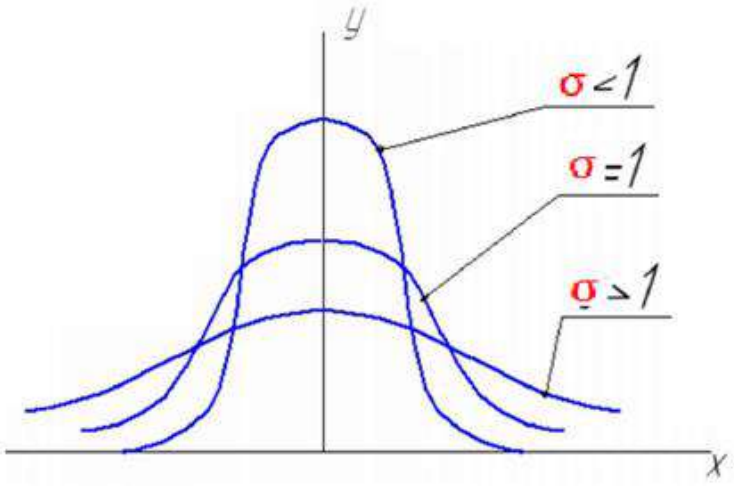



Рис. 3.1. Изменение формы кривой нормального распределения в зависимости от среднего квадратичного отклонения размера

Предварительно заготовка обрабатывается на токарном станке при одной настройке без смены и подналадки инструмента. Предварительная настройка осуществляется на размер, заданный преподавателем. После настройки лимб нониуса поперечной подачи устанавливается на ноль. После обработки каждой детали резец отводится от детали и затем вновь устанавливается в нужное положение по нониусу станка.

Рассеяние размеров подчиняется закону нормального распределения. Для построения кривой фактического распределения размеров, после измерения всех обработанных деталей, полученные размеры разбивают на группы в пределах определенного интервала. Цена интервала выбирается несколько больше цены измерения инструмента. Так, например, при измерении микрометром цена интервала принимается равной 0,02 или 0,05 мм. Результаты заносятся в таблицу (табл. 3.2) и на график (рис. 3.2).

При построении графика по оси ординат откладывают число заготовок с одинаковыми размерами, а по оси абсцисс – их размеры.

После соединения точек получается ломаная линия. При большом количестве точек эта кривая приближается к кривой нормального распределения.

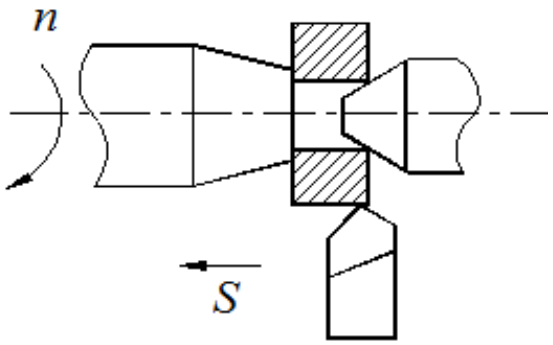



Рис. 3.2. Схема настройки

Для сопоставления полученной кривой с кривой нормального распределения на графике строят по точкам $y_{max}$, $y_{min}$, $y_{\sigma}$ кривую нормального распределения. После этого проводят две вертикальные линии, ограничивающие поле допуска (заданного преподавателем). Если эти линии охватывают кривую распределения, то брака не будет. Если поле допуска окажется внутри кривой распределения, то брак неизбежен. По соответствующим формулам математической статистики можно подсчитать процент брака.

Для того, чтобы определить, насколько полученная кривая рассеяния фактических размеров приближается к теоретической кривой нормального распределения, обе кривые совмещаются в одинаковом масштабе.

## Оборудование:

Токарно-винторезный станок.
Резцы проходные твердосплавные.
Микрометр.
Специальные образцы – 25 шт.

## Порядок проведения работы

1. Записать техническую характеристику измерительного инструмента.

2. Настроить станок на обработку образцов в размер с указанными предельными отклонениями, заданный преподавателем. (например для $\emptyset\, 50^{+0,10}_{-0,06}$, определяется средний размер $\frac{50,1+49,94}{2} === 50,03$, затем методом пробных стружек на первом образце настраиваемся на размер 50,03 мм, следующие образцы обрабатываются при полученной настройке без смены и подналадки инструмента).
3. Провести измерение действительных размеров с помощью микрометра.
4. Полученный результат занести в табл. 3.1.
5. Произвести математическую обработку результатов. Подсчитать средний измеренный размер диаметра ($d_{ср}$), построить гистограмму распределения размеров, подсчитать среднее квадратичное отклонение.
6. Определить вероятность появления годных деталей и возможного брака, наметить мероприятия по его уменьшению.

Измерение размеров партии деталей в количестве не менее 25 штук проводят по диаметру ($d$). Средний измеренный размер:

$$d_{ср} = \frac{d_1+d_2+d_3+ \ldots +d_n}{n} = \frac{1}{n}\sum d_i \,,$$

где $n$ – действительное число измеренных деталей в партии.

Таблица 3.1

Результаты измерений

| №№ п/п | Размер | №№ п/п | Размер | №№ п/п | Размер | №№ п/п | Размер | №№ п/п | Размер |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 17,89 | 6 | 17,92 | 11 | 17,93 | 16 | 17,94 | 21 | 17,94 |
| 2 | 17,95 | 7 | 17,95 | 12 | 17,96 | 17 | 17,96 | 22 | 17,96 |
| 3 | 17,97 | 8 | 17,97 | 13 | 17,97 | 18 | 17,98 | 23 | 17,98 |
| 4 | 17,98 | 9 | 17,99 | 14 | 17,98 | 19 | 18,00 | 24 | 18,00 |
| 5 | 18,01 | 10 | 18,02 | 15 | 18,02 | 20 | 18,04 | 25 | 18,05 |

Среднее квадратичное отклонение размера:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(d_1- d_{ср})^2+(d_2- d_{ср})^2+(d_3- d_{ср})^2+ \ldots +(d_1- d_{ср})^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}},$$

где $x_i = d_i - d_{ср}$.

Разница между наибольшим и наименьшим размерами детали называется *полем рассеяния*. Величина поля рассеяния ω = 6σ (т. е. от -3σ до +3σ).

Для построения графика рассеяния фактических размеров $d$ поле рассеяния разбивается на интервалы $\Delta d$. Количество интервалов $N$ для удобства построения выражается нечетным числом и берется обычно равным $7 \div 15$ .

$$\Delta d = \frac{d_{i\max} - d_{i\min}}{N}.$$

По данным измерений составляется табл. 3.2.

Таблица 3.2

Результаты расчетов

| Интервал | Частота $m$ | $L_m \cdot m_i$ | $X_i = L_m - x$ | $X_i^2 \cdot 10^4$ | $X_i^2 \cdot m \cdot 10^4$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 17,89–17,91 | 1 | 17,90 | –0,08 | 64 | 64 |
| 17,91–17,93 | 1 | 17,92 | –0,06 | 36 | 36 |
| 17,93–17,95 | 3 | 53,82 | –0,04 | 16 | 48 |
| 17,95–17,97 | 5 | 89,80 | –0,02 | 4 | 20 |
| 17,97–17,99 | 6 | 107,88 | 0 | 0 | 0 |
| 17,99–18,01 | 4 | 72,00 | +0,02 | 4 | 16 |
| 18,01–18,03 | 3 | 54,06 | +0,04 | 16 | 48 |
| 18,03–18,05 | 1 | 18,04 | +0,06 | 36 | 36 |
| 18,05–18,07 | 1 | 18,060 | +0,08 | 64 | 64 |
| | 25 | 449,48 | | | 332 |

Примечание: $L_m$– среднее значение интервала размеров.

Средний арифметический размер ($x$) определяется по формуле

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i M_i = \frac{449{,}48}{25} = 17{,}979 \approx 17{,}98$$

Среднее квадратичное отклонение (σ) определяется по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i^2 m_i} = \sqrt{\frac{332}{10^4 \cdot 25}} = 0{,}0365 \approx 0{,}04.$$

Для сокращения расчетов и упрощения примерного построения кривой нормального распределения можно ограничиться определением только трех параметров: максимальной ординаты $y_{\max}$ (при $x = \bar{x}$),

ординаты точек перегиба $y_\sigma$ (при $x = \pm \sigma$) и величины поля рассеяния $\omega = \pm 3\sigma$.

На графике эмпирической кривой (ломаной) распределения построить теоретическую кривую распределения (кривая Гаусса) по 7 точкам, 6 из которых симметричны относительно $x$.

$$y_{\max} = 0{,}4\frac{n\cdot\Delta l}{\sigma} = 0{,}4\frac{25\cdot 0{,}02}{0{,}04} = 5{,}0 \quad \text{при } x = \overline{x},$$

$$y_\sigma = 0{,}242\frac{n\cdot\Delta l}{\sigma} = 0{,}242\frac{25\cdot 0{,}02}{0{,}04} = 3{,}0 \quad \text{при } x_\sigma = \overline{x} \pm \sigma,$$

$$y_{2\sigma} = 0{,}054\frac{25\cdot 0{,}02}{0{,}04} = 0{,}7 \quad \text{при } x_{2\sigma} = \overline{x} \pm 2\sigma,$$

$$y_{3\sigma} = 0 \quad \text{при } x_{3\sigma} = \overline{x} \pm 3\sigma.$$

где $y_{max}$ – максимальная ордината, $y_\sigma$ – ордината точки перегиба.

По этим данным строится приближенная теоретическая кривая нормального распределения (рис. 3.2). Чем она круче, тем меньше величина σ и тем выше качество технологического процесса, и наоборот.

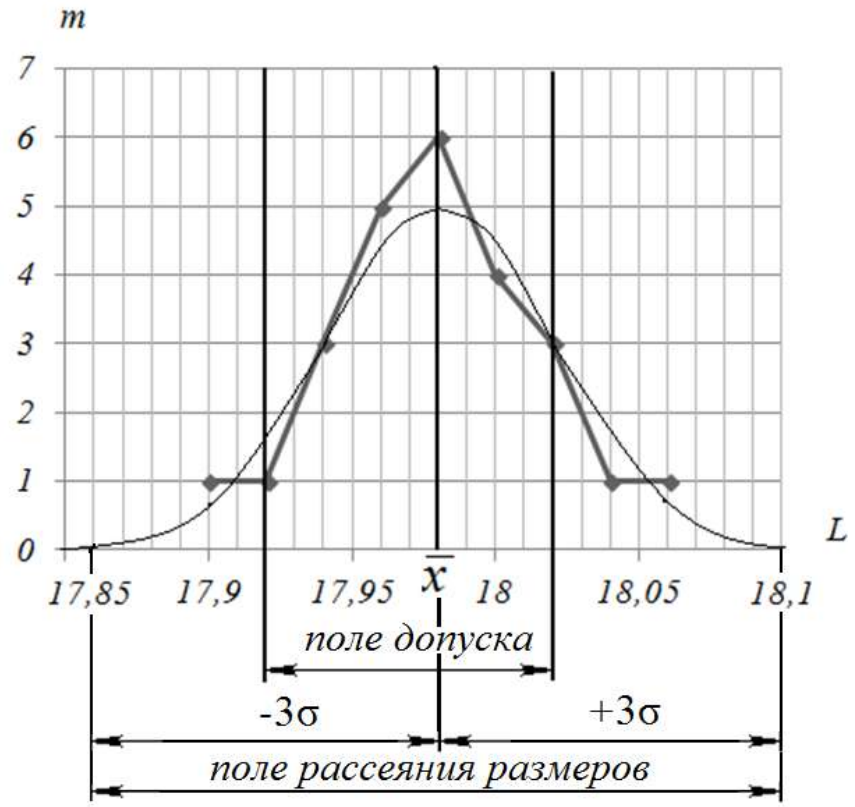



Рис. 3.2. Кривая рассеяния фактических размеров $L$ и кривая нормального распределения

Для того, чтобы определить, насколько полученная кривая рассеяния фактических размеров приближается к теоретической кривой

нормального распределения, обе кривые совмещаются в одинаковом масштабе.

На графике провести две вертикальные линии, ограничивающие поле допуска.

Суммируя табличные значения половины предельных площадей под кривой нормального распределения от $t_i$, находим вероятность получения годных деталей.

$$P = \Phi(t_1) + \Phi(t_2).$$

Ожидаемый общий процент брака определяется по следующей формуле: $P_1 = 100 - P$.

По формулам математической статистики определить вероятность получения брака, %.

Для случая смещения центра поля рассеяния от середины поля допуска определяется величина смещения центра для поля рассеяния по формуле.

,

$$\Delta L_{ц} = \bar{x} - \frac{L_{в} + L_{н}}{2} = 17{,}98 - \frac{18{,}03 + 17{,}92}{2} = 0{,}005\,\text{мм}$$

где $L_в$ *и* $L_н$ – координаты линий поля допуска.

Вероятность получения брака ($P$ %) по верхнему пределу допуска (+):

$$P = 0{,}5 - \Phi\,(t)\cdot 100,\ \%.$$

По нижнему пределу допуска (–):

$$P = 0{,}5 - \Phi\,(t)\cdot 100,\ \%,$$

где Ф – функция Лапласа.

Значение аргумента определяется по формулам:

$$t_{в} = \frac{L_{в} - \bar{x}}{\sigma} = \frac{18{,}03 - 17{,}98}{0{,}04} = 1{,}25$$

$$t_{н} = \frac{L_{в} - \bar{x}}{\sigma} = \frac{17{,}92 - 17{,}98}{0{,}04} = -1{,}5.$$

Величина функции Лапласа определяется по таблицам математической статистики [табл. 3.3 в конце работы]:

$$P_{в} = (0{,}5 - 0{,}3944)\cdot 100 = 10{,}56\ \%\ ;$$

$$P_{н} = (0{,}5 - 0{,}4332)\cdot 100 = 6{,}68\ \%\ .$$

Для случая совмещения центра поля рассеяния с серединой поля допуска ($\Delta L_y = 0$):

$$P = \left[1 - 2\Phi\left\{\frac{L_в - L_н}{2 \cdot \sigma}\right\}\right] \cdot 100$$

$$P = \left[1 - 2\Phi\left\{\frac{18{,}03 - 17{,}92}{2 \cdot 0{,}04}\right\}\right] \cdot 100 = 1 - 2\Phi(1{,}375) = 16{,}94\ \%.$$

Определение процента брака по кривым рассеяния не позволяет установить момента появления брака, т. е. не отражает последовательность обработки. Этот недостаток можно восполнить путём построения точечных диаграмм.

Для построения такой диаграммы по оси абсцисс откладывают номера последовательно обрабатываемых деталей, а по оси ординат – фактические размеры каждой детали.

## Содержание отчёта

В отчёте должно быть название работы, цель, оборудование, схема настройки, протоколы измерения, весь ход расчёта кривых распределения, выводы.

Таблица 3.3

Значение величины Ф($t$)/2 (половины предельных площадей под кривой нормального распределения)

| $t$ | Ф($t$)/2 | $t$ | Ф($t$)/2 | $t$ | Ф($t$)/2 | $t$ | Ф($t$)/2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,00 | 0,0000 | 0,90 | 0,3160 | 1,80 | 0,4640 | 2,70 | 0,4965 |
| 0,05 | 0,0200 | 0,95 | 0,3290 | 1,85 | 0,4560 | 2,75 | 0,4970 |
| 0,10 | 0,0400 | 1,00 | 0,3415 | 1,90 | 0,4715 | 2,80 | 0,4975 |
| 0,15 | 0,0595 | 1,05 | 0,3530 | 1,95 | 0,4743 | 2,85 | 0,4975 |
| 0,20 | 0,0795 | 1,10 | 0,3045 | 2,00 | 0,4775 | 2,90 | 0,4980 |
| 0,25 | 0,0985 | 1,15 | 0,3760 | 2,05 | 0,4800 | 2,95 | 0,4985 |
| 0,30 | 0,1180 | 1,20 | 0,3850 | 2,10 | 0,4820 | 3,00 | 0,49865 |
| 0,35 | 0,1370 | 1,25 | 0,3945 | 2,15 | 0,4840 | 3,10 | 0,4990 |
| 0,40 | 0,1555 | 1,30 | 0,4030 | 2,20 | 0,4860 | 3,20 | 0,4995 |
| 0,45 | 0,1735 | 1,35 | 0,4115 | 2,25 | 0,4880 | 3,30 | 0,4995 |
| 0,50 | 0,1915 | 1,40 | 0,4190 | 2,30 | 0,4895 | 3,40 | 0,4995 |
| 0,55 | 0,2090 | 1,45 | 0,4265 | 2,35 | 0,4905 | 3,50 | 0,49975 |
| 0,60 | 0,2255 | 1,50 | 0,4330 | 2,40 | 0,4920 | 3,60 | 0,49985 |
| 0,65 | 0,2420 | 1,55 | 0,4395 | 2,45 | 0,4930 | 3,70 | 0,4999 |
| 0,70 | 0,2580 | 1,60 | 0,4450 | 2,50 | 0,4940 | 3,80 | 0,49993 |
| 0,75 | 0,2735 | 1,65 | 0,4495 | 2,55 | 0,4945 | 3,90 | 0,49996 |
| 0,80 | 0,2680 | 1,70 | 0,4565 | 2,60 | 0,4955 | 4,00 | 0,4997 |
| 0,85 | 0,3025 | 1,75 | 0,4600 | 2,65 | 0,4960 | 5,00 | 0,5000 |

## Литература

1. Егоров М. Е. и др. Технология машиностроения. М., 1976, 534 с.
2. Якушев А. И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. М. Машиностроение, 1979, 340 с.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4
# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ ТОКАРНОГО СТАНКА

## Цель работы

Ознакомление с методиками определения жесткости технологической системы экспериментальными методами Определить жесткость токарного станка в 3–х точках по длине станины.

## Краткие теоретические сведения

При обработке на металлорежущих станках технологическая система (ТС) подвергается упругим деформациям под действием сил, приложенных к ее звеньям. Это приводит к изменению настроенного положения между деталью и режущим инструментом.

Наибольшее влияние на изменение настроенного положения оказывает составляющая силы резания ($P_y$), направленная радиально к обрабатываемой поверхности.

Под влиянием силы резания в упругой системе, «станок – приспособление – инструмент – деталь» (СПИД) возникают деформации, которые приводят к изменению положения режущей кромки относительно обрабатываемой детали (за счет этого изменяются размеры обрабатываемой детали, появляются отклонения от правильной геометрической формы и т. п.).

Под жесткостью системы СПИД понимается способность системы оказывать сопротивление действию сил, стремящихся её деформировать. Жесткость системы СПИД определяется отношением радиальной составляющей силы резания ($Py$) к величине смещения режущей кромки ($y$).

$$j = \frac{P_y}{y}$$

Жесткость системы СПИД имеет важное значение в технологии машиностроения, так как от неё зависит и точность, и производи-

тельность обработки. В настоящей работе определяется жесткость токарного станка.

Существует два метода определения жесткости: статический и динамический (производственный). В настоящей работе используется производственный метод. При этом методе жесткость определяется непосредственно в процессе обработки заготовки.

## Оборудование:

1. Токарно-винторезный станок.
2. Специальные образцы (2 шт.).
3. Резцы проходные.
4. Микрометр.
5. Схема настройки.

1.

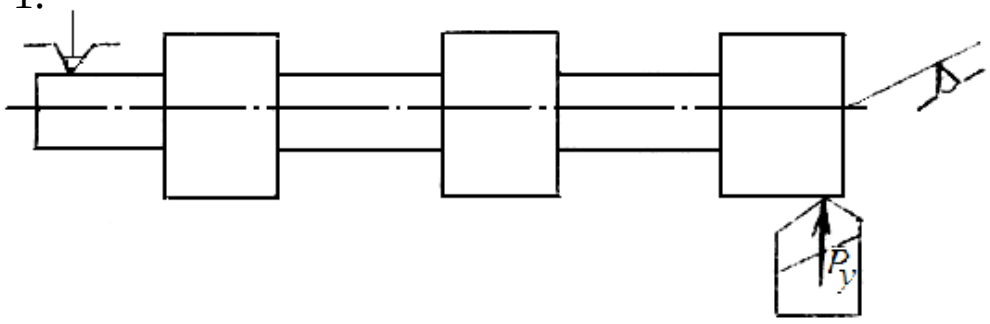



Рис. 4.1. Схема настройки

## Порядок выполнения работы

1. Измеряется геометрия резца: $\gamma$, $\alpha$, $\lambda$, $\varphi$, $\varphi'$ (град), $r$ (мм).
2. Определяется жесткость по методике № 1
3. Определяется жесткость по методике № 2.
4. Определяется износ резца $h_З$ (мм) после точения каждого образца.

## Определение жесткости по методике № 1

В начале работы измеряется диаметр каждой ступени образца ($d$). Затем производится точение образца при подаче $S$ = 0,2 мм/об., глубине резания $t$ = 0,3 мм.

После точения с прямой подачей (резец движется от задней бабки к передней) производится измерение диаметров каждой ступени ($d$). Затем, не меняя положения резца, производится точение с обрат-

ной подачей (без врезания), после чего вновь повторно замеряются диаметры всех ступеней ($d_0$).

Вследствие наличия деформации в системе СПИД, происходящей под воздействием сил резания, при точении с обратной подачей резец также будет снимать стружку.

Данные опытов заносятся в таблицу – протокол №1 и 2.

Опыты проводятся на двух образцах равной длины.

**Протокол № 1 (№ 2) для образца $l$ =___ мм.**

| № измерения | Диаметры ступеней, мм | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | У передней бабки | | | Посередине | | | У задней бабки | | |
| | $d$ | $d_П$ | $d_О$ | $d$ | $d_П$ | $d_О$ | $d$ | $d_П$ | $d_О$ |
| 1 | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | |
| Среднее | | | | | | | | | |

Расчет жесткости производится по формуле

$$j = C_y \cdot S^{0,75} \cdot HB^{2,0} \left( \frac{d - d_n}{d_n - d_o} - 1 \right)$$

где $C_у$ – постоянный коэффициент; $C_у$ = 0,0027 при φ = 45°; γ = 0°; $\lambda = 0°$, $r$ = 2 мм, $h_З$ = 2 мм.

Для резцов, имеющих другую геометрию, следует участь поправочные коэффициенте (см. приложение к лаб.работе 4).

Для образцов твердость –. $HB$ = 156 (ст.20); $HB$ = 179 (ст.30); $HB$ = 217 (ст.40).

## Определение жесткости по методике №2

В начале работы измеряются диаметры каждой ступени образца ($d$).

Затем по лимбу станка устанавливается заданная глубина резания ($t_З$).

После точения измеряется диаметр каждой ступеньки ($d_п$) и определяется фактическое значение глубины резания ($t_Ф$).

Вследствие деформации в системе СПИД $t_Ф$ не будет соответствовать $t_З$.

Данные опытов заносятся в таблицу – протокол № 3 (4). Опыты проводятся на двух образцах равной длины

**Протокол № 3(4) для образца *l* =____мм**

| № измере-ния | Результаты измерений, мм | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | У передней бабки | | | | Посередине | | | | У задней бабки | | | |
| | $t_з$ | $d$ | $d_п$ | $t_Ф$ | $t_з$ | $d$ | $d_п$ | $t_Ф$ | $t_з$ | $d$ | $d_п$ | $t_Ф$ |
| 1 | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | |
| Среднее | | | | | | | | | | | | |

Расчет жесткости производится по формуле

$$j = \frac{C_y \cdot s^{0,75} \cdot HB^{2,0} \cdot t_ф^{0,5}}{t_з - t_ф}$$

Значение коэффициента $C_y$ принимается такое же, как и в предыдущей методике.

## Приложение

Поправочные коэффициенты к определению коэффициента $C_y$

| φ,° | 30 | 45 | 60 | 75 | 90 |
|---|---|---|---|---|---|
| $k_φ$ | 1,63 | 1,0 | 0,7 | 0,54 | 0,44 |

| γ, ° | –2 | 0 | 2 | 4 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|
| $k_γ$ | 1,1 | 1,0 | 0,98 | 0,85 | 0,78 |

| λ, ° | 0 | 2 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
| $k_λ$ | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,25 |

| $h_з$, мм | 0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 |
|---|---|---|---|---|---|
| $k_h$ | 0,4 | 0,52 | 0,65 | 0,82 | 1,0 |

| $r$, мм | 0,1 | 0,3 | 0,5 | 0,8 | 1,0 | 2,0 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $k_r$ | 0,41 | 0,57 | 0,66 | 0,76 | 0,81 | 1,0 |

## Содержание отчета

В отчете должно быть название работы, цель, оборудование, схема настройки, протоколы намерений, необходимые расчеты и краткий вывод.

## Литература

1. "Технология машиностроения", М. Е. Егоров и др. М. Высшая школа, 1976 – 526 с.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. ПРОВЕРКА ТОЧНОСТИ ТОКАРНО–ВИНТОРЕЗНОГО СТАНКА

## Цель работы

Изучение методики определения геометрической точности узлов токарного станка в соответствии с ГОСТ 18097–93.

## Краткие теоретические сведения

Точность обрабатываемых деталей во многом определяется точностью работы станка. Последняя в свою очередь зависит от многих условий: качества установки и выверки станка на фундаменте, степени износа его деталей, величины зазора в подвижных соединениях, прочности крепления и фиксации деталей и узлов и т.п. Для получения деталей правильной формы с точно выдержанными размерами необходимо, чтобы станок, на котором они изготовляются, имел требуемую точность.

Точность металлорежущих станков нормируется государственными стандартами.

Снижение требуемой точности станка приводит к появлению погрешностей у обрабатываемых деталей и получению брака.

## Задание по работе:

Пользуясь данным руководством, следует ознакомиться с методикой проверки точности станка и произвести проверку, после чего дать заключение о его пригодности к дальнейшей работе.

Класс точности проверяемого станка – Н.

Необходимый инструмент и приспособления для выполнения работы:

1. Индикатор на стойке.
2. Комплект оправок из трех штук.
3. Линейка ≥ 300мм.
4. Микрометр.

## Индикатор часового типа

Во втулке *1* индикатора (рис. 5.1) расположен мерительный штифт *2* с наконечником *3*. Перемещение штифта с помощью зубчатой передачи, расположенной в корпусе, передается на стрелку *4*, причем один оборот стрелки соответствует перемещению штифта на *1* мм. Число целых оборотов стрелки (целые мм) отсчитываются по шкале указателя оборотов *5*, а часть оборота (сотые доли мм) – по шкале *6*.

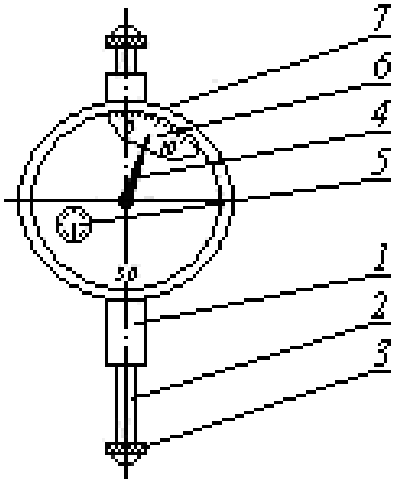



Рис. 5.1. Индикатор часового типа

Для установки индикатора на нуль, необходимо повернуть за ободок *7* циферблат до совпадения нулевого штриха шкалы *6* со стрелкой *4*.

Для замеров надо установить и закрепить стойку с индикатором напротив проверяемой поверхности и привести наконечник индикатора в соприкосновение с ней.

Индикатор при этом должен иметь натяг 1 – 2 оборота.

Ось мерительного штифта индикатора должна располагаться перпендикулярно проверяемой поверхности.

## Порядок проверка точности станка

***Проверка 1.1***. Прямолинейность продольного перемещения суппорта в горизонтальной плоскости.

Наибольшая длина перемещения: от 320 до 500 мм.

Допускаемое отклонение – 16 мкм в сторону от оси центров.

*Проверка при помощи оправки и индикатора.*

В центрах передней *4* и задней *5* бабок (рис. 5.2) устанавливают оправку *2* с цилиндрической измерительной поверхностью.

Резцедержатель должен быть расположен возможно ближе к оси центров станка.

На суппорте *1* (в резцедержателе) укрепляется индикатор *3* так, чтобы его измерительный наконечник касался боковой образующей оправки и был направлен к ее оси перпендикулярно образующей.

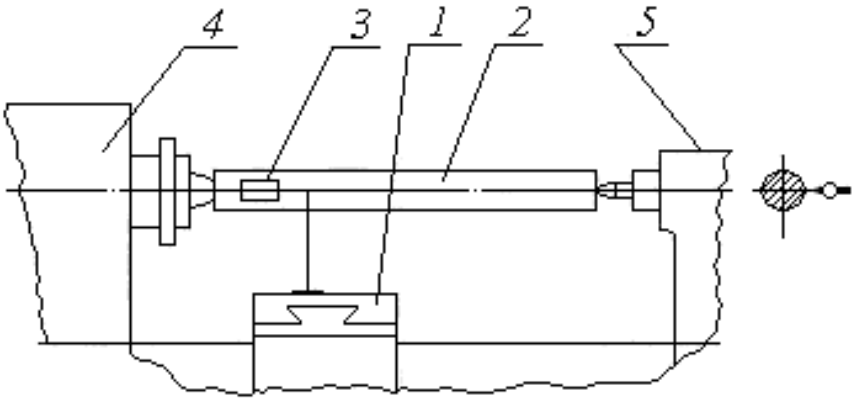



Рис. 5.2. Схема установки индикатора

Показания индикатора на концах оправки должны быть одинаковыми.

Суппорт перемещают в продольном направлении на всю длину хода.

Отклонения определяют как наибольшую алгебраическую разность показания индикатора.

***Проверка 1.2***. Прямолинейность продольного перемещения суппорта в вертикальной плоскости.

Наибольшая длина перемещения – от 320 до 500 мм.

Допуск – 20 мкм. Вогнутость не допускается.

Проверка при помощи оправки и индикатора *3*.

В центрах передней *4* и задней *5* бабок устанавливают оправку *2* с цилиндрической измерительной поверхностью. Резцедержатель должен быть расположен возможно ближе к оси центров станка.

На суппорте *1* (в резцедержателе) укрепляют индикатор *3* так, чтобы его измерительный наконечник касался верхней (нижней) образующей оправки и был направлен к ее оси перпендикулярно образующей.

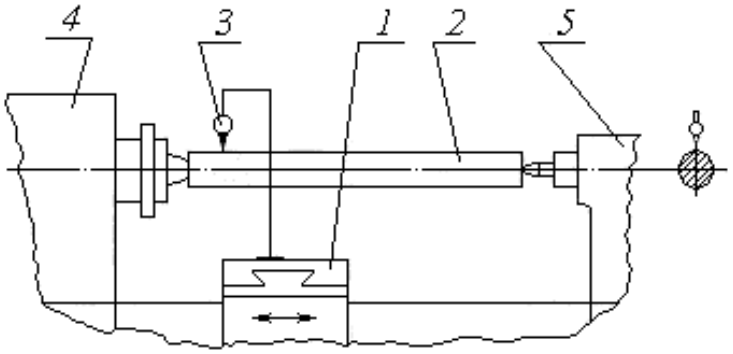



Рис. 5.3. Схема установки индикатора *3*

Суппорт перемещают в продольном направлении на всю длину хода.

Отклонение определяют как наибольшую алгебраическую разность показаний индикатора (если показания индикатора на концах оправки не одинаковое, то из результатов отклонений следует вычесть погрешность, вызванную установкой оправки).

Замеры повторяются три раза.

***Проверка 1.3.*** Радиальное биение центрирующей поверхности шпинделя передней бабки под патрон (рис. 5.4).

Наибольший диаметр обрабатываемого на станке изделия до 250 мм.

Допуск – 8 мкм.

Наибольший диаметр обрабатываемого на станке изделия – от 50 до 800 мм.

Допуск – 10 мкм.

На неподвижной части станка укрепляют индикатор *1* так, чтобы его измерительный наконечник касался проверяемой поверхности *2* и был направлен к ее оси перпендикулярно образующей.

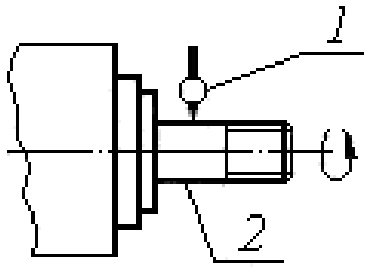



Рис. 5.4. Схема установки индикатора *1*

Шпиндель приводят во вращение в рабочем направлении. Шпиндель при измерении должен сделать не менее двух оборотов. Отклонение определяют как наибольшую алгебраическую разность показаний индикатора.

***Проверка 1.4***. Радиальное биение конического отверстия шпинделя передней бабки, проверяемое:

а) у торца;

б) на длине *J*.

Для 1.4, *а* допуск – 10 мкм.

Для 1.4, *б* допуск – 16 мкм на *J* = 200 мм.

В отверстие шпинделя *1* (рис. 5.5) вставляют контрольную оправку *3* с цилиндрической измерительной поверхностью.

На неподвижной части станка укрепляют индикатор 2 так, чтобы его измерительный наконечник касался измерительной поверхности оправки и был направлен к ее оси перпендикулярно образующей.

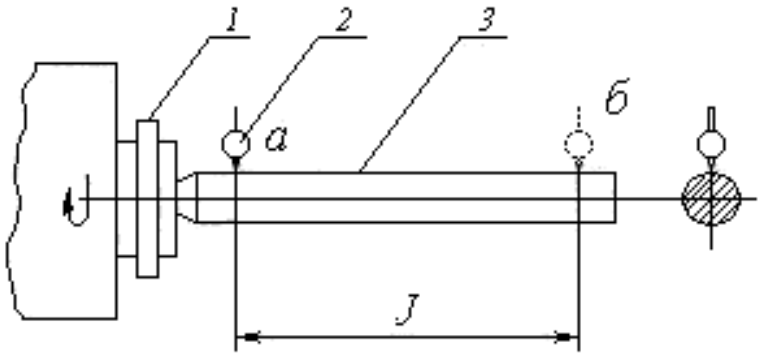



Рис. 5.5. Схема установки индикатора 2

Шпиндель приводят во вращение (в рабочем направлении).

При каждом измерении шпиндель должен сделать не менее двух оборотов.

Отклонение определяют как наибольшую алгебраическую разность показаний индикатора в каждом положении.

***Проверка 1.5.*** Параллельность оси вращения шпинделя передней бабки продольному перемещению суппорта:

а) в вертикальной плоскости;

б) в горизонтальной плоскости.

Наибольший диаметр обрабатываемого на станке изделия до – 250 мм.

Для 1.5, *а* допуск 12 мкм на $J$ = 150 мм.

Для 1.5, *б* допуск 6 мкм на $J$ = 150 мм.

Наибольший диаметр обрабатываемого на станке изделия – от 250 до 400 мм

Для 1.5, *а* допуск 16 мкм на $J$ = 200 мм.

Для 1.5, *б* допуск 8 мкм на $J$ = 200 мм.

В отверстие шпинделя *1* вставляют контрольную оправку *3* с цилиндрической измерительной поверхностью.

На суппорте *4* (в резцедержателе) (рис. 5.6) укрепляют индикатор *2* так, чтобы его измерительный наконечник касался измерительной поверхности оправки и был направлен к ее оси перпендикулярно образующей.

Суппорт перемещают в продольном направлении на всю длину хода $J$.

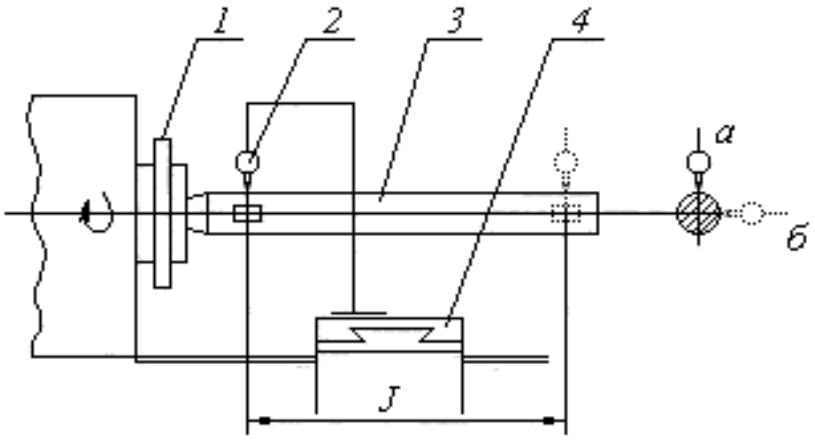



Рис. 5.6. Схема установки индикатора 2

Измерения производят по двум диаметрально противоположным образующим оправки (при повороте шпинделя на 180°).

Отклонение определяют как среднюю арифметическую результатов не менее чем двух измерений в каждой плоскости, каждый из

которых определяют как наибольшую алгебраическую разность показаний индикатора при перемещении суппорта.

***Проверка 1.6***. Параллельность оси конического отверстия пиноли задней бабки перемещению суппорта:

а) в вертикальной плоскости;

б) в горизонтальной плоскости.

Наибольший диаметр обрабатываемого на станке изделия – до 250 мм.

Для 1.6, *а* допуск 16 мкм на $J$ = 150 мм.

Для 1.6, *б* допуск 16 мкм на $J$ = 150 мм.

Наибольший диаметр обрабатываемого на станке изделия – от 250 до 400 мм.

Для 1.6, *а* допуск 20 мкм на $J$ = 200 мм.

Для I.6, *б* допуск 20 мкм на $J$ = 200 мм.

Заднюю бабку с полностью вдвинутой пинолью устанавливают на расстоянии от торца шпинделя до торца пиноли примерно равном наибольшему диаметру обрабатываемого на станке изделия.

Заднюю бабку и пиноль закрепляют.

В отверстие пиноли *3* (рис. 5.7) вставляют контрольную оправку *1* с цилиндрической измерительной поверхностью.

В суппорте *4* устанавливают индикатор *2* так, чтобы его измерительный наконечник касался измерительной поверхности оправки и был направлен к ее оси перпендикулярно образующей.

Суппорт перемешают в продольном направлении на длину $J$.

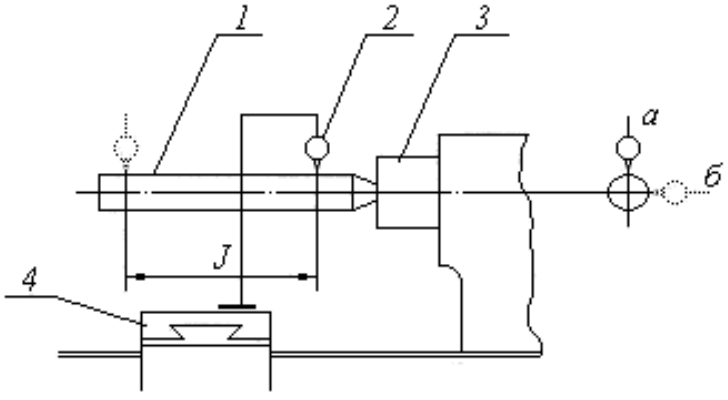



Рис. 5.7. Схема установки индикатора 2

Отклонение определяют как наибольшую алгебраическую разность показаний индикатора в указанных положениях суппорта.

## Содержание отчета:

1. Станок: ...
2. Модель станка: …
3. Наибольший диаметр обрабатываемого на станке изделия: …
4. Сводная таблица (табл. 5.1).
5. Заключение об износе узлов станка.

Таблица 5.1

**Результаты измерения точности станка модели …**

| Проверка | Что проверяется | Эскиз | Допуск в мкм | Результаты замеров | Среднее арифметическое | Величина отклонения от допустимого в мкм |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.1 | Прямолинейность продольного перемещения суппорта в горизонтальной плоскости | | 16 | 1)<br>2)<br>3) | | |

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6
# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ УСТАНОВКИ РАЗМЕРА ПО ЛИМБУ СТАНКА

## Цель работы

Ознакомиться с методикой оценки погрешности при установке размера по лимбу станка.

## Краткие теоретические сведения

При изготовлении деталей на металлорежущих станках часто приходится пользоваться лимбами, дающими возможность отсчитывать необходимые перемещения узлов станка. При пользовании лимбами (даже при перемещении на целое число делений лимба) не представляется возможным точно получить необходимое перемещение ввиду влияния погрешности установки.

Погрешность установки размера по лимбу станка является случайной погрешностью и зависит от многих переменных факторов: ве-

личины силы трения в направляющих, жесткости цепи перемещения, износа винтовой пары, зрения рабочего, освещенности рабочего места, ширины штрихов на шкале лимба, неточности шага винта, неточности нанесения делений на лимбе и др.

Величину погрешности установки по лимбу станка можно найти на основании наблюдений, построения кривых распределения и их математической обработки.

Для получения данных, по которым строится кривая распределения, необходимо многократно устанавливать узел станка в одно и то же положение по лимбу, фиксируя каждый раз измерительным прибором фактическое положение узла.

При такой методике проведения работы не учитываются составляющие погрешности установки, обусловленные неточностью шага винта и неточностью нанесения делений лимба, но значительно упрощается техника проведения эксперимента.

Указанные составляющие общей погрешности установки, как известно, не могут иметь значительной величины, а поэтому такое упрощение не вносит заметной ошибки в результаты эксперимента.

## Порядок проведения работы

Работу следует выполнять в такой последовательности:

1. Установить лимб станка на выбранное деление.
2. Закрепить на неподвижном узле станка индикаторную стойку. Измерительный наконечник индикатора должен касаться перемещающейся (при опыте) детали станка (рис. 6.1). Индикатор может быть установлен на любое деление с некоторым натягом.
3. С помощью винта (поворачивая рукоятку винта в обратном направлении) отвести назад (на 0,5 – 1 оборот винта) перемещающийся узел так, чтобы обязательно был выбран зазор в винтовой паре.
4. Поворачивая рукоятку винта, переместить узел станка до совпадения риски выбранного деления лимба с неподвижной отметкой. Окончательную доводку совпадения рисок произвести легким постукиванием руки по рукоятке винта. Записать показание индикатора.
5. Многократно (80 – 120 раз) повторить п. 3 и 4. Показания индикатора записать в табл. 6.1

6. Построить точечную диаграмму, в которой по оси абсцисс откладываются порядковые номера наблюдений, а по оси ординат – отсчет при наблюдении.
7. Произвести разбивку на интервалы и построить опытную кривую распределения.
8. Для удобства обработки результатов наблюдений показания индикатора после построения точечной диаграммы сгруппировать и свести в табл. 6.2.

Таблица 6.1

Результаты измерений

| Номер установки узла | Показания индикатора, мкм | Номер установки узла | Показания индикатора, мкм |
|---|---|---|---|
| | | | |

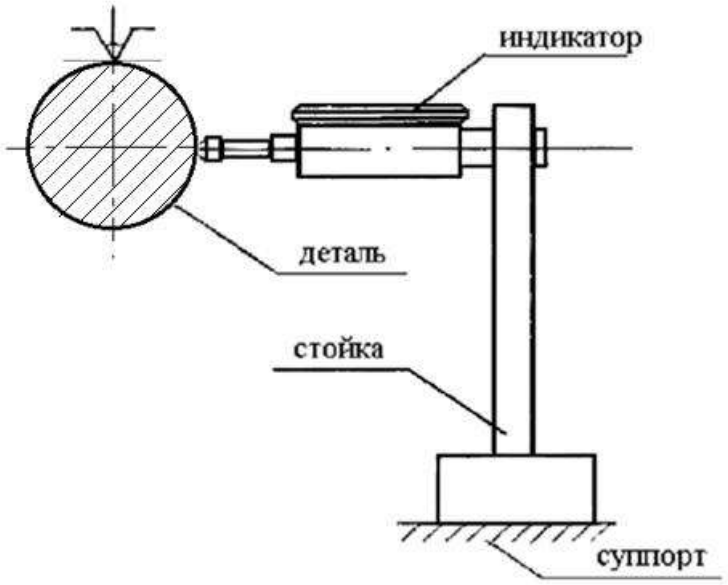



Рис. 6.1. Крепление индикатора для установки размера по лимбу станка

9. Подсчитать значения $\bar{x}$, $\sigma$ и $6\sigma$

10. Свести в табл. 6.3 данные для построения кривой нормального распределения.

11. Построить кривую нормального распределения, совместив ее с опытной кривой распределения.

При построении теоретической кривой абсциссы откладывать от среднего арифметического значения $\bar{x}$.

12. Составить отчет.

Таблица 6.2

Результаты расчетов

| Границы интервала измерения | Среднее значение Интервала, $x_{i\text{ср}}$ | Частота, $m_i$ | $x_{i\text{ср}} \cdot m_i$ | $x_{i\text{ср}} - \overline{x}$ | $(x_{i\text{ср}} - \overline{\overline{x}})^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $x_1 - x_2$<br>$x_2 - x_3$<br>и т.д. | | | | | |
| | | | $\sum x_{i\text{ср}} \cdot m_i$ | | $\sum (x_{i\text{ср}} - \overline{x})^2$ |

Таблица 6.3

Данные для построения кривой нормального распределения

| $x$ | $z = \frac{x}{\sigma}$ | $y$ | $m_i = y\frac{n\Delta x}{10^4 \cdot \sigma}$ |
|---|---|---|---|
| 0<br>$0{,}5 \cdot \sigma$<br>и т. д. | 0 | | |

## Содержание отчета

В отчете должны быть приведены следующие данные:

1. наименование работы;
2. наименование, модель и характеристика станка;
3. шаг винта перемещений и цена деления лимба;
4. схема измерения погрешности;
5. данные об измерительных приборах;
6. результаты опытов (по форме табл. 6.1, 6.2, 6.3);
7. построение точечной диаграммы и ее анализ, определение наличия систематической постоянной или систематической закономерной погрешности;
8. расчет величин $\overline{x}$, $\sigma$ и $6\sigma$;
9. графическое построение опытной кривой распределения и кривой нормального распределения;
10. выводы.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7
# ВЫБОР СХЕМЫ ТОЧЕНИЯ СТУПЕНЧАТОГО ВАЛИКА

## Цель работы

Ознакомиться со схемами обработки ступенчатых валиков при работе на ненастроенных станках.

## Краткие теоретические сведения

Обтачивание валов и других деталей (тел вращения) обычно разделяется на две операции*:* *черновое* (предварительное) и *чистовое* (окончательное) *обтачивание*. При черновом обтачивании снимают большую часть припуска; обработка производится с большой глубиной резания и большой подачей.

Рассмотрим несколько схем обточки ступенчатых валиков. При черновой обработке производительность зависит от выбора схемы, а при чистовой обработке – от характера простановки размеров и точности отдельных ступеней.

Черновое (предварительное) обтачивание вала, имеющего несколько ступеней и изготовленного из проката, можно выполнять по различным схемам обработки. На рис. 7.1 представлены три схемы обтачивания ступенчатого вала (цифрами обозначены порядковые номера переходов, прописными буквами – ступени вала). При обтачивании по схеме *А* каждую ступень вала обтачивают, начиная с торца, и таким образом всю обработку вала производят за три прохода: за 1-й проход обтачивают ступени *а* и *б* и *в*, за 2-й проход – ступени *а* и *б* и за 3-й проход – ступень *а*.

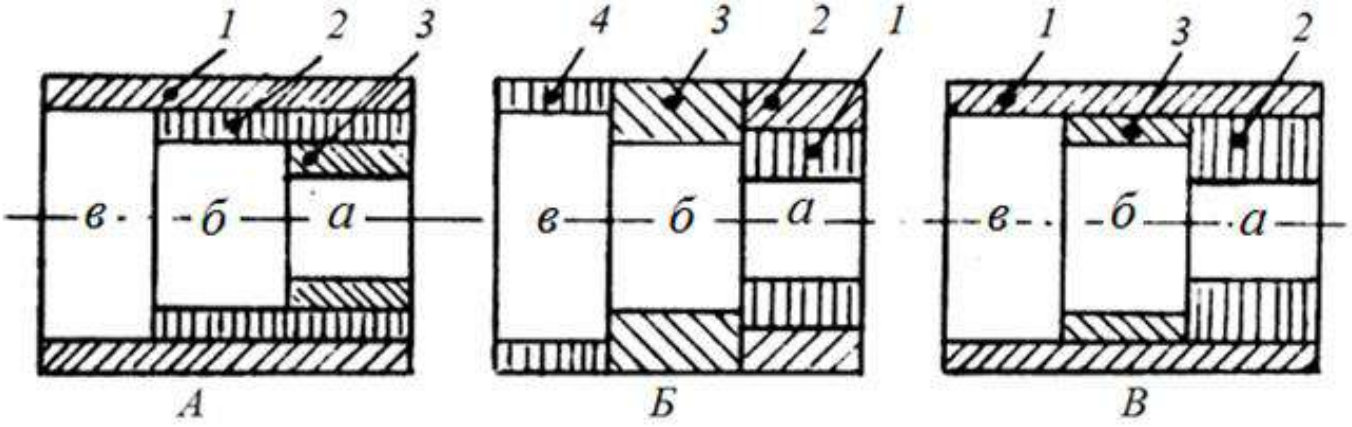



Рис. 7.1. Схемы точения образцов (*1, 2, 3 ,4* – обозначение последовательности снятия припуска – переходы)

При обтачивании по схеме *Б* каждую ступень вала обтачивают отдельно: ступень *а* вследствие большой глубины резания обтачивается за два прохода (1-й и 2-й); ступень *б* – за один проход (3-й) и ступень *в* – за один проход (4-й).

Комбинированная схема обработки *В* предусматривает обтачивание ступени *в* за 1-й проход, начиная с торца, ступень *а* обтачивается за 2-й проход и ступень *б* – за 3-й проход.

На выбор той или иной схемы влияют величина припусков на отдельных ступенях вала и соотношение размеров ступеней: диаметра и длины. Схема, обеспечивающая наименьшее время обработки, наиболее выгодна.

**Оборудование**

1. Токарно-винторезный станок.
2. Резцы проходные с $\varphi = 90°$.
3. Образцы – три валика.
4. Измерительный инструмент – штангенциркуль, цена деления 0,1.
5. Схема установки заготовок (Рис. 7.1).

## Порядок выполнения работы

1. Подготовить заготовки. Подрезать торцы (центровать, при необходимости).
2. Установить требуемый режим обработки ($n$ = 450 об/мин, $S$ = 0,15 мм/об, $t$ – в зависимости от схемы снятия припуска).
3. Последовательно обточить три заготовки по схемам А, Б и В (см. рис. 7.1, табл. 7.1).
4. Время обработки фиксируется секундомером.
5. Расчетное время определяется по формуле: $t_0 = \frac{l}{n \cdot S}$ , где $l$ - принимать с учетом врезания и перебега инструмента.
6. Результаты замеров занести в таблицу 7.2.

Настройка на размер осуществляется путем пробных ходов.

Вспомогательное время учитывается только на потери, связанные с возвратом инструмента в исходное состояние и взятие пробных стружек.

Таблица 7.1

Последовательность снятия припуска

| Переходы | А | Б | В |
|---|---|---|---|
| | *t* = | | |
| 1 | 0,5 | 0,75 | 0,5 |
| 2 | 0,5 | 0,75 | 1,0 |
| 3 | 0,5 | 1,0 | 0,5 |
| 4 | - | 0,5 | - |

## Содержание отчета

1. Описать условия работы.
2. Привести результаты замеров.
3. Рассчет основного времени по каждой ступени.
4. Сделать вывод о целесообразности применения той или иной схемы точения.

Таблица 7.2

Результаты эксперимента

| Схема точе- | Время обработки, мин (с) | | | | | | | | | | | | Суммарное время | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1–я ступень | | | | 2–я ступень | | | | 3–я ступень | | | | основ-ное | опера-тивное |
| | основное | | вспомогательное | | основное | | вспомогательное | | основное | | вспомогательное | | | |
| | Хрон. | Расч. | Хрон. | Расч. | Хрон. | Расч. | Хрон. | Расч. | Хрон. | Расч. | Хрон. | Расч. | Хрон. / Расч. | Хрон. / Расч. |
| А | | | | | | | | | | | | | | |
| Б | | | | | | | | | | | | | | |
| В | | | | | | | | | | | | | | |

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ (ГОСТ 2789-73).....3

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ФОРМЫ ПРИ ТОЧЕНИИ НЕЖЕСТКИХ ЗАГОТОВОК.....14

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ.....21

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ ТОКАРНОГО СТАНКА.....31

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 ПРОВЕРКА ТОЧНОСТИ ТОКАРНО–ВИНТОРЕЗНОГО СТАНКА.....35

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ УСТАНОВКИ РАЗМЕРА ПО ЛИМБУ СТАНКА.....42

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7 ВЫБОР СХЕМЫ ТОЧЕНИЯ СТУПЕНЧАТОГО ВАЛИКА.....46

Учебное издание

Татьяна Петровна Глинникова

Сергей Александрович Волегов

*Лабораторный практикум*
по дисциплине
«Основы технологии машиностроения»
для студентов специальностей
«Оборудование и технология повышения износостойкости и восстановления деталей машин и аппаратов» (МШС)
направление 150700.62 «Машиностроение» и «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов» (ТМО)
направления 130600 – «Оборудование и агрегаты нефтегазового производства» *очного и заочного обучения*

Редактор *******

Подписано в печать **.0*.2014 г. Бумага писчая. Формат 60 × 84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. *,0. Уч.-изд. л. *,4. Тираж 100. Заказ №

Издательство УГГУ
620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ




**Министерство образования и науки Российской Федерации**
**ФГБОУ высшего профессионального образования**

**Хазин М. Л.,Глинникова Т. П., Волегов С. А.**

# Технология конструкционных материалов

## Учебное пособие по практической и самостоятельной работе по темам «Обработка металлов давлением», «Сварка», «Обработка металлов резанием» для студентов направления бакалавриата: 15.03.01 (150700)- «Машиностроение», 15.03.02 (151000) - «Технологические машины и оборудование» (ТМО) и среднего профессионального образования (15.02.01) 151031 - «Монтаж и техническая эксплуатация промышленного оборудования (по отраслям)» *очного и заочного обучения*

**Екатеринбург**
**2019**

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

Хазин М. Л., Глинникова Т. П., Волегов С. А.

# Технология конструкционных материалов

Учебное пособие по практической и самостоятельной работе по темам
«Обработка металлов давлением», «Сварка», Обработка металлов резанием»
для студентов направления бакалавриата:
15.03.01 - «Машиностроение»,
15.03.02 - «Технологические машины и оборудование» (ТМО) и среднего профессионального образования
15.02.01 - «Монтаж техническая эксплуатация промышленного оборудования (по отраслям)» очного и заочного обучения

Издание УГГУ Екатеринбург, 2019

Рецензент: *А. П. Комиссаров*, д-р техн. наук, профессор кафедры ГМК Уральского государственного горного университета

Учебное пособие рассмотрено на заседании кафедры эксплуатации горного оборудования 18 ноября 2018 г. (протокол № 3) и рекомендовано для издания в УГГУ.

**Хазин М. Л., Глинникова Т. П., Волегов С. А.**

Технология конструкционных материалов: Учебное пособие по практической и самостоятельной работе по темам «Обработка металлов давлением», «Сварка», «Обработка металлов резанием», для студентов направления бакалавриата: 150700 – «Машиностроение», 151000 – «Технологические машины и оборудование» (ТМО) и среднего профессионального образования 151031 - «Монтаж техническая эксплуатация промышленного оборудования (по отраслям)» очного и заочного обучения / М. Л. Хазин, Т. П. Глинникова, С. А. Волегов. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2014. 60 с.

Учебное пособие составлено для проведения практических и самостоятельных работ по дисциплине "Технология конструкционных материалов" В пособии изложены краткие теоретические сведения о методах обработки металлов давлением, сваркой, резанием, приведены задания по каждой теме в соответствии с рабочей программой дисциплины «Технология конструкционных материалов», перечень основной и дополнительной литературы. В приложении приводятся справочные таблицы, необходимые для решения задач.

©

Хазин М. Л., Глинникова Т. П., Волегов С. А.,
© Уральский государственный

# 1. Обработка металлов давлением

**Краткая теория.** Обработкой металлов давлением (ОМД) называют группу технологических процессов, в результате которых под влиянием приложенных внешних сил происходит изменение формы заготовок без нарушения их сплошности.

Основной задачей всех видов обработки давлением является придание металлу желаемой формы посредством процесса пластической деформации. В результате пластической деформации изменяются не только форма и размеры заготовки, но и структура и свойства исходного металла.

В промышленности применяют шесть основных видов обработки давлением: прокатку, прессование, волочение, ковку, объемную штамповку и листовую штамповку.

При обработке металлов давлением в заготовке под действием внешних сил возникают напряжения. Если они невелики, происходит упругая деформация, при которой атомы металла смещаются от положений устойчивого равновесия на очень малые расстояния, не превышающие межатомные. После снятия нагрузки атомы вследствие межатомного взаимодействия возвращаются в исходные положения устойчивого равновесия. Форма тела полностью восстанавливается и никаких остаточных изменений в металле не происходит. С увеличением внешней нагрузки напряжения в заготовке растут, что ведет к смещению атомов от положений устойчивого равновесия на расстояния, значительно превышающие межатомные. После снятия нагрузки атомы занимают новые места устойчивого равновесия, поэтому форма тела не восстанавливается. **Такое необратимое изменение формы тела называется пластической деформацией.** Способность металла подвергаться пластической деформации называется **пластичностью**.

## 1.1. Волочение

**Волочение** это процесс обработки давлением, при котором пластическая деформация заготовки в холодном состоянии осуществляется за счет ее протягивания через постепенно сужающееся отверстие в инструменте, называемом волокой, или фильерой. Конфигурация отверстия определяет форму получаемого профиля.

Схема волочения прутка и трубы и примеры профилей, получаемых волочением, представлены на рис. 1.1. Волочение труб можно производить без оправки и на оправке, если требуется уменьшить наружный диаметр и толщину стенки.

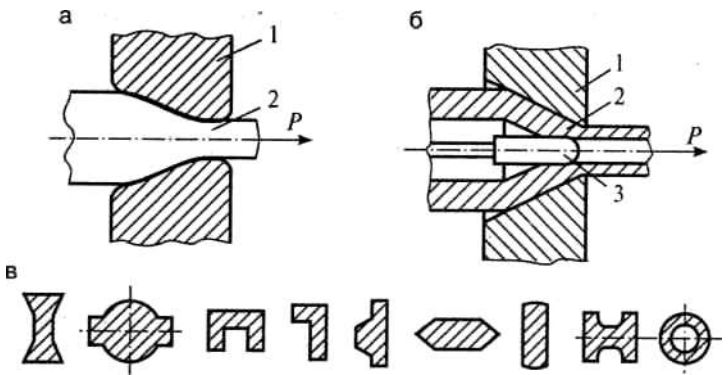


Рис. 1.1. Схемы волочения прутка (а), трубы (б) и примеры профилей, получаемых волочением (в): 1 — фильера; 2 — заготовка; 3 — оправка

В связи с тем что на выходящем из волоки конце прутка или трубы пластическая деформация недопустима, величина деформации за один проход ограничена и коэффициент вытяжки не должен превышать 1,05...1,5, а сама она осуществляется в холодном состоянии.

## Формулы расчета волочения

Общая вытяжка заготовки за весь цикл обработки

$$\mu_{общ} = \left(\frac{d_0}{d_k}\right)^2$$

Общая истинная деформация заготовки

$e_{общ} = \sum e_i = n \cdot e_i = ln\ \mu_{общ}$

Предельная истинная деформация металла заготовки

$$e_{пред} = ln\frac{1}{1 - \psi}$$

Количество проходов для достижения

$$n_{отж} = \frac{e_{пред}}{e_i}$$

Диаметр пояска волоки после 1 прохода

$$d_{П1} = d_0\sqrt{\frac{1}{\mu_1}}$$

Истинная деформация за i-й проход $e = ln\frac{d_k}{d_0}$;

Истинное сужение $\varphi = ln\frac{F_0}{F_k}$;

$e = e_1 + e_2 + e_3 + \ldots + e_n$;

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 + \psi_3 + \ldots + \psi_n$$

Расшифровка величин, входящих в расчетные формулы:

$d_0$; $d_K$ – начальный и конечный диаметр прутка
$e_i$ – истинная деформация заготовки за i- проход;
$n$ – число проходов;
$\psi$ – относительное сужение металла заготовки за i- проход;
$\mu_1$ – вытяжка заготовки за проход
$F_0$ и $F_K$ – начальная и конечная площадь основания поковки, мм$^2$

## Задача № Д.1.1

Определить количество проходов $n$ заготовки, необходимых для получения волочением прутка диаметром $d_K$ (мм) из заготовки диаметром $d_0$ (мм). Допустимая вытяжка за проход для материала заготовки составляет $\mu_i$. Определить вытяжку за последний проход, чтобы выдержать заданный диаметр готового изделия $d_K$.

Варианты исходных данных к задаче №Д.1.1

| вариант | $d_0$ | $d_K$ | $\mu_i$ | вариант | $d_0$ | $d_K$ | $\mu_i$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 10 | 3,0 | 1,2 | 11 | 14 | 5,0 | 1,2 |
| 2 | 10 | 2,5 | 1,4 | 12 | 14 | 4,0 | 1,4 |
| 3 | 10 | 1,0 | 1,4 | 13 | 14 | 3,0 | 1,4 |
| 4 | 16 | 4,0 | 1,25 | 14 | 15 | 5,0 | 1,25 |
| 5 | 16 | 3,0 | 1,45 | 15 | 15 | 4,0 | 1,45 |
| 6 | 16 | 2,0 | 1,45 | 16 | 15 | 3,0 | 1,45 |
| 7 | 18 | 4,0 | 1,15 | 17 | 17 | 6,0 | 1,15 |
| 8 | 18 | 3,0 | 1,2 | 18 | 17 | 5,0 | 1,2 |
| 9 | 18 | 2,0 | 1,2 | 19 | 17 | 4,0 | 1,2 |
| 10 | 20 | 5,0 | 1,2 | 20 | 20 | 6,0 | 1,2 |

Задача № Д.1.2

Обосновать необходимость промежуточного отжига заготовки при волочении прутка диаметром $d_K$ (мм) из заготовки диаметром $d_0$ (мм). Определить расчетом после какого прохода необходим рекристаллизационный отжиг, если предельная пластичность металла составляет $\psi$ (%), а допустимая вытяжка металла за проход - $\mu_i$ Определить также количество отжигов за полный цикл обработки.

Варианты исходных данных к задаче № Д.1.2

| вариант | $d_0$ | $d_K$ | $\mu_i$ | $\psi$ | вариант | $d_0$ | $d_K$ | $\mu_i$ | $\psi$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 12 | 3,0 | 1,25 | 50 | 11 | 14 | 5,0 | 1,2 | 50 |
| 2 | 12 | 2,5 | 1,3 | 55 | 12 | 14 | 4,0 | 1,4 | 55 |
| 3 | 12 | 1,5 | 1,2 | 60 | 13 | 14 | 3,0 | 1,4 | 60 |
| 4 | 14 | 4,0 | 1,4 | 50 | 14 | 15 | 5,0 | 1,25 | 50 |
| 5 | 14 | 3,0 | 1,35 | 55 | 15 | 15 | 4,0 | 1,45 | 55 |
| 6 | 14 | 3,0 | 1,2 | 60 | 16 | 15 | 3,0 | 1,45 | 60 |
| 7 | 16 | 4,0 | 1,4 | 50 | 17 | 17 | 6,0 | 1,15 | 50 |
| 8 | 16 | 5,0 | 1,35 | 55 | 18 | 17 | 5,0 | 1,2 | 55 |
| 9 | 16 | 4,0 | 1,25 | 60 | 19 | 17 | 4,0 | 1,2 | 60 |
| 10 | 18 | 3,0 | 1,15 | 50 | 20 | 20 | 6,0 | 1,2 | 50 |

Задача № Д.1.3

Определить необходимое число проходов $n$ и диаметр $d_{in}$ (мм) калибрующего пояска волоки на отдельных проходах при волочении прутка диаметром $d_K$ (мм) из заготовки диаметром $d_0$ (мм). Допустимая вытяжка металла заготовки за проход составляет $\mu_i$.

Варианты исходных данных к задаче № Д.1.3

| вариант | $d_0$ | $d_K$ | $\mu_i$ | вариант | $d_0$ | $d_K$ | $\mu_i$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 16 | 14 | 1,25 | 11 | 15 | 13 | 1,25 |
| 2 | 16 | 12 | 1,30 | 12 | 15 | 12 | 1,30 |
| 3 | 16 | 13 | 1,20 | 13 | 15 | 11 | 1,20 |
| 4 | 18 | 15 | 1,25 | 14 | 17 | 15 | 1,25 |
| 5 | 18 | 14 | 1,30 | 15 | 17 | 14 | 1,30 |
| 6 | 18 | 16 | 1,20 | 16 | 17 | 13 | 1,20 |
| 7 | 20 | 17 | 1,25 | 17 | 19 | 17 | 1,25 |
| 8 | 20 | 16 | 1,30 | 18 | 19 | 16 | 1,30 |
| 9 | 10 | 6,5 | 1,25 | 19 | 9 | 15 | 1,25 |
| 10 | 22 | 20 | 1,15 | 20 | 20 | 18 | 1,15 |

## 1.2. Ковка

**Ковка** — один из способов обработки металлов давлением, при котором инструмент оказывает многократное воздействие на нагретую заготовку, в результате чего она, деформируясь, постепенно приобретает заданную форму и размеры. Различают ковку ручную, применяемую иногда при мелких ремонтных работах и выполняемую с помощью наковальни и кувалды, и машинную, осуществляемую с помощью молотов и прессов.

К основным операциям машинной ковки относятся осадка, протяжка, прошивка, гибка, сварка, скручивание, отрубка и раскатка (рис. 1.20).

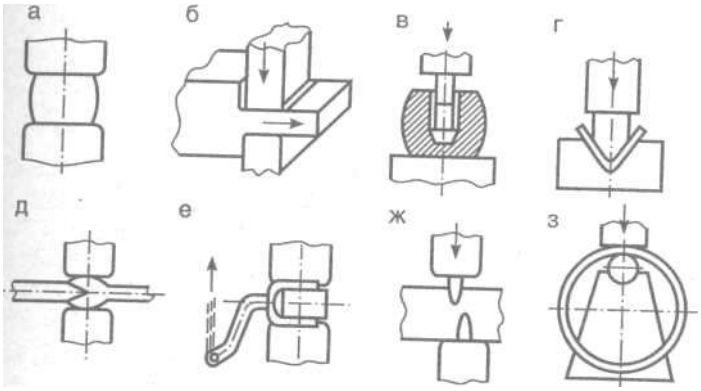



Рис. 1. Схема основных операций машинной ковки: а – осадка; б – протяжка; в – прошивка; г – гибка; д – сварка; е – скручивание; ж – отрубка; з – раскатка

**Осадка** — уменьшение высоты заготовки при увеличении площади ее поперечного сечения. Осадку производят бойками или осадочными плитами. Заготовки, у которых отношение высоты к диаметру более 2,5, осаживать не рекомендуется во избежание возможного продольного искривления. Осадка части заготовки называется **высадкой**. Операции машинной ковки выполняют на различных типах молотов и гидравлических прессах

## Формулы расчета осадки

Диаметр осаженной поковки

$$d_{пок} = d_{заг}\sqrt{(h_{заг} / h_{пок})}, \quad \text{мм}$$

Удельное усилие при осадке (формула Зибеля)

$$\beta = \sigma_B + \left( \mu \frac{d_{пок}}{3h_{пок}} \right), \ \text{кг/мм}^2$$

Расчетное удельное усилие при осадке

$$P_р = \sigma_В \cdot W \cdot \psi_м, \quad \text{МПа}$$

Усилие деформирования при осадке

$$P_Д = 10\, P_р \cdot F_{пок}, \quad \text{Н}$$

Масса падающих частей молота

$$G_n = 1{,}25 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_{Bt} \cdot \psi_м \cdot W\left(1 + \mu \frac{d_{пок}}{3h_{пок}}\right)\varepsilon_n \cdot V_{пок}, \quad \text{кг}$$

Работа деформирования поковки при средней температуре осадки

$$A_{р.х} = W \cdot \psi_м \cdot \sigma_{Btct} \cdot V_{пок}\left[ ln\frac{h_{пок}}{h_{заг}} + \frac{2\mu}{9}\left(\frac{d_{пок}}{h_{пок}} - \frac{d_{заг}}{h_{заг}}\right)\right], \quad \text{Дж}$$

Энергия одного удара молота

$$L = 2{,}5 \cdot 10^{-2} \cdot G_n, \ \text{Дж}$$

Число ударов молота

$$n = \frac{A_{р.д.}}{L \cdot \eta} .$$

Расшифровка величин, входящих в расчетные формулы

$d_{пок}$; $h_{пок}$; $d_{заг}$; $h_{заг}$, – размеры цилиндрической поковка и заготовки, соответственно;

$\sigma_{Bt}$, $\sigma_{Blcp}$ – предел прочности материала поковки при температуре обработки;

$\mu = 0,3$ – коэффициент трения на торцах заготовки при осадке;

$W$ – скоростной коэффициент; $W = 1$ - при осадке на прессе; $W = 2,5$ - при осадке на молоте;

$\psi_м$ – масштабный коэффициент (табл.1);

$V_{пок}$ – объем поковки, м$^3$;

$\eta$ – коэффициент полезного действия молота , $\eta = 0,8$;

$F$ – площадь основания поковки, м$^2$, $F$=

Таблица 1

**Масштабный коэффициент $\psi_м$ для определения усилия деформирования при обработке давлением**

| Масса поковки, кг | 0 - 200 | 1500 - 8000 | 60000 - 80000 | 120000 -200000 |
|---|---|---|---|---|
| **$\psi_м$** | 10 | 9 - 8 | 7 - 6 | 5 - 4 |

## Задача № Д.1

Определить усилие деформирования $P_Д$ гидравлического ковочного пресса, необходимое для осадки стальной заготовки размерами $d_0$ (мм), $h_0$(мм) до высоты $h_{пок}$(мм). Температура окончания осадки $T = 1100$ °С.

Варианты исходных данных к задаче № Д.1

| № вар | Марка стали | $d_0$ | $h_0$ | $h_{пок}$ | № вар | Марка стали | $d_0$ | $h_0$ | $h_{пок}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 45 | 1040 | 2100 | 950 | 11 | 12Х18 Н12 | 1040 | 2100 | 950 |
| 2 | 40Х | 1100 | 2200 | 970 | 12 | 30 | 1100 | 2200 | 970 |
| 3 | 20 | 1200 | 2300 | 1000 | 13 | 30ХГС | 1200 | 2300 | 100 0 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | ЗОХГС | 1040 | 2150 | 960 | 14 | 30 | 1040 | 2150 | 960 |
| 5 | 45 | 1100 | 2250 | 950 | 15 | 40Х | 1100 | 2250 | 950 |
| 6 | 40Х | 1200 | 2350 | 970 | 16 | 20 | 1200 | 2350 | 970 |
| 7 | 20 | 1040 | 2100 | 1000 | 17 | 12Х18 Н12 | 1040 | 2100 | 1000 |
| 8 | 30ХГС | 1100 | 2200 | 960 | 18 | 30 | 1100 | 2200 | 960 |
| 9 | 45 | 1200 | 2300 | 950 | 19 | 40Х | 1200 | 2300 | 950 |
| 10 | 40Х | 1040 | 2100 | 970 | 20 | 12Х18 Н12 | 1040 | 2100 | 970 |

### Задача № Д.2.2

Определить массу падающих частей $G_п$ молота и число ударов $n$, необходимых для осадки стальной заготовки с начальными размерами $d_0$ (мм), $h_0$ (мм) до высоты $h_{пок}$ (мм). Расчет $G_п$ выполнить для температуры окончания ковки, расчет n выполнить для средней температуры ковки.

Варианты исходных данных к задаче № Д.2.2

| № вар | Марка стали | $d_0$ | $h_0$ | $h_{пок}$ | № вар | Марка стали | $d_0$ | $h_0$ | $h_{пок}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 45 | 100 | 140 | 70 | 11 | 12Х18Н12 | 100 | 140 | 70 |
| 2 | 40Х | 120 | 300 | 80 | 12 | 30 | 120 | 300 | 80 |
| 3 | 20 | 150 | 350 | 100 | 13 | ЗОХГС | 150 | 350 | 100 |
| 4 | ЗОХГС | 100 | 150 | 80 | 14 | 30 | 100 | 150 | 80 |
| 5 | 45 | 120 | 250 | 70 | 15 | 40Х | 120 | 250 | 70 |
| 6 | 40Х | 130 | 200 | 100 | 16 | 20 | 130 | 200 | 100 |
| 7 | 20 | 110 | 210 | 80 | 17 | 12Х18Н12 | 110 | 210 | 80 |
| 8 | ЗОХГС | 120 | 250 | 120 | 18 | 30 | 120 | 250 | 120 |
| 9 | 45 | 90 | 80 | 90 | 19 | 40Х | 130 | 180 | 90 |
| 10 | 40Х | 100 | 150 | 80 | 20 | 12Х18Н12 | 100 | 150 | 80 |

## 2. Сварка

***Сварка*** – технологический процесс получения неразъемных соединений в результате возникновения атомно-молекулярных связей между соединяемыми деталями при их нагреве и пластическом деформировании.

Сварные соединения можно получать двумя принципиально разными путями: сваркой плавлением и сваркой давлением.

При *сварке плавлением* атомно-молекулярные связи между деталями создают, оплавляя их примыкающие кромки, так, чтобы получилась смачивающая их, общая ванна. Эта ванна затвердевает при охлаждении и соединяет детали в одно целое. Как правило, в жидкую ванну вводят дополнительный металл, чтобы полностью заполнить зазор между деталями, но возможна сварка и без него.

Нагрев свариваемых деталей осуществляется разными способами: электрической дугой, газокислородным пламенем, пропусканием тока, лазером и т.д. По-разному обеспечиваются защита зоны сварки от воздействия воздуха и ее принудительная деформация.

Сварка является наиболее важным способом получения неразъемных соединений из различных материалов, свариваются металлы и сплавы, керамика, стекло, пластмассы, разнородные материалы. Сварка применяется во всех областях техники.

Источником теплоты является электрическая дуга, которая горит между электродом и заготовкой.

Сварочной дугой называется мощный электрический разряд между электродами, находящимися в среде ионизированных газов и паров.

В зависимости от материала и числа электродов, а также способа включения электродов и заготовки в цепь электрического тока различают следующие разновидности дуговой сварки (рис.2.1):

- сварка неплавящимся (графитовым или вольфрамовым) электродом *1* дугой прямого действия *2* (рис. 2.1.а), при которой соединение выполняется путем расплавления только основного металла *3*, либо с применением присадочного металла *4;*
- сварка плавящимся электродом (металлическим) *1* дугой прямого действия с одновременным расплавлением основного металла и электрода, который пополняет сварочную ванну жидким металлом (рис. 2.1.б);
- сварка косвенной дугой *5*, горящей между двумя, как правило, неплавящимися электродами, при этом основной металл нагревается и расплавляется теплотой столба дуги (рис. 2.1.в);
- сварка трехфазной дугой, при которой дуга горит между каждым электродом и основным металлом (рис. 2.1.г).

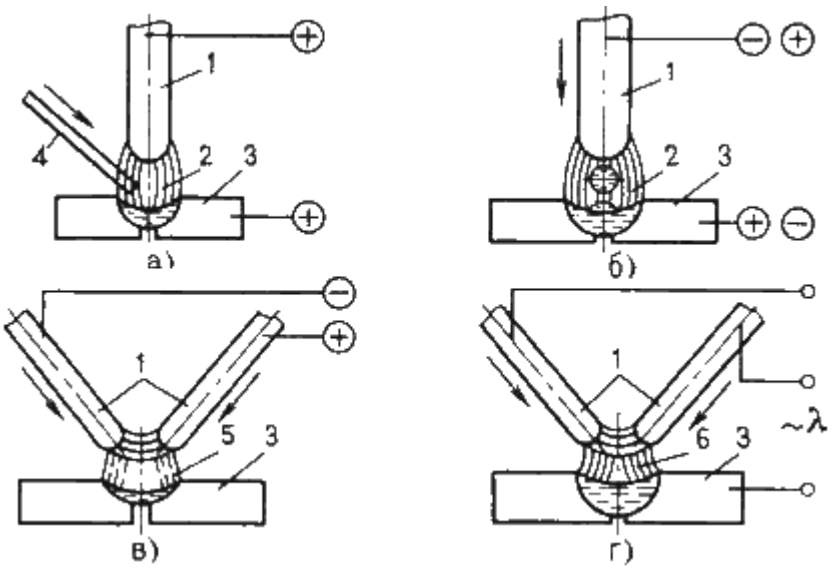


Рис. 2.1. Схемы дуговой сварки

Разновидности дуговой сварки различают по способу защиты дуги и расплавленного металла и степени механизации процесса.

Ручную дуговую сварку выполняют сварочными электродами, которые подают вручную в дугу и перемещают вдоль заготовки. В процессе сварки металлическим покрытым электродом дуга горит между стержнем электрода и основным металлом.

Ручная сварка позволяет выполнять швы в любых пространственных положениях: нижнем, вертикальном, горизонтальном, вертикальном, потолочном. Ручная сварка удобна при выполнении коротких криволинейных швов в любых пространственных положениях, при выполнении швов в труднодоступных местах, а также при монтажных работах и сборке конструкций сложной формы.

Электроды для РДС представляют собой проволочные стержни с нанесенным покрытием. Стержень электрода изготовляют из специальной сварочной проволоки из стали повышенного качества. ГОСТ 2246-70 предусматривает 56 марок стальной сварочной проволоки диаметром 0,3 – 12 мм. Все марки сварочной проволоки разделяют на 3 группы: углеродистую, легированную и высоколегированную.

По назначению стальные электроды по ГОСТ 9466-75 подразделяют на 4 класса:

- для сварки углеродистых и легированных конструкционных сталей (ГОСТ 9467-75);
- для сварки теплоустойчивых сталей (ГОСТ 9467-75);
- для сварки высоколегированных сталей (ГОСТ 10052-75);

- для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами (ГОСТ 1051-75).

Внутри каждого класса электроды делятся на типы (всего 73 типа). В маркировке указывается тип электродов, начинающийся с буквы Э, затем следуют цифры, которые указывают минимальный гарантированный предел прочности в кг/мм$^2$ . Например, Э42 ($\sigma_B \approx$ 420 МПа), Э50 ($\sigma_B$ = 500 МПа). Буква А в обозначении указывает, что металл шва, наплавленный этим электродом, имеет повышенные пластические свойства. Такие электроды применяют при сварке наиболее ответственных швов.

Для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей предусмотрено девять типов электродов (Э 38, Э 42, Э 42А, Э 46, Э 46А, Э 50, Э 50А, Э 55, Э 60); для сварки легированных и конструкционных сталей повышенной и высокой прочности пять типов ( Э 70 , Э 85 , Э 100 , Э 125, Э 150) (табл. 5).

Условное обозначение электродов для сварки конструкционных сталей состоит из обозначения марки электрода, типа электрода, диаметра стержня, типа покрытия, номера ГОСТа.

Пример: УОНИ – 13/45 – Э42А – 4,0 – Ф ГОСТ 9467-75.

Расшифровка:

УОНИ – 13/45 – марка электрода;

Э 42А - тип электрода (Э – электрод для дуговой сварки; 42 – минимальный гарантированный предел прочности металла шва в кгс/мм$^2$; А – гарантируется получение повышенных пластических свойств металла шва);

4,0 – диаметр электродного стержня в мм;

Ф – фтористокальциевый тип покрытия.

Марка электрода (УОНИ – 13/45, АН-1, АНО-1, 03С-6 и др.) характеризует также его технологические свойства: род и полярность тока, возможность сварки в различных пространственных положениях (оговорены в ГОСТе и справочной литературе по сварке).

## 2.2. Ручная сварка покрытыми электродами

Для обеспечения высокого качества шва и высокой производительности необходимо выдерживать при сварке оптимальную величину сварочного тока. Он рассчитывается по формуле

$I_{св.} = K \cdot d_э$ ,

где $d_э$ – диаметр сварочной проволоки, мм.

При сварке в нижнем положении коэффициент $K$ = 40 ... 60 для стержня электрода из низкоуглеродистой стали, $K$ = 35 ... 40 для стержня электрода из высокоуглеродистой стали. Для вертикальных швов сварочный ток $I_{св}$ уменьшают на 10 ... 15 %, для потолочных – на 15 ... 20 %. Интервал изменения Iсв = 150 ... 400 А, напряжение $U$ = 16 ... 30 В. Диаметр электрода $d_э$ выбирают равным толщине свариваемой заготовки.

Для пластин с толщиной $h$ < 10 мм сварной шов выполняется однослойным, при $h$ > 10 мм – многослойным, т. е. заполнение сварных швов большой толщины производится за несколько проходов электрода. Чтобы обеспечить качество шва на всю толщину свариваемых изделий, производится разделка кромок свариваемых поверхностей. При сварке пластин толщиной $h$ менее 6 мм разделка кромок не производится, при $h$ > 6 мм выполняется разделка под углом в 30°.

Ручная сварка применяется для коротких швов, криволинейных, любых пространственных, в труднодоступных местах при монтаже и сборке сложных конструкций. Ток и производительность наплавки ограничены, так как при большом токе стержень электрода нагревается и покрытие отслаивается. Плотность тока находится в пределах 10 ... 20 А/мм$^2$.

## Выполнение задания

Учитывая заданную марку стали и временное сопротивление при растяжении стали, (табл. 1) выберите тип электрода (табл. 5). Если сварное соединение должно работать при ударных нагрузках, выбирайте электрод с повышенными пластическими свойствами.

Каждому типу электрода соответствует несколько марок (табл. 7), на каждую из которых разработаны технические условия. Марка электрода - это его промышленное обозначение, характеризующее стержень и покрытие.

Одним из основных параметров режима ручной дуговой сварки является диаметр электрода dэ (мм). Для стыковых соединений

диаметр электрода выбирают в зависимости от толщины свариваемых кромок (табл. 4).

В табл. 7 представлены наиболее часто применяемые электроды. Каждому типу электрода соответствует несколько марок. В табл. 7 указаны диаметры и коэффициенты наплавки электродов. Коэффициент наплавки оценивает массу электродного металла, перешедшую в сварной шов в течение часа горения дуги, отнесенную к одному амперу сварочного тока. Учитывая, что производительность сварки прямо пропорциональна коэффициенту наплавки, а тип электрода и его диаметр уже выбран, подберите марку электрода из табл. 7.

Величину сварочного тока $I_{св}$ (А), основного параметра режима сварки, устанавливают по известному диаметру электрода. При сварке стыкового шва в нижнем положении используют формулу

$$I_{св} = Kd_э,$$

где $d$э – диаметр электрода (мм), $K$ - коэффициент пропорциональности, зависящей от диаметра электрода, определяется по табл. 4.

Длина дуги $L_д$ (мм) значительно влияет на качество сварки. Короткая дуга горит устойчиво и спокойно. Она обеспечивает получение высококачественного шва, так как расплавленный металл электрода быстро проходит дуговой промежуток и меньше подвергается окислению и азотированию. Но слишком короткая дуга вызывает “примерзание” электрода, дуга прерывается, нарушается процесс сварки. Длинная дуга горит неустойчиво и с характерным шипением. Глубина проплавления недостаточная, расплавленный металл электрода разбрызгивается и больше окисляется и азотируется. Шов получается бесформенным, а металл шва содержит большое количество оксидов. Длину дуги можно определить по формуле

$$L_д = 0{,}5(d_э + 2),$$

где $d$э -диаметр электрода (мм).

Самое широкое применение нашла дуга с жесткой характеристикой, когда напряжение $U_д$ (В) практически не зависит от силы тока и пропорционально её длине $L_д$. Такая дуга горит устойчиво и обеспечивает нормальный процесс сварки. Для нахождения $U$д можно использовать формулу

$$U_д = a + pL_д,$$

где $L_д$ - длина дуги (мм), $a$ (В) коэффициент, характеризующий падение напряжения на электродах (при использовании стальных

электродов $a$ =10-12 В), $p$ (В/мм) - коэффициент характеризующий падение напряжения на 1 мм длины дуги ($p$ = 2,0-2,5 В/мм).

Количество металла, необходимого для сварного шва $Q_н$ (г) можно определить по формуле

$Q_н = 10^{-3}\, lS\gamma$,

где $l$ - длина свариваемого шва (мм), $S$ -площадь поперечного сечения шва (мм2), у плотность электродного металла, для стали γ = 7,8 г/см3. Для одностороннего стыкового шва без скоса кромок площадь поперечного сечения $S$ можно определить по формуле: $S = b\ h$, где $h$ -толщина свариваемого металла (мм), $b$ - зазор (расстояние) между свариваемыми деталями (мм).

Для одностороннего шва с $V$ - образным скосом двух кромок площадь поперечного сечения S можно определить по формуле

$S = h\ (b - 1)+0{,}5(h^2 + 1)$,

где $h$ и $b$ - указанные выше конструкционные элементы сварного шва. Величину зазора между свариваемыми деталями берём из табл. 3.

Основное время горения дуги $t_о$ (ч) определим по формуле

$t_о = Q_н/(I_{св}\cdot\alpha_н)$,

где $Q_н$ масса наплавленного металла (г), $I_{св}$ - сила сварочного тока (А), $\alpha_н$ - коэффициент наплавки (г/А-ч), (табл. 7).

Скорость сварки Vсв (м/ч) можно определить по формуле

$V_{св} = 10^{-3} l/t_о$,

где $l$ длина сварного шва (мм), $t_о$ - основное время горения дуги (ч).

Процесс сварки включает не только время горения дуги, но и вспомогательные операции (установку электрода, поворот детали и т. д.). Это дополнительное время зависит от организации рабочего места, квалификации сварщика и учитывается коэффициентом производительности $M$.

Полное время сварки $t_п$ (ч) определяемая по формуле

$t_п = t_о/M$,

где $t_о$ − основное время горения дуги (ч), $M$ – коэффициент производительности, (М = 0,6–0,8).

Массу расплавленного металла $Q_р$ (г) можно определить, подчитав массу расплавленных электродов

$Q_р = 10^{-3}\ \gamma\pi d^2\ (l_э - l_{ог})n/4$,

где $\gamma$ – плотность электродного металла (для стали $\gamma$ = 7,8 г/см$^3$), $d_э$ диаметр электрода (мм), $l_э$ - длина электрода (мм) (табл.4), $l_{ог}$ - длина огарка (мм), (принимают $l_{ог}$ = 50 мм), $n$ число слоёв (проходов) (табл. 6).

Потери металла на угар и разбрызгивание характеризуются коэффициентом потерь $\psi$ (%), который определяется по формуле

$$\psi = 10^2(Q_р - Q_н)/Q_р,$$

где $Q_р$ - масса расплавленного металла (г), $Q_н$ - масса наплавленного металла (г).

Значение коэффициента потерь при ручной электродуговой сварке не должно превышать 10 %.

В заключении, определим полный расход электроэнергии на сварку $A$ (кВт·ч) по формуле

$$A = I_{св}\, U_д\, t_о,$$

где $I_{св}$ - сила сварочного тока (А), $U_д$ - напряжение дуги (В), $t_о$ - основное время горения дуги (ч).

## Получение изделий сваркой
## Задача С.1

Разработать технологический процесс ручной дуговой сварки плавящимся электродом с покрытием в нижнем положении со стыковым соединением свариваемых элементов.

В табл. 1 приведены исходные данные для выполнения задания № 1.

**Таблица 1**

**Исходные данные для выполнения задания С.1**

| № варианта | Марка стали | Временное сопротивление при растяжении $\sigma_b$, МПа | Толщина свариваемой стали, $H$ , мм | Длина шва $l$, мм |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 09Г2СД | 450 | 11,0 | 460 |
| 1 | 10Г2С1* | 500 | 1,5 | 400 |
| 2 | 08ГДН* | 400 | 2,0 | 300 |
| 3 | 15Г | 420 | 2,5 | 650 |
| 4 | 20 | 420 | 3,0 | 260 |
| 5 | 15* | 400 | 3,5 | 230 |
| 6 | Ст3 | 400 | 4,0 | 200 |
| 7 | 14ХГС | 500 | 4,5 | 180 |
| 8 | 08ГДНФ | 500 | 5,0 | 150 |
| 9 | 09Г2С* | 500 | 5,5 | 260 |
| 10 | 12Г2СМФ | 700 | 6,0 | 240 |
| 11 | 14ГХНМ | 700 | 6,5 | 200 |
| 12 | 15Х | 700 | 7,0 | 190 |
| 13 | 16ГС* | 500 | 7,5 | 340 |
| 14 | 12ГН2МФАЮ | 850 | 8,0 | 260 |
| 15 | 14Х2ГМР | 800 | 8,5 | 375 |
| 16 | 20Х | 800 | 9,0 | 330 |
| 17 | 12ХГН2МФБАЮ | 900 | 9,5 | 300 |
| 18 | 18ХГТ | 1000 | 10,0 | 270 |
| 19 | 16Г2АФ | 600 | 10,5 | 500 |
| 20 | 15Г2СФ | 560 | 11,0 | 460 |
| 21 | 16Г2АФД | 580 | 11,5 | 440 |
| 22 | 09Г2* | 450 | 12,0 | 400 |
| 23 | 20Г | 460 | 12,5 | 373 |
| 24 | 10ХСНД | 540 | 13,0 | 347 |
| 25 | 17Г1С | 520 | 13,5 | 330 |
| 26 | Ст4 | 440 | 14,0 | 280 |
| 27 | 10Г2* | 450 | 14,5 | 325 |
| 28 | 25* | 460 | 15,0 | 310 |
| 29 | 14Г2 | 460 | 15,5 | 290 |
| 30 | 10Г2С1Д | 520 | 16,0 | 280 |

* Сварное соединение работает при ударных нагрузках

## Задача С.2

Для изготовления из листа толщиной $h$ (мм) цилиндрической обечайки диаметром $D$ (мм) и длиной $L$ (мм) разработать эскиз заготовки, эскиз стыкового сварного соединения по ГОСТ 5264-80, режим ручной дуговой сварки, определить расход электродов.

## Варианты исходных данных для задачи С.2

| № вар | Марка стали | *h* | *D* | *L* | № вар. | Марка стали | *h* | *D* | *L* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | стЗ | | 500 | 1000 | 11 | 10 | 8 | 700 | 2000 |
| 2 | 10 | | 700 | 1500 | 12 | 20 | 9 | 800 | 2100 |
| 3 | 20 | | 800 | 1600 | 13 | СтЗ | 6 | 650 | 2000 |
| 4 | Ст3 | | 900 | 2000 | 14 | 10 | 7 | 650 | 2200 |
| 5 | 10 | | 550 | 1500 | 15 | 20 | 8 | 850 | 2500 |
| 6 | 20 | | 600 | 2000 | 16 | Ст3 | 9 | 1000 | 2500 |
| 7 | Ст3 | | 750 | 2200 | 17 | 10 | 6 | 700 | 1700 |
| 8 | 10 | | 950 | 2500 | 18 | 20 | 7 | 550 | 1600 |
| 9 | 20 | | 600 | 1900 | 19 | Ст3 | 8 | 900 | 2000 |
| 10 | Ст3 | | 500 | 1200 | 20 | 10 | 9 | 1100 | 2300 |

## Задача С.3

Для изготовления из листа толщиной *h* (мм) конического днища для обечайки диаметром *D* (мм) с углом конуса α (град) разработать эскиз заготовки, эскиз стыкового сварного соединения по ГОСТ 5264-80, режим ручной дуговой сварки, определить расход электродов.

## Варианты исходных данных для задачи С.3

| № вар. | Марка стали | *h* | *D* | α | № вар. | Марка стали | *h* | *D* | α |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 10 | 6 | 500 | 45 | 11 | 20 | 6 | 550 | 80 |
| 2 | 20 | 7 | 700 | 50 | 12 | Ст3 | 7 | 650 | 75 |
| 3 | Ст3 | 8 | 800 | 55 | 13 | 10 | 8 | 750 | 70 |
| 4 | 10 | 9 | 900 | 60 | 14 | 20 | 9 | 850 | 65 |
| 5 | 20 | 6 | 1000 | 70 | 15 | Ст3 | 6 | 950 | 60 |
| 6 | Ст3 | 7 | 1200 | 75 | 16 | 10 | 7 | 1100 | 55 |
| 7 | 10 | 8 | 800 | 80 | 17 | 20 | 8 | 650 | 50 |
| 8 | 20 | 9 | 900 | 85 | 18 | Ст3 | 9 | 750 | 45 |
| 9 | С3 | 6 | 700 | 0 | 19 | 10 | 6 | 50 | 80 |
| 10 | 10 | 7 | 600 | 85 | 20 | 20 | 7 | 950 | 85 |

## Задача С.4

Для изготовления из листа толщиной *h* (мм) конического перехода длиной *L* (мм) между трубопроводами *D* (мм), d (мм) разработать эскиз заготовки, эскиз стыкового сварного соединения по ГОСТ 5264-80, режим ручной дуговой сварки, определить расход электродов.

## Варианты исходных данных для задачи С.4

| № вар. | Марка стали | *h* | *L* | *D* | *d* | № вар. | Марка стали | *h* | *L* | *D* | *d* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 20 | 6 | 100 | 203 | 127 | 11 | Ст3 | 6 | 250 | 299 | 159 |
| 2 | Ст3 | 7 | 200 | 219 | 133 | 12 | 10 | 7 | 350 | 325 | 168 |
| 3 | 10 | 8 | 300 | 245 | 140 | 13 | 20 | 8 | 300 | 203 | 140 |
| 4 | 20 | 9 | 350 | 273 | 146 | 14 | Ст3 | 9 | 200 | 219 | 146 |
| 5 | Ст3 | 6 | 250 | 294 | 152 | 15 | 10 | 6 | 100 | 245 | 152 |
| 6 | 10 | 7 | 150 | 325 | 159 | 16 | 20 | 7 | 150 | 273 | 159 |
| 7 | 20 | 8 | 300 | 203 | 133 | 17 | Ст3 | 8 | 250 | 299 | 168 |
| 8 | Ст3 | 9 | 200 | 219 | 140 | 18 | 10 | 9 | 350 | 325 | 180 |
| 9 | 10 | 6 | 100 | 245 | 146 | 19 | 20 | 6 | 300 | 203 | 146 |
| 10 | 20 | 7 | 150 | 273 | 152 | 20 | Ст3 | 7 | 200 | 219 | 152 |

Таблица 2

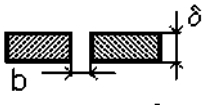
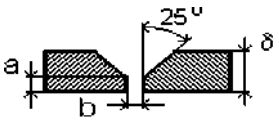
## Расчет основных параметров режима электродуговой сварки

| № | Определяемая величина | Буквенное обозначение, ед. измерения | Расчетная формула или источник информации | Численная величина |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Тип сварного шва | С... | табл. 3 | С 17 |
| 2 | Тип электрода | Э... | табл. 5 | Э 46 |
| 3 | Диаметр электрода | $d_э$, мм | табл. 4 | 6 |
| 4 | Марка электрода | | табл. 7 | ОЗС-6 |
| 5 | Коэффициент пропорциональности | К, А/мм | табл. 4 | 50 |
| 6 | Сила сварочного тока | $I_{св}$, А | $I_{св} = Kd_э$ | 300 |
| 7 | Длина дуги | $L_д$, мм | $L_д = 0{,}5(d_э + 2)$ | 4 |
| 8 | Напряжение дуги | $U_д$, В | $U_д = \alpha + \beta L_д$ | 18 |
| 9 | Площадь поперечного сечения | S, мм$^2$ | $S = bh$ | |
| | | | $S = 8(h - 1)+0{,}5(h^2 + 1)$ | 94 |
| 10 | Масса наплавленного металла | $Q_н$, г | $Q_н = 10^{-3} l S \gamma$ | 337,27 |
| 11 | Коэффициент наплавки | αн, г/А'ч | табл. 7 | 10 |
| 12 | Основное время горения дуги | $t_о$, ч | $t_о = Q_н / I_{св}\, \alpha_н$ | 0,11 |
| 13 | Скорость сварки | $V_{св}$, м/ч | $V_{св} = 10^{-3} l / t_о$ | 4,09 |
| 14 | Полное время сварки | $T_п$, ч | $T_п = t_о / M$ | 0,22 |
| 15 | Длина электрода | $l_э$, мм | табл. 4 | 450 |
| 16 | Число слоев | *n* | табл. 6 | 4 |
| 17 | Масса расплавленного металла | $Q_р$, г | $Q_р = 10^{-3} \gamma \pi d_э^2 (l_э - l_{ог}) n / 4$ | 352,68 |
| 18 | Коэффициент потерь | φ, % | $\varphi = 10^2 (Q_р - Q_н)/Q_р$ | 4,4 |
| 19 | Расход электроэнергии на сварку | *A*, кВт-ч | $A = I_{св}\, U_д\, t_о$ | 594 |
| 20 | Зазор (расстояние) между свариваемыми деталям | *B*, мм | табл. 3 | |
| 21 | Длина сварного шва | *l* , мм | табл. 1 | |

$\alpha = 10$, $\beta = 2$ ; $\gamma = 7{,}8$ г/см$^3$; $l_{ог} = 50$ мм; $M = 0{,}5$

Таблица 3

**Тип сварного шва**

| Наименование соединения | Условное обозначение | Форма подготовки кромок | Толщина металла h, мм | Зазор *b*, мм | Выполнение шва |
|---|---|---|---|---|---|
| Шов стыковой односторонний без скоса кромок | С 2 |  | 1,5–2,5<br>3,0–4,0 | 1<br>2 |  |
| Шов стыковой односторонний с V-образным скосом двух кромок | С 17 |  | 4,5–7,5<br>8,0–13,5<br>14,0–16,0 | 3<br>4<br>5 |  |

*a* – притупление кромок, *a* = 1 мм

Таблица 4

**Диаметр электрода**

| Толщина свариваемого металла *h*, мм | 1,5–2,0 | 2,5–4,0 | 4,5–7,0 | 7,5–10,0 | Более 10,0 |
|---|---|---|---|---|---|
| Диаметр электрода $d_э$, мм | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Коэффициент пропорциональности *K*, А/мм | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| Длина электрода $l_э$, мм | 250 | 300 | 350 | 450 | 450 |

Таблица 5

**Тип электрода**

| Тип электрода | Механические свойства металла сварного шва | | |
|---|---|---|---|
| | Временное сопротивление при растяжении $\sigma_B$, МПа | Относительное удлинение ε, % | Ударная вязкость KCU, МДж/м$^2$ |
| Э 38 | 380 | 14 | 0,3 |
| Э 42 | 420 | 18 | 0,8 |
| Э 42А | 420 | 22 | 1,5 |
| Э 46 | 460 | 18 | 0,8 |
| Э 46А | 460 | 22 | 1,4 |
| Э 50 | 500 | 16 | 0,7 |
| Э 50А | 500 | 20 | 1,3 |
| Э 55 | 550 | 20 | 1,2 |
| Э 60 | 600 | 18 | 1,0 |
| Э 70 | 700 | 14 | 0,6 |
| Э 85 | 850 | 12 | 0,5 |
| Э 100 | 1000 | 10 | 0,5 |
| Э 125 | 1250 | 8 | 0,4 |
| Э 150 | 1500 | 6 | 0,4 |

Таблица 6

**Число слоев**

| Толщина свариваемой стали $h$, мм | 1,0–5,0 | 5,5–8,0 | 8,5–10,0 | 10,5–14,0 | 14,5–16,0 |
|---|---|---|---|---|---|
| Число слоев n | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

Таблица 7

**Марка электрода**

| Тип электрода | Марка электрода | Диаметр электрода $d_э$, мм | Коэффициент наплавки $\alpha_н$, г/А·ч |
|---|---|---|---|
| Э 42 | ОЗС-23 | 2; 3 | 8,5 |
| | ВСЦ-4 | 3; 4 | 9,5 |
| | ОМА-2 | 2; 2,5; 3 | 8 |
| | АНО-6 | 4; 5 | 10 |
| Э 42А | УОНИ-13/45 | 2; 2,5; 3; 4; 5 | 8,5 |
| | СМ-11 | 3; 4; 5 | 10 |
| Э 46 | АНО-4 | 3; 4; 5 | 8,5 |
| | ОЗС-6 | 3; 4; 5; 6 | 10 |
| | МР-3 | 3; 4; 5; 6 | 7,5 |
| | ОЗС-21 | 3; 4; 5 | 8,5 |
| Э 46А | ВН-48 | 2,5; 3; 4; 5; 6 | 11 |
| | ОЗС-22Р | 3; 4; 5; 6 | 10 |
| | УОНИ-13/55К | 3; 4; 5 | 9,5 |
| Э 50 | ВСЦ-4А | 3; 4 | 9,5 |
| Э 50А | УОНИ-13/55 | 2; 2,5; 3; 4; 5 | 9 |
| | АНО-11 | 3; 4; 5 | 9,5 |
| | ДК-50 | 4; 5 | 10 |
| Э 55 | УОНИ-13/55У | 4; 5; 6 | 10 |
| Э 60 | ВСЦ-60 | 5; 6 | 10 |
| | УОНИ-13/65 | 2; 2,5; 3; 4; 5 | 9,5 |
| | ОЗС-24 | 3; 4 | 9,5 |
| Э 70 | ВСФ-75У | 4 | 9 |
| Э 85 | УОНИ-13/85 | 2; 2,5; 3; 4; 5 | 10 |
| | НИАТ-3М | 2; 2,5; 3; 4; 5 | 9,5 |
| | ВСФ-85 | 3; 4 | 9,5 |
| Э 100 | ОЗШ-1 | 2; 2,5; 3; 4; 5 | 8,5 |

## 3. Обработка металлов резанием

**Обработка резанием** – технологический процесс изготовления деталей, заключающийся в образовании новых поверхностей отделением поверхностных слоев материала с образованием стружки.

Для осуществления процесса резания необходимо относительное движение между заготовкой и режущим инструментом. Совокупность относительных движений инструмента и заготовки, необходимых для получения заданной поверхности, называют кинематической схемой обработки. Движения резания – это движения, обеспечивающие снятие слоя металла со всей обрабатываемой поверхности.

Примеры схем обработки различных поверхностей (рис. 3.1).

На обрабатываемой заготовке различают три поверхности: обработанную (3), полученную на заготовке в результате обработки; обрабатываемую (*1*), подлежащую обработке, и поверхность резания (*2*), образуемую режущей кромкой инструмента (рис. 1, *а – г*).

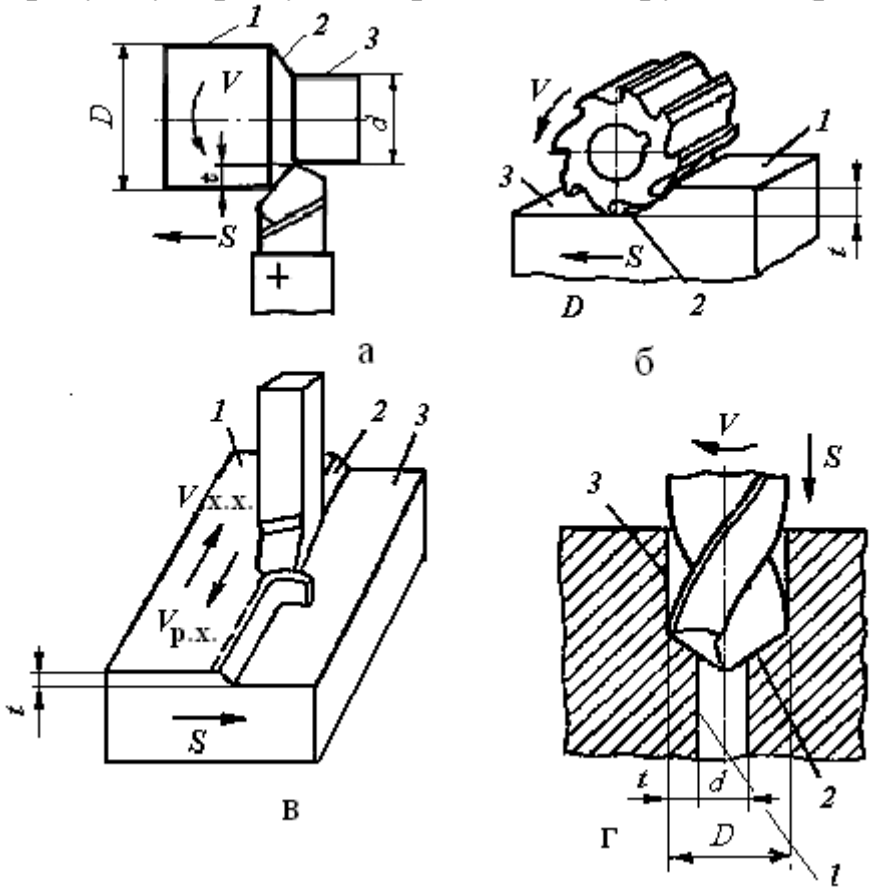



Рис. 3.1 Схемы обработки заготовок:
*а*) точением. *б*) фрезерованием, *в*) строганием,
*г*) сверлением (рассверливанием)

Процесс обработки задаётся **режимом резания**. Элементами режима резания являются **скорость резания, подача и глубина резания**. Совокупность этих значений принято называть **режимом резания**. Режим резания выбирается в следующей последовательности:

- глубина резания – *t*,
- подача – *S*,
- скорость резания – *V*.

***Глубина резания*** – определяется как расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями заготовки, измеренное по нормали. Глубина резания измеряется в мм (рис. 1.1).
$t = (D - d)/2$ (*а* и *г* – при точении и рассверливании); $t = d/2$ (при сверлении); $t = H - h$ (*б* и *в)* при фрезеровании и строгании)

Глубина резания зависит от следующих факторов:

– величины припуска *а* (слой металла, подлежащий удалению в процессе обработки),

– вида обработки (черновая или чистовая),

– мощности станка.

Глубина резания может быть равна припуску $t = a$, или $t = a / i$, если припуск снимается за несколько проходов ($i$ – количество ходов, за которое снимется весь припуск при данной глубине резания).

***Подача (S)*** – это перемещение заготовки или инструмента в направлении движения подачи за цикл движения резания.

При точении и сверлении подача задается в миллиметрах за 1 оборот (мм/об), при фрезеровании подача может быть задана в миллиметрах на зуб (мм/зуб), в миллиметрах в минуту (мм/мин), при строгании – в миллиметрах за двойной ход стола (мм / дв. х).

Величина подачи зависит от требований к обработанной поверхности: шероховатости и точности поверхности – чем выше точность и чистота обработки, тем меньше величина подачи.

***Скорость резания (V)*** – скорость перемещения точки режущей кромки инструмента относительно заготовки. Скорость резания измеряют в метрах в минуту ***при всех видах обработки резанием***, кроме шлифования и полирования (метры в секунду).

Если главное движение резания является вращательным, то скорость резания определяется по формуле

$$V = \pi D n /1000,$$

где $D$ – диаметр заготовки или инструмента, мм; $n$ – частота вращения заготовки или инструмента, об/мин.

При возвратно-поступательном движении скорость резания определяется по формуле

$$V = 2L\, n\, (k + 1) /1000,$$

где $L$ – длина хода инструмента или детали при обработке данной поверхности, мм;

$n$ – число двойных ходов в минуту ($n = 500 \cdot V / L \cdot (k + 1)$);

$k$ – коэффициент отношения скорости рабочего хода к скорости холостого хода ($k = V_{РХ}/V_{Х.Х}$).

***К элементам процесса резания относится также основное технологическое время*** $T_О$, затрачиваемое непосредственно на обработку резанием данной поверхности (изменение формы и размеров заготовки).

Основное время определяется по формуле:

$$T_О = L \cdot i / S \cdot n,$$

где $L = l + l_1 + l_2$,

$l$ – длина обрабатываемой поверхности,

$l_1$ – величина врезания инструмента,

$l_2$ – величина перебега инструмента.

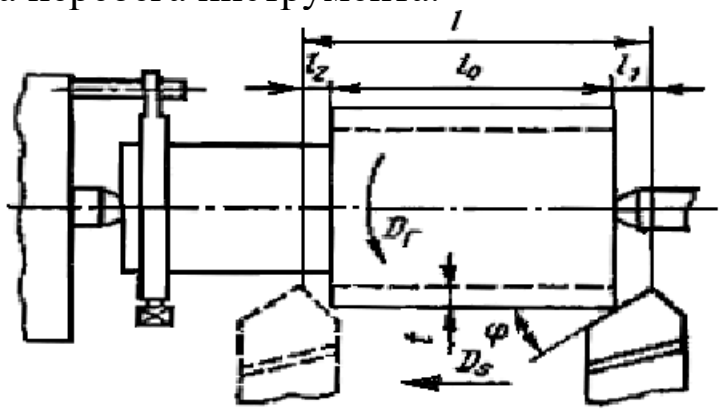



Рис. 1.2. Схема к расчёту $T_О$ при обработке цилиндрической поверхности

## Токарная обработка

Задача Т.1.

Определить минутную подачу резца $\mathbf{s_м}$ (мм/мин) при обтачивании на токарном станке заготовки диаметром **D** (мм) со скоростью резания **v** (м/мин) и подачей резца за один оборот заготовки **s** (мм/об)**.**

Варианты исходных данных к задаче Т.1

| № | D | V | s | № | D | V | s |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 140 | 88 | 0,6 | 11 | 387 | 233 | 0,6 |
| 2 | 37 | 233 | 0,43 | 12 | 90 | 177 | 0,43 |
| 3 | 90 | 177 | 0.87 | 13 | 120 | 119 | 0.87 |
| 4 | 120 | 119 | 0,7 | 14 | 72 | 280 | 0,7 |
| 5 | 72 | 280 | 0,78 | 15 | 64 | 200 | 0,78 |
| 6 | 64 | 200 | 0,17 | 16 | 160 | 80 | 0,17 |
| 7 | 160 | 80 | 0,18 | 17 | 54 | 170 | 0,18 |
| 8 | 54 | 170 | 0,3 | 18 | 43 | 216 | 0,3 |
| 9 | 43 | 216 | 0,23 | 19 | 210 | 133 | 0,23 |
| 10 | 210 | 133 | 0,52 | 20 | 140 | 88 | 0,52 |

Задача Т.2.

Определить основное время $\mathbf{T_0}$ при подрезании сплошного торца заготовки диаметром $\mathbf{D_0}$ (мм) на токарном станке за один проход. Припуск на обработку (на сторону) **h** (мм)**.** Частота вращения шпинделя **n** (об/мин)**;** подача резца **s** (мм/об)**.** Резец проходной отогнутый с главным углом в плане $\boldsymbol{\varphi}$**=** 45°**.** Перебег резца $\boldsymbol{\Delta}$**=** 1…3 мм**.** Начертить схему обработки поверхности.

Варианты исходных данных к задаче Т.2

| № | D | h | n | s | № | D | h | n | s |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 140 | 2,5 | 1000 | 0,32 | 11 | 300 | 2 | 1250 | 0,32 |
| 2 | 37 | 3 | 800 | 0,43 | 12 | 90 | 3 | 800 | 0,43 |
| 3 | 90 | 2 | 2000 | 0,24 | 13 | 120 | 1 | 2000 | 0.87 |
| 4 | 120 | 3 | 315 | 0,12 | 14 | 72 | 2 | 315 | 0,7 |
| 5 | 72 | 1,5 | 800 | 0,28 | 15 | 64 | 2 | 800 | 0,78 |
| 6 | 64 | 3 | 500 | 0,17 | 16 | 160 | 3,5 | 500 | 0,17 |
| 7 | 160 | 2 | 1250 | 0,18 | 17 | 54 | 1,5 | 1250 | 0,18 |
| 8 | 54 | 3 | 400 | 0,3 | 18 | 43 | 2 | 400 | 0,3 |
| 9 | 43 | 2 | 630 | 0,23 | 19 | 210 | 1,8 | 630 | 0,23 |
| 10 | 210 | 1,5 | 1250 | 0,52 | 20 | 140 | 2,3 | 1250 | 0,52 |

Задача Т.3.

Определить основное время $\mathbf{T_0}$ при отрезании кольца от заготовки, имеющей форму трубы с наружным диаметром **D** (мм) и внутренним – **d** (мм), на токарном станке резцом с пластиной из твердого сплава**.** Частота вращения шпинделя **n** (об/мин)**;** подача резца **s** (мм/об)**.** Перебег резца **Δ=** 1…2 мм**.** Начертить схему обработки поверхности.

Варианты исходных данных к задаче Т.3

| № | D | d | n | s | № | D | d | n | s |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 140 | 80 | 1000 | 0,32 | 11 | 300 | 120 | 1250 | 0,32 |
| 2 | 70 | 35 | 800 | 0,43 | 12 | 90 | 30 | 800 | 0,43 |
| 3 | 90 | 40 | 2000 | 0,24 | 13 | 120 | 60 | 2000 | 0.87 |
| 4 | 120 | 65 | 315 | 0,12 | 14 | 72 | 34 | 315 | 0,7 |
| 5 | 72 | 36 | 800 | 0,28 | 15 | 64 | 24 | 800 | 0,78 |
| 6 | 64 | 20 | 500 | 0,17 | 16 | 160 | 70 | 500 | 0,17 |
| 7 | 160 | 80 | 1250 | 0,18 | 17 | 54 | 20 | 1250 | 0,18 |
| 8 | 54 | 25 | 400 | 0,3 | 18 | 43 | 10 | 400 | 0,3 |
| 9 | 43 | 20 | 630 | 0,23 | 19 | 210 | 120 | 630 | 0,23 |
| 10 | 210 | 100 | 1250 | 0,52 | 20 | 140 | 100 | 1250 | 0,52 |

Задача Т.4.

Определить мощность **N**рез, затрачиваемую на резание и момент сопротивления резанию **Mcp** , если при продольном точении заготовки диаметром **D** (мм) со скоростью резания **v** (м/мин) тангенциальная сила резания составила **Pz**(Н). Начертите схему расположения составляющих силы резания для рассматриваемого случая обработки резанием.

Варианты исходных данных к задаче Т.4

| № | D | V | $P_z$ | № | D | V | $P_z$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 140 | 75 | 2750 | 11 | 380 | 75 | 2750 |
| 2 | 160 | 130 | 2200 | 12 | 90 | 170 | 2200 |
| 3 | 90 | 170 | 3000 | 13 | 120 | 119 | 3000 |
| 4 | 120 | 110 | 1050 | 14 | 72 | 120 | 1050 |
| 5 | 75 | 180 | 2050 | 15 | 64 | 200 | 2050 |
| 6 | 64 | 100 | 3000 | 16 | 160 | 80 | 3000 |
| 7 | 160 | 80 | 4000 | 17 | 54 | 170 | 4000 |
| 8 | 80 | 170 | 1600 | 18 | 43 | 160 | 1600 |
| 9 | 30 | 150 | 1500 | 19 | 210 | 133 | 1500 |
| 10 | 210 | 130 | 1000 | 20 | 140 | 88 | 1000 |

## Фрезерная обработка

### Задача Ф.1

Определите основное. штучное время и скорость резания при фрезеровании плиты длиной *l* за несколько рабочих ходов *i* цилиндрической фрезой диаметром $d_{фр}$. со скоростью движения подачи *Vs (*мм/мин), глубиной резания *t* и частотой вращения фрезы *n*. Приведите схему обработки с обозначением на ней всех элементов режима резания.

Варианты исходных данных к задаче Ф.1

| № | *l* | $d_{фр}$ | *i* | *t* | *Vs* | *n* | № | *l* | $d_{фр}$ | *i* | *t* | *Vs* | *n* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 350 | 80 | 1 | 3 | 22,4 | 50 | 11 | 200 | 90 | 1 | 4 | 22,4 | 50 |
| 2 | 400 | 90 | 2 | 4 | 31,5 | 71 | 12 | 350 | 120 | 2 | 3 | 31,5 | 71 |
| 3 | 480 | 100 | 3 | 5 | 45 | 100 | 13 | 260 | 100 | 3 | 4 | 45 | 100 |
| 4 | 450 | 110 | 4 | 5 | 63 | 140 | 14 | 280 | 100 | 1 | 3 | 63 | 100 |
| 5 | 380 | 90 | 1 | 3 | 90 | 200 | 15 | 450 | 90 | 2 | 4 | 34,5 | 70 |
| 6 | 440 | 80 | 2 | 2 | 22,4 | 280 | 16 | 380 | 120 | 3 | 2,5 | 22,4 | 55 |
| 7 | 300 | 80 | 1 | 5 | 63 | 140 | 17 | 180 | 80 | 1 | 4 | 63 | 60 |
| 8 | 320 | 100 | 2 | 3 | 90 | 200 | 18 | 220 | 110 | 2 | 3 | 90 | 90 |
| 9 | 360 | 110 | 3 | 5 | 63 | 150 | 19 | 320 | 100 | 3 | 4 | 63 | 100 |
| 10 | 420 | 120 | 4 | 4 | 73,5 | 240 | 20 | 300 | 120 | 4 | 3 | 73,5 | 110 |

### Задача Ф.2

Определите скорость резания, основное и штучное время при фрезеровании паза длиной *l* за несколько рабочих ходов *i* дисковой трехсторонней фрезой диаметром $d_{фр}$. и числом зубьев *z*. Условия обработки: подача на 1 зуб фрезы $s_z$ , частота вращения фрезы *n*, глубина резания *t*. Приведите схему обработки с обозначением на ней всех элементов режима резания.

Варианты исходных данных к задаче Ф.2

| № | *l* | $d_{фр}$ | *i* | *t* | *z* | $s_z$ | *n* | № | *l* | $d_{фр}$ | *i* | *t* | *z* | $s_z$ | *n* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 350 | 80 | 1 | 3 | 18 | 0.05 | 50 | 11 | 200 | 90 | 1 | 4 | 18 | 0,03 | 50 |
| 2 | 400 | 90 | 2 | 4 | 18 | 0,03 | 71 | 12 | 350 | 120 | 2 | 3 | 18 | 0,06 | 71 |
| 3 | 480 | 100 | 3 | 5 | 200 | 0,02 | 100 | 13 | 260 | 100 | 3 | 4 | 200 | 0,01 | 100 |
| 4 | 450 | 110 | 4 | 5 | 22 | 0,05 | 140 | 14 | 280 | 100 | 1 | 3 | 22 | 0,02 | 100 |
| 5 | 380 | 90 | 1 | 3 | 18 | 0,04 | 200 | 15 | 450 | 90 | 2 | 4 | 18 | 0,03 | 70 |
| 6 | 440 | 80 | 2 | 2 | 18 | 0,03 | 280 | 16 | 380 | 120 | 3 | 2,5 | 18 | 0.05 | 55 |
| 7 | 300 | 80 | 1 | 5 | 16 | 0,06 | 140 | 17 | 180 | 80 | 1 | 4 | 16 | 0,03 | 60 |
| 8 | 320 | 100 | 2 | 3 | 22 | 0,01 | 200 | 18 | 220 | 110 | 2 | 3 | 22 | 0,02 | 90 |
| 9 | 360 | 110 | 3 | 5 | 22 | 0,02 | 150 | 19 | 320 | 100 | 3 | 4 | 22 | 0,05 | 100 |
| 10 | 420 | 120 | 4 | 4 | 24 | 0,03 | 240 | 20 | 300 | 120 | 4 | 3 | 24 | 0.05 | 110 |

## Литература


1. Сафонов Б.П., Брагин Л.П., Марценко К.Н. Сборник задач по материаловедению и технологии конструкционных материалов. НИРХТУ, Новомосковск, 2003. – 78 с.
2. Дальский А. М. и др. Технология конструкционных материалов. – М.:Машиностроение, 1992.
3. Д альский А. И. и др. Технология металлорежущих материалов. М., Машиностроение, 2008 , 664 с.
4. Петруха П. Г. Резание конструкционных материалов, режущие инструменты и станки. М., Машиностроение, 2007 , 614 с.
5. Обработка металлов резание. А. П. Панов и др. Справочник технолога. М., Машиностроение, 2009 , 736 с.
6. Марочник сталей и сплавов. / В.Г. Сорокин, А.А. Волосникова, С.А.
7. Виткин и др.; Под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение,
8. 1989. – 640 с.
9. Справочник сварщика. Под ред. В.В. Степанова. Изд. 3-е. – М.: Машиностроение, 1975. – 520 с.
10. Карпенков В.Ф., Баграмов Л.Г., Стрельцов В.В., Карпенкоа А.В. Технология конструкционных материалов. Основы обработки металлов резанием. – М.:Компания Спутник+, 2002. – 396 с.


Учебное издание

Татьяна Петровна Глинникова
Сергей Александрович Волегов

# Технология конструкционных материалов

Учебное пособие по практической и самостоятельной работе по теме «Обработка металлов давлением», «Сварка», Обработка металлов резанием»

для студентов направления бакалавриата:
15.03.01 - «Машиностроение»,
15.03.02 - «Технологические машины и оборудование» (ТМО)
и среднего профессионального образования
15.02.01 - «Монтаж техническая эксплуатация промышленного оборудования (по отраслям)» очного
и заочного обучения

Редактор В. В. Баклаева

Подписано в печать. Бумага писчая. Формат 60 × 84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. 4,6. Уч.-изд. л. 2. Тираж 100. Заказ №

Издательство УГГУ
620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

Министерство образования и науки
ФГБОУ ВО УГГУ

# «ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ»

## ИЗУЧЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И ВЫБОР РЕЖИМА РЕЗАНИЯ

## (часть 1)

## ПОСОБИЕ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ САМОСТОЯТЕЛЬНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

**для студентов направления бакалавриата: 15.03.01 (150700)- «Машиностроение», 15.03.02 (151000) - «Технологические машины и оборудование» (ТМО) и среднего профессионального образования (15.02.01) 151031 - «Монтаж и техническая эксплуатация промышленного оборудования (по отраслям)» *очного и заочного обучения***




**Екатеринбург**
**2018**

# 1.РАБОТА. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ И ОСНОВНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВРЕМЕНИ ПРИ ТОЧЕНИИ

## 1.1.Общие сведения.

При проектировании операций для сопоставления вариантов производительности необходимо знать норму времени. Время выполнения операции зависит от режимов резания, оборудования.

Элементы в режиме резания, обычно, устанавливают в порядке, указанном ниже.

***Глубина резания t,*** мм. При обработке цилиндрических поверхностей:

$$t = \frac{D - d}{2},$$

где $D$ – диаметр заготовки до обработки (при наружном точении) или диаметр обработанной поверхности (при растачивании, рассверливании, зенкеровании и т.п.);

$d$ – диаметр обработанной поверхности (наружное точение) или диаметр обрабатываемой поверхности (при растачивании, рассверливании, зенкеровании и т.п.) после одного рабочего хода инструмента.

***Глубина резания t***: при черновом точении и отсутствии ограничений по мощности оборудования, жесткости системы СПИД принимается равной припуску на обработку; при чистовом точении припуск срезается за два прохода и более. На каждом последующем проходе следует назначить меньшую глубину резания, чем на предшествующем. При параметре шероховатости обработанной поверхности $Ra$ = 3,2 мкм включительно $t$ = 0,5 ÷ 2,0 мм; $Ra \geq 0{,}8$ мкм, $t$ = 0,1 ÷ 0,4 мм.

***Число ходов i.*** Назначается больше одного, если величина припуска превышает допустимую глубину резания ***t.***

***Подача S:*** при черновом точении принимается максимально допустимой по мощности оборудования, жесткости системы СПИД, прочности режущей пластины и прочности державки. Рекомендуемые подачи при черновом наружном точении приведены в (табл.1.4), а при черновом растачивании в (табл.П1.2). Подачи при чистовом точении выбирают в зависимости от требуемых параметров шероховатости обработанной поверхности и радиуса при вершине резца (табл. 1.16).

При прорезании пазов и отрезании величина поперечной подачи зависит от свойств обрабатываемого материала, размеров паза и диаметра обработки (табл.П1.3).

Принимается подача **ближайшая меньшая по паспортным данным станка.**

***Скорость резания V,*** м/мин. Рассчитывают по эмпирическим формулам, установленным для каждого способа обработки

$$V = V_{ТБ} \cdot K_V,$$

где $V_{ТБ}$ – скорость резания, вычисленная по эмпирической формуле, с использованием табличных данных, или определяемая по таблице;

$$V = \frac{Cv}{T^m t^x S^y} K_v,$$

а при отрезании, прорезании и фасонном точении – по формуле

$$V = \frac{C_v}{T^m S^y} K_v.$$

**Среднее значении стойкости *T* при одноинструментной обработке – 30 ÷ 60 мин.**

Значения коэффициента $C_V$ показателей степени *x, y, z* и *m* приведены в (табл.1.5 и табл.П1.7).

Коэффициент $K_V$ является произведением коэффициентов, учитывающих влияние материала заготовки $K_{MV}$ (см. табл.1.7), состояния поверхности $K_{ПV}$ (табл.1.9), материала инструмента $K_{ИV}$ (см. табл.1.8).

***Частота вращения n,*** об /мин. Для токарной, сверлильной, фрезерной и круглошлифовальной обработок

$$n = 1000 \cdot V / (\pi \cdot D),$$

где *D* – диаметр заготовки или инструмента, мм.

По паспортным данным станка принимают $n_ф$ – фактическую частоту вращения, ближайшую меньшую к расчетной *n* при черновой обработке.

В справочниках по металлорежущим станкам указывают обычно частоту вращения шпинделя $n_{max}$ и $n_{min}$.

Из определения геометрической прогрессии следует, что

$$n_{max} = n_{min} \cdot \varphi^{m-1},$$

где φ – знаменатель прогрессии; *m* – общее число ступеней частоты вращения соответствующего элемента станка.

Значения нормализованных знаменателей рядов φ, возведенные в степень приведены в табл.1.2, пользуясь которой, можно определить значения φ на основе заданных в технической характеристике станка $n_{max}$, $n_{min}$ и *m*. Для этого вычисляют частное $n_{max} / n_{min}$ и в строке, соответствующей степени $m - 1$, находим то числовое значение $\varphi^{m-1}$, которое равно или близко к вычисленному, и по этому значению – величину φ.

Затем делим расчетное значение числа оборотов, двойных ходов или подачи на их минимальное значение, получая таким образом расчетное значение φ в какой-то степени *x*. В том же столбце для найденного ранее значения φ находим ближайшее меньшее число, соответствующее вычисленному $\varphi^{x} = n_{\text{р}} / n_{\min}$. Умножив затем найденное значение $\varphi^{x}$ на $n_{\min}$, получим расчетное число оборотов, двойных ходов или подачи.

Таблица 1.2

**Значения нормализованных знаменателей рядов φ, возведенные в степени**

| φ | 1,06 | 1,12 | 1,26 | 1,41 | 1,58 | 1,78 | 2,00 | φ | 1,06 | 1,12 | φ | 1,06 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\varphi^{2}$ | 1,12 | 1,26 | 1,58 | 2,00 | 2,50 | 3,16 | 4,00 | $\varphi^{21}$ | 3,35 | 11,28 | $\varphi^{40}$ | 10,08 |
| $\varphi^{3}$ | 1,19 | 1,41 | 2,00 | 2,82 | 4,00 | 5,64 | 8,00 | $\varphi^{22}$ | 3,55 | 12,64 | $\varphi^{41}$ | 10,68 |
| $\varphi^{4}$ | 1,26 | 1,58 | 2,50 | 4,00 | 6,32 | 10,08 | 16,00 | $\varphi^{23}$ | 3,77 | 14,24 | $\varphi^{42}$ | 11,28 |
| $\varphi^{5}$ | 1,34 | 1,78 | 3,16 | 5,64 | 10,08 | 17,92 | 32,00 | $\varphi^{24}$ | 4,00 | 16,00 | $\varphi^{43}$ | 11,96 |
| $\varphi^{6}$ | 1,41 | 2,00 | 4,00 | 8,00 | 16,00 | 32,00 | 64,00 | $\varphi^{25}$ | 4,24 | 17,92 | $\varphi^{44}$ | 12,64 |
| $\varphi^{7}$ | 1,49 | 2,24 | 5,04 | 11,28 | 25,28 | 56,80 | | $\varphi^{26}$ | 4,48 | 20,16 | $\varphi^{45}$ | 13,40 |
| $\varphi^{8}$ | 1,58 | 2,50 | 6,32 | 16,00 | 40,00 | | | $\varphi^{27}$ | 4,75 | 22,56 | $\varphi^{46}$ | 14,24 |
| $\varphi^{9}$ | 1,67 | 2,81 | 8,00 | 22,56 | 64,00 | | | $\varphi^{28}$ | 5,04 | 25,28 | $\varphi^{47}$ | 15,09 |
| $\varphi^{10}$ | 1,78 | 3,16 | 10,08 | 32,00 | | | | $\varphi^{29}$ | 5,34 | 28,48 | $\varphi^{48}$ | 16,00 |
| $\varphi^{11}$ | 1,89 | 3,55 | 12,64 | 45,12 | | | | $\varphi^{30}$ | 5,64 | 32,00 | $\varphi^{49}$ | 16,96 |
| $\varphi^{12}$ | 2,00 | 4,00 | 16,00 | | | | | $\varphi^{31}$ | 5,98 | 35,84 | $\varphi^{50}$ | 17,92 |
| $\varphi^{13}$ | 2,12 | 4,48 | 20,16 | | | | | $\varphi^{32}$ | 6,32 | 40,00 | | |
| $\varphi^{14}$ | 2,24 | 5,04 | 25,28 | | | | | $\varphi^{33}$ | 6,70 | 44,96 | | |
| $\varphi^{15}$ | 2,36 | 5,64 | 32,00 | | | | | $\varphi^{34}$ | 7,12 | 50,56 | | |
| $\varphi^{16}$ | 2,50 | 6,32 | 40,00 | | | | | $\varphi^{35}$ | 7,55 | 56,80 | | |
| $\varphi^{17}$ | 2,65 | 7,12 | 50,65 | | | | | $\varphi^{36}$ | 8,00 | 64,00 | | |
| $\varphi^{18}$ | 2,81 | 8,00 | 64,00 | | | | | $\varphi^{37}$ | 8,48 | | | |
| $\varphi^{19}$ | 2,98 | 8,96 | 80,64 | | | | | $\varphi^{38}$ | 8,96 | | | |
| $\varphi^{20}$ | 3,16 | 10,1 | 101,6 | | | | | $\varphi^{39}$ | 9,50 | | | |

**Пример 1**.

**Назначение величины частоты вращения шпинделя.**

Для станка 6Т104 $n_{\max} = 2800$ мин $^{-1}$, $n_{\min} = 63$ мин $^{-1}$ и $m = 12$. Найти $n$, если рассчитанная частота вращения $n_{\text{р}} = 610$ мин $^{-1}$.

**Решение**.

Находим $\varphi^{m-1} = n_{\max} / n_{\min}$; $\varphi^{12-1} = 2800 / 63 = 44{,}4$.

По табл. 1.2 находим $\varphi^{11} = 45{,}12$, что соответствует $\varphi = 1{,}41$

$$\varphi^{x} = n_{\text{р}} / n_{\min} = 9{,}6.$$

В графе, соответствующей φ = 1,41 находим ближайшее меньшее значение $\varphi^{x} = 8{,}00$, тогда

$$n = n_{\min} \cdot \varphi^{x} = 63 \cdot 8{,}00 = 544 \text{ мин}^{-1}.$$

Фактическая скорость резания, м /мин

$$V_{\Phi} = \pi \cdot D \cdot n \,/1000.$$

Проверку правильности расчета режима резания производят исходя из мощности станка. Эффективную мощность($N_{\text{р}}$), затрачиваемую на резание, рассчитывают по формуле

$N_{\text{Р}} = P_Z \cdot V$ / (60·1020) кВт – при точении и фрезеровании,

$N_{\text{Р}} = M_{\text{КР}} \cdot n$ / 9750 кВт – при обработке осевым инструментом,

где $P_{\text{Z}}$ – главная составляющая силы резания, Н,

$M_{\text{КР}}$ – крутящий момент на шпинделе, Н·м.

Полученная мощность $N_{\text{р}}$ не должна превышать эффективную мощность станка($N_{\text{дв}}$)

$$N_{\text{р}} \le N_{\text{ДВ}} \cdot \eta,$$

где $N_{\text{дв}}$ – мощность электродвигателя главного привода станка;

η – КПД кинематической цепи от электродвигателя до инструмента.

Определяем основное технологическое время $T_{\text{О}}$ по уравнению

$$T_{\text{О}} = L \cdot i \,/\, S, \text{ мин.},$$

где $L$ – расчетная длина перемещения инструмента, мм;

$i$ – число рабочих ходов в данном переходе; $S$ – подача, мм /мин.

Расчетная длина перемещения инструмента $L$ определяется как

$$L = l + l_{\text{вр}} + l_{\text{пер}},$$

где $l$, $l_{\text{вр}}$, $l_{\text{пер}}$ – длины соответственно обрабатываемой поверхности, врезания и перебега инструмента.

**Пример 2.**

**Расчет режима резания при точении.**

Вал обтачивают на токарно-винторезном станке. Заготовка – прокат из углеродистой стали 45 ($\sigma_{\text{В}}$ = 750МПа). Обтачивают поверхность Ø94 (рис.1.1). Выбрать станок, инструмент, рассчитать режимы резания и
основное время.

**Решение.**

Для обработки предложенного вала принимаем станок 16Б16П (табл.1.3). По таблице справочника [1] принимаем проходной упорный резец.

Определяем глубину резания ***t.*** Точение черновое ($Rz$ = 80),
поэтому $t = (D - d)\,/2 = (100 - 94) / 2 = 3$ мм.

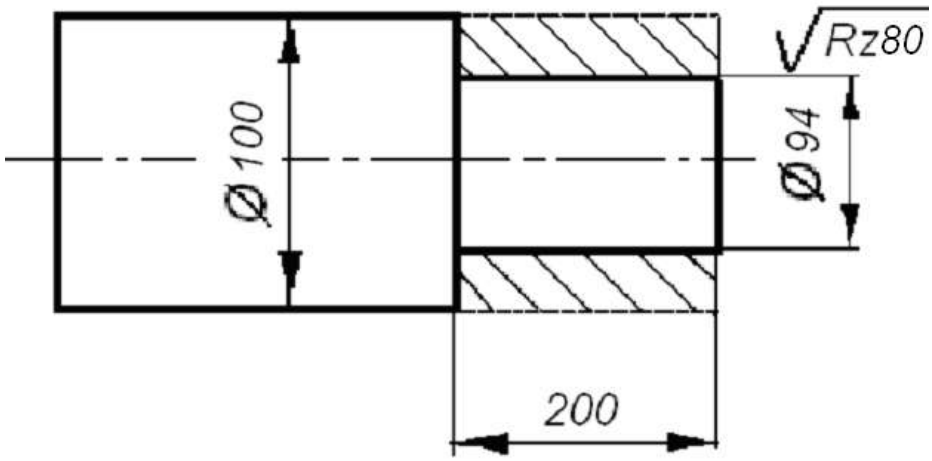



Рис.1.1.

Определяем величину подачи ***S***. Принимаем **максимально допустимую** по табл.1.4

$$\boldsymbol{S} = 0{,}8 \cdot K = 0{,}8 \cdot 0{,}8 = 0{,}64 \text{ мм/об},$$

где $K$ – коэффициент, учитывающий состояние поверхности (см. табл.1.4).

Определим действительные значения подачи по паспортным данным станка (табл.1.3)

$$S = 0{,}6 \text{ мм /об.}$$

Определим скорость резания $V$, м/мин по формуле

$$V = \frac{C_V}{T^m \cdot t^x \cdot S^y} \cdot K_{\text{мv}} \cdot K_{\text{пv}} \cdot K_{\text{иv}} \cdot K_{\varphi v} \cdot K_{\varphi' v}.$$

Значения $C_v$, $m$, $y$ и $x$ приведены в табл.1.5.

$C_v = 350$, $m = 0{,}2$, $x = 1{,}15$, $y = 0{,}35$ Рекомендуемое значение стойкости $T = 30 \div 60$ мин.

Принимаем $T = 45$ мин.

$K_{MV} = 750 / \sigma_в$ – по табл. 1.7, $K_{MV} = 750 / 750 = 1$.

$K_{ПV} = 0{,}9$ – по табл. 1.9.

$K_{ИV}$ – зависит от материала режущей части резца, принятого для обработки (см. табл. 1.8). $K_{ИV} = 1$ (для сплава Т15К6).

Для определения $K_{\varphi V}$ и $K_{\varphi' V}$ (табл.1.12) необходимо определить значения углов φ и φ′ (табл. 1.10, 1.11) [2]:

$\varphi = 90°$; $\varphi' = 15°$;

$K_{\varphi V} = 0{,}7$; $K_{\varphi' V} = 0{,}97$.

$$V = 350 \cdot 1 \cdot 0{,}9 \cdot 1 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}97 / (45^{\,0{,}2} \cdot 3^{\,0{,}15} \cdot 0{,}6^{\,0{,}35}) = 85 \text{ м/мин}.$$

Определяем расчетную частоту вращения шпинделя

$$n = 1000 \cdot V / (\pi \cdot D) = 1000 \cdot 85 / (\pi \cdot 100) = 270{,}7 \text{ об/мин}.$$

**По паспортным данным станка определяем** (табл.1.3) **или рассчитываем фактическую частоту вращения $n_ф$, ближайшую меньшую к расчетной.**

$$n_ф = 250 \text{ об/мин}.$$

Таблица 1.3

**Токарно-винторезные станки [1]**

| | 16 Б16П | 16 К20 | 16 К25 |
|---|---|---|---|
| Наибольший диаметр обрабатываемой заготовки:<br>над станиной<br>над суппортом<br>отверстия шпинделя | <br>320<br>180<br>36 | <br>400<br>220<br>55 | <br>500<br>215<br>50 |
| Наибольшая длина обрабатываемой заготовки | 1000 | 2000 | 2000 |
| Частота вращения шпинделя, мин $^{-1}$ | 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000 | 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600 | 12,5 – – 1600 Число скоро-стей 22 |
| Сечение резца, мм | 25×20 | 25×25 | 25×25 |
| Подача продольная, мм /об | 0,05; 0,06; 0,07; 0,08; 0,1; 0,12; 0,15; 0,17; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 2,0; 2,4; 2,8 | 0,05; 0,06; 0,075; 0,09; 0,1; 0,125; 0,15; 0,175; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 2,0; 2,4; 2,8 | 0,05 – – 2,8 Число подач 24 |
| Подача поперечная, мм /об | 1/2 от продольной | | |
| Мощность двигателя, кВт | 6,3 | 10 | 11 |
| КПД η станка | 0,7 | 0,75 | 0,75 |

По $n_Ф$ рассчитаем фактическую скорость резания $V_ф$

$$V_Ф = \pi \cdot D \cdot n_Ф / 1000 = \pi \cdot 100 \cdot 250 / 1000 = 78{,}5 \text{ м /мин.}$$

Проверку правильности выбранного режима резания произведем исходя из мощности станка.

Эффективная мощность $N_Р$, кВт, затрачиваемая на резание, рассчитывается по формуле

$$N_Р = P_Z \cdot V_Ф / (60 \cdot 1020),$$

где $P_z$ – главная составляющая силы резания, Н

$$P_Z = 10 \cdot C_Р \cdot t^{\,x} \cdot S^{\,y} \cdot V_Ф \cdot n \cdot K_{МР} \cdot K_{ФР} \cdot K_{\gamma Р} \cdot K_{rР},$$

Таблица 1.4

**Подачи при черновом наружном точении**

| Диаметр детали, мм | Обрабатываемый материал | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Сталь | | | | Чугун | | | |
| | Подача *S*, мм /об при глубине резания $t$, мм | | | | | | | |
| | до 3 | 3–5 | 5–8 | 8–12 | до 3 | 3–5 | 5–8 | 8–12 |
| до 20 | 0,35 | – | – | – | – | – | – | – |
| 20 – 40 | 0,45 | 0,35 | – | – | 0,45 | – | – | – |
| 40 – 60 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | – | 0,75 | 0,65 | 0,55 | – |
| 60 – 100 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 1,1 | 0,95 | 0,8 | 0,7 |
| 100 – 140 | 1,05 | 0,95 | 0,8 | 0,7 | 1,25 | 1,05 | 0,95 | 0,75 |

Примечание. При работе с ударами и обработке необработанных поверхностей, табличное значение подачи следует умножить на коэффициент 0,8.

Таблица 1.5

**Значение коэффициента $C_V$ и показателей степени в формуле скорости резания**

| Вид обработки | Материал режущей части резца | Подача, мм /об | Коэффициент и показатели степени | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $C_V$ | $x$ | $y$ | $m$ |
| Обработка конструкционной углеродистой стали, $\sigma_в$ = 750 МПа | | | | | | |
| Наружное продольное точение | Т15К6 | до 0,3<br>св. 0,3<br>до 0,7<br>св. 0,7 | 420<br><br>350<br>340 | 0,15 | 0,2<br><br>0,35<br>0,45 | 0,2 |
| Обработка серого чугуна, *HB*190 | | | | | | |
| Наружное продольное точение | ВК6 | до 0,4<br>св. 0,4 | 292<br>243 | 0,15 | 0,2<br>0,4 | 0,2 |

Значения $C_P$, $n$, $y$ и $x$ приведены в табл.1.13, численные значения коэффициентов $K_{MP}$,$\cdot K_{\varphi p}$, $K_{\gamma p}$ и $K_{rp}$ приведены в табл. 1.14, 1.15, 1.16. Значение угла $\gamma$ и радиуса при вершине резца $r$ можно принять по табл.1.17, 1.18.

$$P_z = 10 \cdot 300 \cdot 31 \cdot 0{,}50{,}75 \cdot 78{,}5 - 0{,}15 \cdot 1 \cdot 0{,}89 \cdot 1 = 2475 \text{ Н}.$$

Эффективная мощность $N_P$

$$N_P = 2475 \cdot 78{,}5/(60 \cdot 1020) = 3{,}18 \text{ кВт}.$$

Должно выполняться условие $N_P \le N_{дв} \cdot \eta$,

где $N_{дв}$ = 6,3 кВт – для станка 16Б16П, η = 0,7 (см. табл. 1.3).

$$3{,}18 \le 6{,}3 \cdot 0{,}7;$$

Если неравенство $N_P \le N_{ДВ} \cdot \eta$ не выполняется, необходимо проверить расчет для меньшей частоты вращения

.

Припуск снимаем за один проход $i$ = 1.

$L$ – длина рабочего хода резца, мм

$$L = l + l_{вр} + l_{пер},$$

где $l$ – размер по эскизу, мм

$l_{вр}$ – врезание резца – $l_{вр} = t \cdot \operatorname{tg} \varphi$ или по табл.П1.6,

$l_{пер}$ – перебег резца – по табл.П1.6.

$l$ = 200 мм, $l_{вр}$ = 1 мм, $l_{пер}$ = 1 мм,

Определяем основное время (мин)

$$T_O = L \cdot i / (n \cdot S);$$

$$T_O = 202 / (250 \cdot 0{,}5) = 1{,}62 \text{ мин.}$$

$$N_P = P_Z \cdot V_Ф / (60 \cdot 1020),$$

где $P_z$ – главная составляющая силы резания, Н

$$P_Z = 10 \cdot C_P \cdot t^{x} \cdot S^{y} \cdot V_Ф \cdot n \cdot K_{МР} \cdot K_{ФР} \cdot K_{\gamma P} \cdot K_{rP}.$$

Таблица 1.6

**Выбор марок твердого сплава**

| Выбор и характер обработки | марка твердого сплава при обработке | |
|---|---|---|
| | стали | чугуна |
| Черновое точение по корке и окалине при непрерывном сечении среза и прерывистом резании с ударами | Т5К10, ВК8 | ВК8, ВК4 |
| Черновое точение по корке при непрерывном сечении среза и непрерывном резании | Т14К8, Т5К10 | ВК4, ВК8, ВК6 |
| Черновое точение по корке при относительно равномерном сечении среза и непрерывном резании | Т15К6, Т14К8 | ВК4, ВК8 |
| Получистое и чистое точение при прерывистом резании | Т15К6, Т14К8, Т5К10 | ВК4, ВК6, ВК8 |
| Точное точение при прерывистом резании | Т30К4, Т15К6 | ВК3, ВК4 |
| Точное точение при непрерывном резании | Т30К4 | ВК3 |

Таблица 1.7

**Поправочный коэффициент $K_{MV}$, учитывающий влияние физико-механических свойств обрабатываемого материала на скорость резания**

| Обрабатываемый материал | Расчетная формула |
|---|---|
| Сталь | $K_{MV} = 750 / \sigma_в$ |
| Чугун | $K_{MV} = (190/HB)^{1,25}$ |

Таблица 1.8

**Поправочный коэффициент $K_{ИV}$, учитывающий влияние инструментального материала на скорость резания**

| Обрабатываемый материал | Значение коэффициента $K_{ИV}$ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Сталь конструкционная | Т5К10<br>0,65 | Т14К8<br>0,8 | Т15К6<br>1,0 | Т30К4<br>1,4 | ВК8<br>0,4 |
| Сталь, чугун | | У12А<br>0,5 | ХВГ<br>0,6 | 9ХС<br>0,6 | Р6М5<br>1,0 |
| Чугун | ВК3<br>1,15 | ВК4<br>1,1 | ВК6<br>1,0 | ВК8<br>0,83 | – |

Таблица 1.9

**Поправочный коэффициент $K_{ПV}$, учитывающий влияние состояния поверхности заготовки на скорость резания**

| Состояние поверхности заготовки | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Без корки | С коркой | | | |
| | прокат | поковка | литье | |
| | | | нормальное | сильно загрязненное |
| 1,0 | 0,9 | 0,8 | 0,85 | 0,55 |

Таблица 1.10

**Значения главного угла в плане φ в зависимости от вида обработки [1]**

| Вид обработки | φ,° |
|---|---|
| Чистовая обработка с малыми глубинами резания при высокой жесткости СПИД | 10 – 20 |
| Точение в условиях достаточной жесткости СПИД | 30 – 45 |
| Точение в условиях пониженной жесткости СПИД | 60 – 75 |
| Подрезка, прорезка, отрезка, обтачивание, растачивание в условиях малой жесткости. | 90 |

Таблица 1.11

**Значения вспомогательного угла в плане φ′ в зависимости от условий обработки [1]**

| Условия обработки | φ′,° |
|---|---|
| Обточка напроход быстрорежущими резцами<br>- твердосплавными<br>- с врезанием | 5 – 10<br>15<br>15 – 30 |
| Расточка, подрезка быстрорежущими резцами<br>- твердосплавными | 10 – 15<br>20 |

Таблица 1.12

**Поправочные коэффициенты, учитывающие влияние углов заточки резца на скорость резания**

| Главный угол в плане φ,° | Коэффициент $K_{\varphi V}$ | Вспомогательный угол в плане φ′,° | Коэффициент $K_{\varphi' V}$ |
|---|---|---|---|
| 20 | 1,4 | 10 | 1,0 |
| 30 | 1,2 | 15 | 0,97 |
| 45 | 1,0 | 20 | 0,94 |
| 60 | 0,9 | 30 | 0,91 |
| 75 | 0,8 | 45 | 0,87 |
| 90 | 0,7 | – | – |

Таблица 1.13

**Значение коэффициента $C_P$ и показателей степени в формуле силы резания**

| Обрабатываемый материал | $C_P$ | $x$ | $y$ | $n$ |
|---|---|---|---|---|
| Сталь | 300 | 1,0 | 0,75 | – 0,15 |
| Чугун | 92 | 1,0 | 0,75 | 0 |

Таблица 1.14

**Поправочные коэффициенты, учитывающие влияние геометрических параметров режущей части инструмента на составляющие силы резания при обработке стали и чугуна**

| Параметр | Величина | Поправочный коэффициент | |
|---|---|---|---|
| | | Обозначение | Величина |
| Главный угол в плане φ | 30<br>45<br>60<br>90 | $K_{\varphi p}$ | 1,08<br>1,00<br>0,94<br>0,89 |
| Передний угол γ | – 15<br>0<br>10 | $K_{\gamma p}$ | 1,25<br>1,10<br>1,00 |

Таблица 1.15

**Поправочный коэффициент $K_{MP}$ для стали и чугуна, учитывающий влияние качества обрабатываемого материала и силовые зависимости**

| Обрабатываемый материал | Расчетная формула | Показатель степени |
|---|---|---|
| Конструкционная углеродистая сталь<br>$\sigma_B$, МПА<br>< 600<br>> 600 | $K_{мр} = \left(\frac{\sigma_в}{750}\right)^n$ | <br><br>0,75 / 0,35<br>0,75 / 0,75 |
| Чугун | $K_{мр} = (HB/190)^n$ | 0,4 / 0,55 |

П, в знаменателе – для быстрорежущих сталей.римечание. В числителе приведены значения показателя степени для твердого
сплава

Таблица 1.16

**Поправочный коэффициент $K_{rp}$, учитывающий влияние радиуса при вершине резца на силу резания**

| Радиус при вершине резца ***r***, мм | $K_{rp}$ |
|---|---|
| 0,5 | 0,87 |
| 1,0 | 0,93 |
| 2,0 | 1,0 |
| 3,0 | 1,04 |

Таблица 1.17

**Ориентировочные значения углов γ и α при обработке различных материалов [1]**

| Обрабатываемый материал | Резцы из быстрорежущей стали | | Резцы из твердых сплавов напайные | |
|---|---|---|---|---|
| | α,° | γ,° | α,° | γ,° |
| Углеродистые и легированные стали:<br>$\sigma_B \le 800$ МПа<br>$\sigma_B = 800 \div 1100$ МПа<br>$\sigma_B > 1100$ МПа | <br>8<br>8<br>8 | <br>10 – 20<br>10 – 15<br>10 – 15 | <br>6 – 8<br>6 – 8<br>6 – 8 | <br>0 – 15<br>0 – 15<br>0 – 15 |
| Серый чугун<br>≤ *HB* 220<br>> *HB* 220 | <br>6 – 8<br>6 | <br>6 – 12<br>0 – 6 | <br>6 – 8<br>6 – 8 | <br>10 – 15<br>0 – 10 |

Таблица 1.18

**Рекомендованные размеры радиусов при вершине резца *r*, мм [1].**

| Резцы | Размеры $H \times B$ | | |
|---|---|---|---|
| | 12 × 2<br>16 × 10 | 16 × 12<br>16 × 16<br>20 × 12 | 20 × 16<br>20 × 20<br>25 × 16 |
| Расточные | 0,5 (1,0) | 1,0 (1,6) | |
| Проходные подрезные | 0,5 | 1,0 | |

Примечание. Несовпадающие значения размеров быстрорежущих резцов приведены в круглых скобках.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица П1.1

**Подачи, мм /об при чистовом точении**

| Параметр шероховатости поверхности, мкм | | Радиус при вершине резца *r*, мм | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Ra* | *Rz* | 0,4 | 0,8 | 1,2 | 1,6 | 2,0 | 2,4 |
| 0,63 | | 0,07 | 0,10 | 0,12 | 0,14 | 0,15 | 0,17 |
| 1,25 | – | 0,1 | 0,13 | 0,165 | 0,19 | 0,21 | 0,23 |
| 2,50 | | 0,144 | 0,20 | 0,246 | 0,29 | 0,32 | 0,35 |
| – | 20 | 0,25 | 0,33 | 0,42 | 0,49 | 0,55 | 0,60 |
| | 40 | 0,35 | 0,51 | 0,63 | 0,72 | 0,80 | 0,87 |
| | 80 | 0,47 | 0,66 | 0,81 | 0,94 | 1,04 | 1,14 |

**Примечание:** Подачи даны для обработки сталей с $\sigma_в$ = 700 ÷ 900 МПа и чугунов; для сталей с $\sigma_в$ = 500 ÷ 700 МПа значение подач умножать на коэффициент $K_S$ = 1,25; для сталей с $\sigma_в$ = 900 ÷ 1100 МПа значения подач умножать на коэффициент $K_S$ = 0,45.

Таблица П1.2

## Подачи, мм /об при черновом растачивании на токарных станках резцами с пластинами из твердого сплава и быстрорежущей стали

| Резец | | Обрабатываемый материал | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Диаметр сечения резца | Вылет резца | Сталь конструкционная углеродистая, легированная и жаропрочная | | | Чугун и медные сплавы | | |
| | | Подача $S$, мм /об, при глубине резания $t$, мм | | | | | |
| | | 2 | 3 | 5 | 2 | 3 | 5 |
| 10 | 50 | 0,08 | – | – | 0,12 –0,16 | – | – |
| 12 | 60 | 0,10 | 0,08 | – | 012– 0,20 | 0,12 – 0,18 | – |
| 16 | 80 | 0,1 – 0,2 | 0,15 | 0,1 | 0,2 – 0,3 | 0,15– 0,25 | 0,1– 0,18 |
| 20 | 100 | 0,2 – 0,3 | 0,15 –0,25 | 0,12 | 0,3 – 0,4 | 0,25– 0,35 | 0,12–0,25 |

Примечания. 1. Верхние пределы подач рекомендуются для меньшей глубины резания при обработке менее прочных материалов, нижние – для большей глубины и более прочных материалов.

2. См. примечание к табл.1. 4.

Таблица П1.3

## Подачи, мм об., при прорезании пазов и отрезании

| Диаметр обработки, мм | Ширина резца, мм | Обрабатываемый материал | |
|---|---|---|---|
| | | Сталь конструкционная углеродистая и легированная, стальное литье | Чугун, медные и алюминиевые сплавы |
| До 20 | 3 | 0,06 – 0,08 | 0,11 – 0,14 |
| Св.20 до 40 | 3 – 4 | 0,1 – 0,12 | 0,16 – 0,19 |
| » 40 » 60 | 4 – 5 | 0,13 – 0,16 | 0,2 – 0,24 |
| » 60 » 100 | 5 – 8 | 0,16 – 0,23 | 0,24 – 0,32 |
| » 100 » 150 | 6 – 10 | 0,18 – 0,26 | 0,3 – 0,4 |
| » 150 | 10 – 15 | 0,28 – 0,36 | 0,4 – 0,55 |

**Примечание**:

1.При отрезании сплошного материала диаметром более 60 мм при приближении резца к оси детали до 0,5 радиуса табличные значения подачи следует уменьшить на 40 – 50 %.

2. При работе резцами, установленными в револьверной головке, табличные значения умножить на коэффициент 0,8.

Таблица П1.4

**Коэффициенты для расчета подачи при чистовом точении по формуле**

$$S = \frac{C_s \cdot R_z^y \cdot r^u}{t^x \cdot \varphi^z \cdot \varphi_1^z}$$

| Обрабатываемый материал | $C_S$ | $x$ | $y$ | $z$ | $u$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Сталь | 0,008 | 0,3 | 1,4 | 0,35 | 0,7 |
| Чугун | 0,045 | 0,25 | 1,25 | 0,5 | 0,8 |

Таблица П1.5

**Подачи, мм/об., при фасонном точении**

| Ширина резца, мм | Диаметр обработки, мм | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 20 | 25 | 40 | 60 и более |
| 8 | 0,03 – 0,09 | 0,04 – 0,09 | 0,04 – 0,09 | 0,04 – 0,09 |
| 10 | 0,03 – 0,07 | 0,04 – 0,085 | 0,04 – 0,085 | 0,04 – 0,085 |
| 15 | 0,02 – 0,05 | 0,035 – 0,075 | 0,04 – 0,08 | 0,04 – 0,08 |
| 20 | – | 0,03 – 0,06 | 0,04 – 0,08 | 0,04 – 0,08 |
| 30 | – | – | 0,035 – 0,07 | 0,035 – 0,07 |
| 40 | – | – | 0,03 – 0,06 | 0,03 – 0,06 |
| 50 и более | – | – | – | 0,025 – 0,055 |

**Примечание:** Меньшие подачи брать для более сложных и глубоких профилей и твердых металлов больше – для простых профилей и мягких металлов.

Таблица П1.6

**Величина врезания $l_{вр}$ и перебега $l_{пер}$ при работе резцами**

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Резцы</td><td colspan="12">Глубина резания $t$</td></tr>
<tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>10</td><td>12</td><td>14</td><td>16</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="12">Величина врезания $l_1$</td></tr>
<tr><td rowspan="6">Проходные и расточные с углом в плане φ</td><td>15°</td><td>5</td><td>9</td><td>13</td><td>16</td><td>20</td><td>24</td><td>28</td><td>31</td><td>39</td><td>–</td><td>–</td><td>–</td></tr>
<tr><td>30°</td><td>3</td><td>5</td><td>7</td><td>8</td><td>10</td><td>12</td><td>14</td><td>15</td><td>19</td><td>22</td><td>26</td><td>29</td></tr>
<tr><td>45°</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>12</td><td>14</td><td>16</td><td>18</td></tr>
<tr><td>60°</td><td rowspan="2">1</td><td>2</td><td>3</td><td>3</td><td>4</td><td>4</td><td>5</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>9</td><td>11</td></tr>
<tr><td>75°</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>5</td></tr>
<tr><td>90°</td><td colspan="11">3</td><td>5</td></tr>
<tr><td colspan="2">Подрезные</td><td colspan="12" rowspan="3">При работе в упор – 3<br>При работе на проход – 5</td></tr>
<tr><td colspan="2">Отрезные</td></tr>
<tr><td colspan="2">Прорезные</td></tr>
<tr><td colspan="2">Фасонные</td><td colspan="12">3</td></tr>
</table>

Таблица П.1.7

**Значение коэффициента $C_V$ и показателей степени в формулах скорости резания при обработке резцами**

| Вид обработки | Материал режущей части | Характеристика подачи | Коэффициент и показатели степени | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $C_V$ | $x$ | $y$ | $m$ |
| *Обработка конструкционной углеродистой стали,* $\sigma_в$ | | | | | | |
| Наружное продольное точение проходными резцами | Т15К6* | $S$ до 0,3<br>$S$ св.0,3 до 0,7<br>$S$ > 0,7 | 420<br><br>350<br>340 | <br>0,15<br><br> | 0,20<br><br>0,35<br>0,45 | <br>0,2<br><br> |
| То же резцами с дополнительным лезвием | Т15К6* | $S \le t$<br>$S > t$ | 292 | 0,30<br>0,15 | 0,15<br>0,30 | 0,18 |
| Отрезание | Т5К10*<br>Р18** | – | 47<br>23,7 | <br>– | 0,80<br>0,66 | 0,20<br>0,25 |
| Фасонное точение | Р18** | | 22,7 | – | 0,50 | 0,30 |
| Нарезание крепежной резьбы | Т15К6 | – | 244 | 0,23 | 0,30 | 0,20 |
| | Р6М5 | Черновые ходы:<br>$P \le$ 2мм<br>> 2мм | <br>14,8<br>30 | <br>0,70<br>0,60 | <br>0,30<br>0,25 | <br>0,11<br>0,08 |
| | | Чистовые ходы | 41,8 | 0,45 | 0,30 | 0,13 |
| Вихревое нарезание резьбы | Т15К6* | – | 2330 | 0,50 | 0,50 | 0,50 |
| *Обработка серого чугуна,НВ* 190 | | | | | | |
| Наружное продольное точение проходными резцами | ВК6* | $S \le$ 0,40<br>$S$ > 0,4 | 292<br>243 | <br>0,15 | 0,20<br>0,40 | <br>0,20 |
| Наружное продольное точение резцами с дополнительным лезвием | ВК6* | $S \le t$<br>$S > t$ | 324<br>324 | 0,40<br>0,20 | 0,20<br>0,40 | 0,28<br>0,28 |
| Отрезание | ВК6* | – | 68,5 | – | 0,40 | 0,20 |
| Нарезание крепежной резьбы | | | 83 | 0,45 | – | 0,33 |
| *Обработка ковкого чугуна, НВ 150* | | | | | | |
| Наружное продольное точение проходными резцами | ВК8* | $S \le$ 0,40<br>$S$ > 0,40 | 317<br>215 | 0,15<br>0,15 | 0,20<br>0,45 | 0,20<br>0,20 |
| Отрезание | ВК6* | – | 86 | – | 0,4 | 0,20 |

*Без охлаждения.

** С охлаждением.

**Примечания:** 1. При внутренней обработке (растачивании, прорезании канавок в отверстиях, внутреннем фасонном точении) принимать скорость резания, равную скорости резания для наружной обработки с введением поправочного коэффициента 0,9.

2. При обработке без охлаждения конструкционных и жаропрочных сталей и стальных отливок резцами из быстрорежущей стали вводить поправочный коэффициент на скорость резания 0,8.

3. При отрезании и прорезании с охлаждением резцами из твёрдого сплава Т15К6 конструкционных сталей и стальных отливок вводить на скорость резания поправочный коэффициент 1,4.

4. При фасонном точении глубокого и сложного профиля на скорость резания вводить поправочный коэффициент 0,85.

5. При обработке резцами из быстрорежущей стали термообработанных сталей скорость резания для соответствующей стали уменьшать, вводя поправочный коэффициент 0,95 – при нормализации, 0,9 – при отжиге, 0,8 – при улучшении.

6. Подача *S* в мм /об.

Таблица П1.8

## Режимы резания при тонком точении и растачивании

| Обрабатываемый материал | Материал режущей части | Параметр шероховатости поверхности *Ra*, мкм | Подача, мм /об | Скорость резания, мм /мин |
|---|---|---|---|---|
| Сталь $\sigma_в < 650$МПа<br>$\sigma_в = 650 \div 800$МПа<br>$\sigma_в > 800$МПа | Т30К4 | 1,25 – 0,63 | 0,06 – 0,12 | 250 – 300<br>150 – 200<br>120 – 170 |
| Чугун: *НВ* 149 – 163<br>*НВ* 156 – 229<br>*НВ* 170 – 241 | ВК3 | 2,5 – 1,25 | | 150 – 200<br>120 – 150<br>100 – 120 |

**Примечание**:

1. Глубина резания 0,1 – 0,15 мм.

2. Предварительный проход с глубиной резания 0,4 мм улучшает геометрическую форму обработанной поверхности.

3. Меньшие значения параметра шероховатости поверхности соответствуют меньшим подачам.

## ЛИТЕРАТУРА.


1. Справочник инструментальщика, М. Машиностроение, 1987. 846 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя, т.2. М: Машиностроение. 1986. 496 с.

   Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Суслова. – М.: Машиностроение –1. 2001. – 944 с.
3. Обработка металлов резанием: Справочник технолога./А. А. Панов, В. В. Аникин, Н. Г. Бойм и др.; Под общ. ред. А. А. Панова.– М.: Машиностроение . 1988. – 736 с.: ил.

# 2.РАБОТА. ВЫБОР И ИЗУЧЕНИЕ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

## 2.1.Общие сведения.

Обработка металлов режущими инструментами на станках при изготовлении деталей, запчастей и производстве ремонтов является трудоемким процессом. От того, насколько правильно выбран набор металлорежущего инструмента, подобран соответствующий станок, в значительной степени зависит и точность обработки, и себестоимость детали.

Оптимизация процесса резания предполагает назначение величины углов заточки инструмента в зависимости от конкретных свойств обрабатываемого материала с учетом прочностных свойств инструментального материала и схемой обработки.

При назначении элементов режимов резания учитывают характер обработки, тип и размеры инструмента, материал его режущей части, материал и состояние заготовки, тип оборудования.

Элементы режима резания обычно устанавливаются в порядке, указанном ниже.

*Глубину резания* ***t***, мм: при черновой обработке назначают, по возможности, максимальную, равную всему припуску на обработку или большей его части (при дальнейшей чистовой обработке); при чистовой обработке – в зависимости от шероховатости обрабатываемой поверхности.

*Число ходов* ***i***, назначается больше одного, если величина припуска превышает допустимую глубину резания ***t***.

*Подача* ***S***, мм/об: при черновой обработке выбирают максимально возможную подачу, учитывая жесткость и прочность системы СПИД, эффективную мощность станка; при чистовой обработке – в зависимости от шероховатости обрабатываемой поверхности.

*Скорость резания* ***V***, м/мин: рассчитывается по эмпирическим формулам, установленным для каждого вида обработки, или принимается по справочным таблицам [1].

## 2.2. Выполнение работы.

### 2.2.1.Цель работы.

Научиться правильно выбирать инструмент, металлорежущий станок, режимы резания для обработки заданной детали.

### 2.2.2.Задание по работе.

Получив от преподавателя эскиз детали, с указанием поверхности, подлежащей обработке, необходимо установить тип и вид инструмента, необходимый для обработки; подобрать по размерам детали и инструмента станок; выбрать оптимальные режимы резания и рассчитать основное технологическое время – $T_O$.

### 2.2.3.Ход работы.

2.2.3.1. По размерам, конфигурации и виду обрабатываемой поверхности, пользуясь предложенной литературой, подобрать тип, вид и размеры режущего инструмента.
2.2.3.2. Исходя из материала обрабатываемой детали, вида и условий обработки установить оптимальную геометрию режущей части инструмента [2], [3].
2.2.3.3. Начертить эскиз режущего инструмента, используя типовые примеры, приведенные в альбоме [3]. На эскизе указать размеры инструмента и геометрию режущей части, материал режущей части.
2.2.3.4. Руководствуясь размерами детали и режущего инструмента, используя справочник технолога – машиностроителя [2], подобрать конкретный металлорежущий станок. Дать полную расшифровку модели станка. Ознакомиться с устройством данного станка [4] или, станка такого типа, с его технологическими возможностями.
2.2.3.5. Начертить схему обработки детали, выбранным инструментом, показать взаимное их положение при обработке, стрелками показать движения резания и подачи, вспомогательные движения.
2.2.3.6. Выбрать режим обработки [2]; выбранные значения сверить с данными станка. Рассчитать основное технологическое время на обработку заданной поверхности (или поверхностей) [1]. Полученные данные свести в табл.2.1. Допускается скорость резания не рассчитывать, а принимать рекомендуемую по таблицам [1].

## 2.3. Оформление отчета

Эскиз инструмента и схема обработки вычерчиваются на специальном бланке. Ответы на контрольные вопросы даются устно, либо, по указанию преподавателя, письменно.

Таблица 2.1

**Режимы резания для обработки заданной детали**

| Поверхность | Диаметр, мм | Длина, мм | ***t***, мм | ***S*** * | ***n***, об /мин | ***V***, м /мин | $T_O$, мин |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | |

* – размерность подачи в зависимости от способа обработки.

## 2.4. Характеристика методов обработки металлов.

**2.4.1. Сверление** – процесс получения сквозных и глухих отверстий в сплошном материале на сверлильных, токарных, револьверных, расточных, агрегатных и других станках. Точность изготовления отверстий при сверлении – 4 – 5-й класс. Отверстия более высокой точности получают после сверления растачиванием, зенкерованием или развёртыванием.
Главное движение при сверлении – вращательное, движение подачи – поступательное. При работе на сверлильных станках оба движения осуществляет сверло, при работе на других станках вращение совершает обрабатываемая заготовка, поступательное осевое движение – сверло.

Производительность сверления характеризуется основным технологическим временем: $T_O = L / (n \times S)$ мин, где $L$ – длина прохода сверла в мм в направлении подачи.

**Зенкерование** – способ обработки поверхностей отверстий, предварительно просверлённых, полученных горячей или холодной штамповкой и литьём. Зенкерование. применяют при обработке цилиндрических отверстий, углублений под головки или шейки болтов и винтов, торцевых поверхностей бобышек под шайбы, упорные кольца и т. п. Зенкерование является также промежуточной операцией после сверления перед развёртыванием. Повышает точность и чистоту поверхности, т. к. зенкер в отличие от сверла, имеет больше режущих кромок. Отверстие, полученное зенкерованием, имеет более точное ,по сравнению со сверлёным, направление оси, поэтому зенкерование широко применяют при чистовой и получистовой обработке. Зенкерование выполняется на сверлильных, револьверных и расточных станках.

При обработке отверстий используют различные виды осевого инструмента.

Последовательность и число выполняемых ими операций зависят от требуемой точности отверстия, его диаметра, шероховатости поверхности, а также от того, обрабатывается отверстие в сплошном материале или полученное в литой или штампованной заготовке (табл.2.2 и 2.3).

**Развёртывание** – одна из разновидностей обработки отверстий резанием (после сверления и зенкерования) многолезвийным режущим инструментом – развёрткой. В результате чернового развёртывания снимается припуск на обработку **не более 0,5 мм на диаметр**, обеспечиваются шероховатость поверхности 7-го класса, точность 3-го класса. **При чистовом развёртывании снимается припуск не более 0,2 мм**; шероховатость – до 9-го класса, точность – до 2-го.

Развёртывание, одна из разновидностей обработки отверстий резанием (после сверления и зенкерования) многолезвийным режущим инструментом – развёрткой. В результате чернового развёртывания снимается припуск на обработку не более 0,5 мм на диаметр, обеспечиваются шероховатость поверхности 7-го класса, точность 3-го класса. **При чистовом развёртывании снимается припуск не более 0,2 мм**; шероховатость – до 9-го класса, точность – до 2-го.

Число зубьев ***z*** разверток зависит от их конструкции (для стандартных разверток оно приводится в соответствующих ГОСТах), для конструкций, аналогичных стандартным, число зубьев можно принять равным стандартному или определить по графикам на (рис. 2.1).

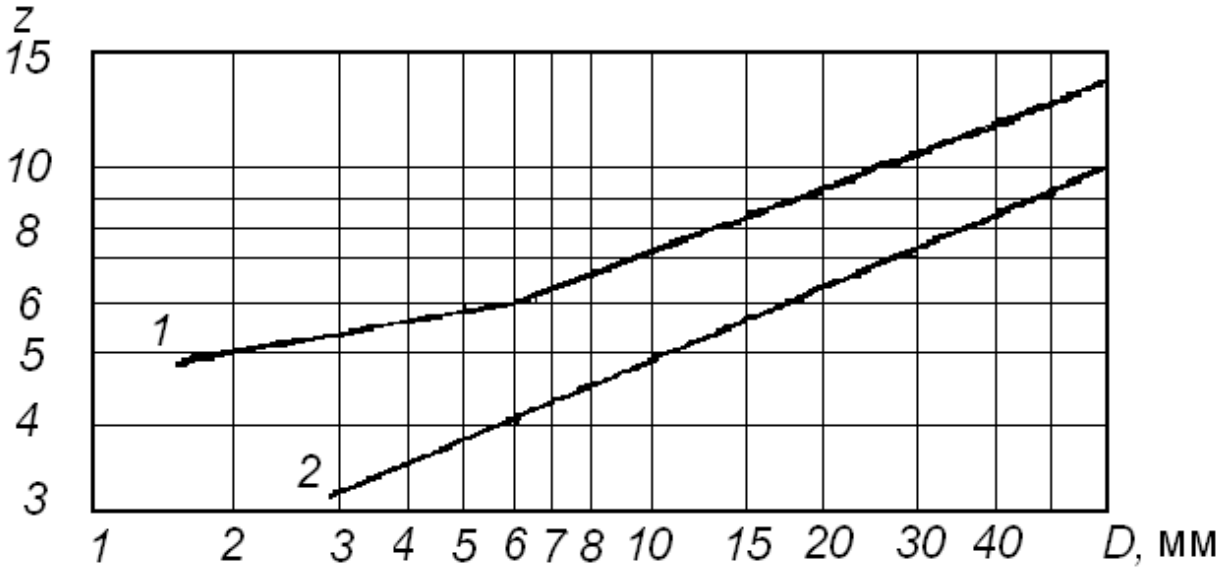



Рис. 2.1. Зависимость числа зубьев развертки от диаметра обработки:
*1* – для разверток из быстрорежущей стали;
*2* – для разверток, оснащенных твердым сплавом

**Режим резания при сверлении.**

**Глубина резания**. При сверлении глубина резания $t = 0{,}5D$ (рис. 2.2, *а*), при рассверливании; зенкеровании и развертывании $t = 0{,}5\ (D - d)$ (рис. 2.2, *б*). При зенкеровании глубина резания *t* принимается в зависимости от диаметра *D*.

| *D*, мм | до 18 | 18 – 30 | 30 – 50 | 50 – 80 | 80 – 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| 2*t*,мм | 2,5 – 3,5 | 4 – 4,5 | 5,5 – 8 | 7 – 10 | 8 – 10 |

При развёртывании глубина резания *t* принимается в зависимости от диаметра $t = 0{,}15 \div 0{,}5$, мм.

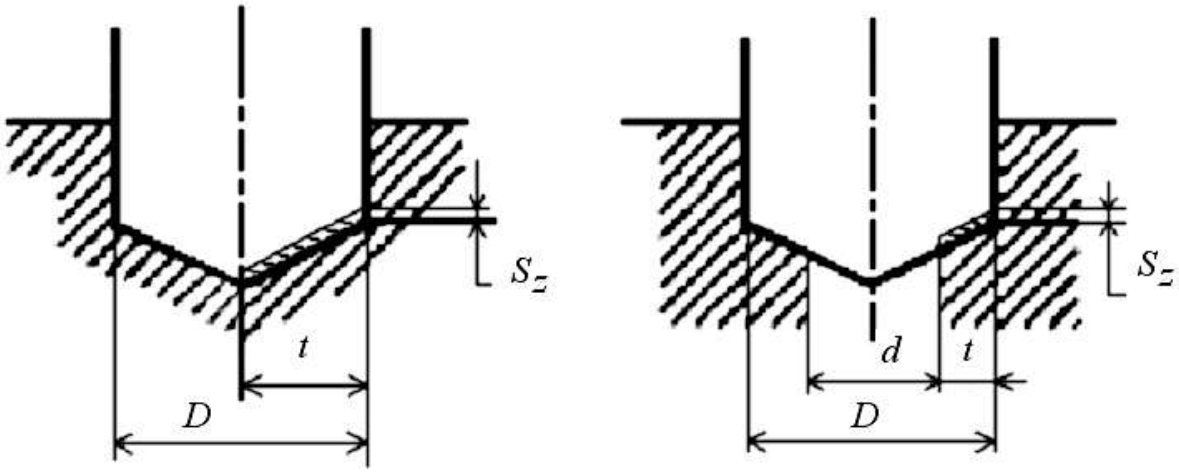
**Подача.** При сверлении отверстий выбираем подачу по табл.2.6. При рассверливании отверстий подача, рекомендованная для сверления, может быть увеличена до 2 раз (табл.2.15). При наличии ограничивающих факторов подачи при сверлении и рассверливании равны. Их определяют умножением табличного значения подачи на соответствующий поправочный коэффициент, приведенный в примечании к таблице.

Подачи при зенкеровании и развертывании приведены в (табл.2.6).

Таблица 2.2.

**Качество отработанной поверхности отверстий**

| Способ обработки | Диаметр отверстия | Квалитет | *Rz*, мкм | Глубина наружного слоя, мкм |
|---|---|---|---|---|
| Сверление спиральными сверлами | 3 – 6<br>св. 6 до 10<br>>> 10 >> 18<br>>> 18 >> 50 | 12 – 13 | 20 – 10<br>40 – 20<br>80 – 40 | 40<br>50<br>60<br>70 |
| Зенкерование черновое | 18 – 30<br>св. 30 до 80<br>до 80 | 11 | 80 – 40 | 40<br>50<br>– |
| однократное | до 30<br>св. 30 до 80 | 10 – 11 | 40 – 20 | 30<br>40 |
| Развертывание: черновое<br>чистовое | 6 – 8 | 10<br>6 – 7 | 10 – 6,3<br>6,3 – 3,2 | – |




*а)* *б)*

Рис. 2.2. Схема резания при сверлении.

Таблица 2.3.

**Последовательность обработки отверстий с использованием сверления, зенкерования и развёртывания**

| Квалитет | Шероховатость поверхности, мкм | Обработка отверстий | |
|---|---|---|---|
| | | в сплошном материале | полученных литьём или штампованной |
| 12 – 13 | *Rz* = 80 – 20 | сверление без кондуктора | зенкерование |
| 11 | *Rz* = 40 – 20 | Диаметром до 30 мм – сверлить одним сверлом по кондуктору или сверление и зенкерование. Диаметром более 30 мм – сверление и зенкерование | Зенкерование (двукратное) |
| 8 – 10 | *Ra* = 2,5 – 2,0 | Диаметром до 20 мм встали и диаметром до 25 мм в чугуне – сверление и развёртывание, Диаметром более 20 мм в стали и более 25 мм в чугуне – сверление зенкерование и развёртывание. | Зенкерование (одно- или двукратное) и развёртывание (однократное) |
| 7 – 8 | *Ra* = 2,5 – 0,63 | Диаметром до 12 мм – сверление, развёртывание (одно- или двукратное). Диаметром более12 мм – сверление, зенкерование, развёртывание (одно- или двукратное) | Зенкерование (одно- или двукратное) и развёртывание (одно- или двукратное) |

**Скорость резания**. Скорость резания, м /мин, при сверлении

$$V = \frac{C_v D^q}{T^m S^y} K_v,$$

а при рассверливании, зенкеровании, развертывании

$$V = \frac{C_v D^q}{T^m t^x S^y} K_v.$$

Значения коэффициентов $C_V$ и показателей степени приведены для сверления в табл.П2.2.1, для рассверливания, зенкерования и развертывания – в табл. П2.2.2, а значения периода стойкости $T$ – в табл. 2.4.

Скорость резания также может быть определена по таблицам [1]

$$V = V_{\text{ТБ}} \cdot K_V,$$

где $V_{\text{ТБ}}$ – скорость резания, определяемая по табл.2.7;

$K_V$ – поправочный коэффициент, учитывающий конкретные значения условий резания: механические свойства обрабатываемого материала, состояние заготовки, материала инструмента и т.п.

Общий поправочный коэффициент на скорость резания, учитывающий фактические условия резания, $K_v = K_{\text{М}V} K_{\text{И}V} K_{lV}$,

где $K_{\text{М}V}$ – коэффициент, учитывающий обрабатываемый материал см. табл.1.7, 2.8, 2.12, 2.20, 2.22;

$K_{\text{И}V}$ – коэффициент, учитывающий инструментальный материал см. табл.1.8;

$K_{lV}$ – коэффициент, учитывающий глубину сверления табл. 2.10 и 2.14.

При рассверливании и зенкеровании литых или штампованных отверстий вводится дополнительно поправочный коэффициент $K_{\text{пv}}$ (табл. 1.9).

Основное технологическое время при сверлении:

$$T_{\text{о}} = \frac{L}{n \cdot S_{\text{о}}} \cdot; L = l + l_1 + l_2,$$

где $L$ – общая длина рабочего хода инструмента. $l_1$ и $l_2$ см. табл.П2.2.4.

Таблица 2.4

**Средние значения периода стойкости сверл, зенкеров и разверток**

| Инструмент (операция) | Обрабатываемый материал | Материал режущей части инструмента | Стойкость *T*, мин, при диаметре инструмента, мм | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | До 5 | 6–10 | 11–20 | 21–3 | 31–40 | 41–50 | 51–60 | 61–80 |
| Сверло (сверление и рассверливание) | Конструкционная углеродистая и легированная сталь | Быстрорежущая сталь | 15 | 25 | 45 | 50 | 70 | 90 | 110 | – |
| | | Твердый сплав | 8 | 15 | 20 | 25 | 35 | 45 | – | – |
| | Коррозионно-стойкая сталь | Быстрорежущая сталь | 6 | 8 | 15 | 25 | – | – | – | – |
| Сверло (сверление и рассверливание) | Серый и ковкий чугун, медные и алюминиевые сплавы | Быстрорежущая сталь | 20 | 35 | 60 | 75 | 105 | 140 | 170 | – |
| | | Твердый сплав | 15 | 25 | 45 | 50 | 70 | 90 | – | |
| Зенкеры (зенкерование) | Конструкционная углеродистая и легированная сталь, серый и ковкий чугун | Быстрорежущая сталь и твердый сплав | – | – | 30 | 40 | 50 | 60 | 80 | 100 |
| Развертки (развертывание) | Конструкционная углеродистая и легированная сталь | Быстрорежущая сталь | – | 25 | 40 | 80 | 80 | 120 | 120 | 120 |
| | | Твердый сплав | – | 20 | 30 | 50 | 70 | 90 | 110 | 140 |
| | Серый и ковкий чугун | Быстрорежущая сталь | – | – | 60 | 120 | 120 | 180 | 180 | 180 |
| | | Твердый сплав | – | – | 45 | 75 | 105 | 135 | 165 | 210 |

## Рекомендуемые режимы резания при сверлении деталей из стали, алюминиевых сплавов и чугуна

Таблица 2.5

### Рекомендуемые группы подач при обработке отверстий в зависимости от условий обработки

| Вид обработки | Условия обработки | Группа подач |
|---|---|---|
| Сверление | Сверление сверлами из быстрорежущей стали с точностью не выше 12-го квалитета | I |
| | Сверление сверлами из быстрорежущей стали пониженной жесткости системы приспособление – деталь, сверление твердосплавными сверлами с точностью не выше 12-го квалитета | II |
| | Сверление под чистовое зенкерование или развертывание, под нарезание резьбы, наклонных отверстий и т. п. | III |
| Зенкерование | Черновое зенкерование | I |
| | Зенкерование с точностью не выше 12-го квалитета под нарезание резьбы и под следующее развертывание черновой разверткой | II |
| | Зенкерование с точностью по 11-му квалитету и под чистовое развертывание | III |
| Развертывание | Черновое развертывание под чистовое | I |
| | Однократное развертывание или после чернового развертывания | II |

Таблица 2.6

**Подачи $S_O^*$, мм /об, при обработке отверстий в деталях из стали, чугуна и алюминиевых сплавов**

| Вид обработки | | Группа подач | $d$, мм | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 2, 5 | 4 | 6 | 10 | 12 | 16 | 20 | 25 | 32 | 40 | 60 |
| **При обработке отверстий в стальных деталях** | | | | | | | | | | | | | |
| Сверление при отношении $\frac{L_{рез}}{d}$ | $\leq 3$ | I | 0,04 | 0,08 | 0,12 | 0,16 | 0,22 | 0,28 | 0,32 | 0,4 | 0,45 | | |
| | $4 \div 8$ | | 0,03 | 0,06 | 0,1 | 0,14 | 0,18 | 0,22 | 0,28 | 0,32 | 0,36 | | |
| | $> 8$ | II | | | 0,09 | 0,12 | 0,15 | 0,18 | 0,22 | 0,25 | 0,3 | | |
| | | III | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,11 | 0,14 | 0,16 | 0,18 | 0,2 | | |
| Зенкерование | | I | – | | | 0,4 | 0,45 | 0,5 | 0,6 | 0,65 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
| | | II | | | | 0,3 | 0,32 | 0,35 | 0,4 | 0,45 | 0,5 | 0,6 | 0,7 |
| | | III | | | | 0,25 | 0,27 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,45 | 0,5 | 0,6 |
| Развертывание | | I | – | | | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,9 | 1, 0 | 1, 1 | 1,3 | 1,5 |
| | | II | | | | 0,35 | 0,45 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 1,0 | 1,1 |
| Цекование при разности диаметров, мм | 5 | – | – | | | – | | 0,2 | 0,25 | 0,28 | 0,3 | 0,35 | 0,4 |
| | 10 | | | | | | | | | 0,25 | 0,27 | 0,3 | 0,32 |
| | 20 | | | | | | | | | | | 0,2 | 0,25 |
| | 30 | | – | | | | | | | | | | 0,12 |
| Зенкование | | | | | | – | 0,06 | 0,08 | 0,1 | 0,13 | 0,15 | 0,18 | 0,25 |
| **При обработке отверстий в чугунных деталях** | | | | | | | | | | | | | |
| Сверление при отношении $\frac{L_{рез}}{d}$ | $\leq 8$ | I | 0,06 | 0,12 | 0,18 | 0,24 | 0,3 | 0,35 | 0,45 | 0,5 | 0,55 | 0,6 | |
| | $4 – 8$ | | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,45 | 0,5 | |
| | $\leq 8$ | II | 0,04 | 0,08 | 0,1 | 0,12 | 0,16 | 0,18 | 0,22 | 0,25 | 0,3 | | |
| | $\leq 8$ | III | 0,03 | 0,06 | 0,08 | 0,09 | 0,12 | 0,15 | 0,16 | 0,18 | 0,22 | | |
| Зенкерование | | I | | | | 0,4 | 0,45 | 0,5 | 0,55 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
| | | II | | | | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,45 | 0,5 | 0,55 | 0,6 | 0,65 |
| | | III | | | | 0,25 | 0,28 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,45 | 0,5 | 0,55 |
| Развертывание | | I | | | | | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,5 | 1,8 | 2,1 |
| | | II | | | | | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,2 | 1,4 |
| Цекование Зенкование | | | | | | | 0,23 | 0,25 | 0,78 | 0,30 | 0,33 | 0,35 | 0,4 |
| | | | | | | | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 |

Окончание табл. 2.6

| Вид обработки | | Группа подач | $d$, мм | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 2,5 | 4 | 6 | 10 | 12 | 16 | 20 | 25 | 32 | 40 | 60 |
| **При обработке отверстий в деталях из алюминиевых сплавов** | | | | | | | | | | | | | |
| Сверление, при отношении $\frac{L_{рез}}{d}$ | $\leq 3$ | I | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,85 | 1,0 | |
| | $4 \div 8$ | II | 0,08 | 0,25 | 0,27 | 0,3 | 0,4 | 0,45 | 0,5 | 0,6 | 0,65 | 0,75 | |
| | $< 8$ | III | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,45 | 0,5 | |
| Зенкерование | | I<br>II<br>III | | | | | – | 0,6<br>0,5<br>0,3 | 0,8<br>0,6<br>0,4 | 1,1<br>0,9<br>0,6 | 1,3<br>1,0<br>0,7 | 1,5<br>1,1<br>0,8 | 1,7<br>1,3<br>0,9 |
| Развертывание | | I<br>II | | | | | 0,6<br>0,4 | 07<br>0,45 | 08<br>0,5 | 09<br>0,6 | 1 0<br>0,65 | 1,1<br>0,7 | 1,3<br>0,9 |

* При *HB* < 229 для стали и *HB* 200 для чугуна табличную подачу на оборот инструмента принимать с коэффициентом 1,2, а при *HB* > 229 для стали и *HB* > 240 для чугуна – 0,8. При зенкеровании и развертывании глухих отверстий принимать $S_o$ не более 0,5 мм / об. Для отверстий с точностью по 7-му квалитету и *Ra* = 1,6 мкм подачи уменьшать на 50% по сравнению с указанными в таблице. Для твердосплавных разверток подачу принимать с коэффициентом 0,7.

Таблица 2.7

**Скорость резания *V*, м/мин при обработке отверстий в стальных деталях**

| $S_O$, мм /об, до | Сверление | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $d$, мм, не более | | | | | | |
| | 2,4 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 16 |
| 0,06 | 17/39 | 22/54 | 26/68 | 30/75 | 33/86 | 36/98 | 42/115 |
| 0,1 | | 17/44 | 20/56 | 23/62 | 26/74 | 28/82 | 32/96 |
| 0,15 | | | 18/48 | 20/52 | 22/60 | 24/72 | 27/80 |
| 0,2 | | | 15/42 | 17/46 | 18/50 | 20/56 | 23/64 |
| 0,3 | | | | 14/37 | 16/42 | 17/46 | 19/51 |
| 0,4 | | | | | | 14/37 | 16/42 |

окончание табл. 2.7

| $S_o$, мм /об, до | Сверление | | | | Зенкерование | | | Цекование и зенкование |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $d$, мм, не более | | | | | | | |
| | 20 | 25 | 32 | 40 | 20 | 40 | > 40 | |
| 0,06 | - | - | - | - | - | - | | 22/54 |
| 0,1 | 38/112 | | | | 46/116 | | | 22/52 |
| 0,15<br>0,2 | 30/92<br>25/72 | 33/98<br>27/78 | 35/105<br>30/84 | 40/110<br>33/92 | 38/92<br>33/78 | 38/92 | 43/104 | 20/50<br>18/48 |
| 0,3<br>0,4<br>0,6 | 21/56<br>18/46<br>14/37 | 23/62<br>19/52<br>15/40 | 25/68<br>21/56<br>17/45 | 28/74<br>22/62<br>19/50 | 26/68<br>23/60<br>20/54 | 30/78<br>26/68<br>22/60 | 35/88<br>30/78<br>24/65 | 17/45<br>16/42<br>14/40 |
| 0,8 | – | | – | 15/40 | 16/45 | 19/52 | 21/58 | – |
| 1,0 | | | | – | | 17/45 | 19/50 | |

Примечание. В числителе приведены скорости резания при обработке инструментом из быстрорежущей стали, в знаменателе – из твердого сплава.

## Поправочные коэффициенты на скорость резания

Таблица 2.8

### Коэффициент $k_{MV}$ в зависимости от характеристики обрабатываемого материала

| Марка обрабатываемой стали | | 30, 35, 40 | | | 45, 50 | | | 30Х, 35Х, 40Х | | | 30ХГТ | 35ХГС | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *НВ* | | 207 | 229 | 259 | 229 | 269 | 302 | 207 | 255 | 332 | 197 | 241 | 321 |
| Материал рабочей части режущего инструмента | Быстрорежущая сталь | 1,3 | 1,1 | 0,9 | 1.0 | 0,9 | 0,7 | 1,0 | 0,8 | 0,6 | 0,7 | 0,6 | 0,5 |
| | Твердый сплав | 1,2 | 1,0 | | | | 0,8 | | 0,9 | 0,7 | 0,95 | 0,8 | 0,7 |

Таблица 2.9

### Коэффициент $k_{TV}$ в зависимости от периода стойкости инструмента

| Инструмент | Материал рабочей части | Период стойкости *T*, мин |
|---|---|---|

| | режущего инструмента | ≤ 15 | 30 | 60 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 400 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Сверла, зенкеры, цековки | Быстрорежущая сталь | 1,5 | 1,3 | 1,1 | 1,0 | 0,9 | | 0,8 | 0,75 | 0,65 |
| Сверла, зенкеры, | Твердый сплав | 1,6 | 1,35 | 1,15 | | 0,85 | | | | |

Таблица 2.10

**Коэффициент $k_{lV}$ в зависимости от глубины обработки**

| Инструмент | Отношение длины резания к диаметру | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ≤ 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 |
| Сверла | 1 | 0,85 | 0,75 | 0,7 | 0,8 | 0,5 |
| Зенкеры | 1 | 0,9 | 0,85 | 0,8 | 0,75 | 0,7 |

* При сверлении инструментом с двойной заточкой табличные значения скорости резания увеличивать на 10 – 15 %.

Таблица 2.11

**Скорость резания *V*, м/мин при обработке отверстий в чугунных деталях**

| $S_O$, мм /об, не более | Сверление | | | | | | | | | | | Зенкерование | | | Цекование и зенкование |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2,5 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 16 | 20 | 25 | 32 | 40 | 20 | 40 | > 40 | |
| 0,06 | 21 | 24 | 27 | 30 | 32 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 23 |
| 0,1 | – | 21 | 23 | 25 | 26 | 28 | 30 | 31 | 33 | | | 45 | | | 23 |
| 0,15 | | 17 | 19 | 20 | 22 | 23 | 25 | 26 | 28 | 30 | 32 | 39 | 43 | 41 36 | 22 |
| 0,2 | | | 17 | 18 | 19 | 20 | 22 | 23 | 24 | 26 | 28 25 | 35 31 | 38 | 32 | 21 |
| 0,3 | | | 15 | 16 | 17 | 18 | 20 | 21 | 22 | 24 | 22 | 27 | 24 | 27 | 20 |
| 0,4 | | | | | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 21 | 20 | 23 | 30 | 24 | 19 |
| 0,6 | | – | – | – | | | 15 | 16 | 17 | 18 | 16 | 21 | 25 | | 18 |
| 0,8 | | | | | – | – | | | | 15 | | | 23 | | |
| | | | | | | | | – | | | | | | | – |

Примечание. При сверлении и зенкеровании твердосплавным инструментом скорости резания увеличивать в 2,5 раза, при цековании – в 2 раза.

## Поправочные коэффициенты на скорость резания

Таблица 2.12

**Коэффициент $k_{MV}$ в зависимости от характеристики обрабатываемого металла**

| *HB* | 143 – 207 | 163 – 229 | 170 – 241 | Св. 241 |
|---|---|---|---|---|
| $k_{MV}$ | 1,15 | 1,0 | 0,9 | 0,8 |

Таблица 2.13

**Коэффициент $k_{Tv}$ в зависимости от периода стойкости инструмента $T_M$**

| Инструмент | Материал рабочей части режущего инструмента | $T_M$, мин | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 30 | 60 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 400 | 600 |
| Сверла и зенкеры | Быстро-режущая сталь | 1,2 | 1,1 | 1,0 | 0,95 | 0,95 | 0,9 | 0,85 | 0,8 | 0,7 |
| | Твердый сплав | 1,65 | 1,25 | | 0,85 | 0,75 | 0,7 | 0,65 | 0,55 | 0,5 |
| Цековки и зенкеры | Быстро-режущая сталь | 1,4 | 1,15 | | 0,9 | 0,85 | 0,8 | 0,75 | 0,7 | 0,65 |
| | Твердый сплав | 1,5 | 1,2 | | 0,9 | 0,8 | 0,75 | 0,7 | 0,65 | 0,55 |

Таблица 2.14

**Коэффициент $k_{lV}$ в зависимости от глубины обработки**

| Инструмент | Отношение длины резания к диаметру | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ≤ 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 |
| Сверла и зенкеры | 1 | 0,85<br>0,9 | 0,75<br>0,85 | 0,7<br>0,8 | 0,8<br>0,75 | 0,5<br>0,7 |

## Рекомендуемые режимы резания при рассверливании деталей из стали, алюминиевых сплавов и чугуна

Таблица 2.15

**Подача $S_O$, мм /об**

| Диаметр рассвер- | Диаметр про-свер- | Материал деталей | |
|---|---|---|---|
| | | Сталь и алюминиевые сплавы | Чугуны |
| | | Группа подач | |

| ливания, мм | ленного отвер- | I | II | III | I | II | III |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 30 | 10<br>15 | 0,4 - 0,65 | 0,3 - 0,4 | 0,2 - 0,3 | 0,5 - 0,65<br>0,6 - 0,7 | 0,4 - 0,5 | 0,25 - 0,35 |
| 40 | 20<br>15 | 0,45 - 0,7 | 0,35-0,45<br>0,3 -0,4 | 0,3 - 0,4<br>0,2 -0,3 | 0,65 - 0,75<br>0,6 -0,7 | 0,45 - 0,55<br>0,35 -0,45 | 0,35 - 0,45<br>0,25 - 0,35 |
| 50 | 20<br>30<br>20<br>30<br>40 | 0,5 - 0,75<br>0,6 - 0,8<br>0,4 - 0,65<br>0,5 - 0,7<br>0,6 - 0,8 | 0,35-0,45<br>0,4 - 0,5<br>0,35-0,45<br>0,4-0,5<br>0,45-0,55 | 0,3- 0,4<br>0,4 -0,5 | 0,65 - 0,75<br>0,6 - 0,7<br>0,7 - 0,8 | 0,4 - 0,55<br>0,45 - 0,6<br>0,4 - 0,5<br>0,45 - 0,55<br>0,5 - 0,6 | 0,35 - 0,45<br>0,45 - 0,6 |
| 60 | 30<br>40<br>50 | 0,45-0,65<br>0,5 - 0,7 | 0,4-0,5<br>0,45-0,55 | 0,3 - 0,4<br>0,4 - 0,5 | 0,6 - 0,7<br>0,8 - 0,9<br>0,9 - 1,0 | 0,45 - 0,6<br>0,55 - 0,65 | 0,35 - 0,45<br>0,4 - 0,5<br>0,5 - 0,6 |

I группа подач применяется при рассверливании отверстий в жестких деталях с точностью до 12-го квалитета; II группа – соответственно в нежёстких деталях под последующую обработку несколькими инструментами; III группа – под последующую обработку одним зенкером или одной разверткой

Таблица 2.16

**Скорость резания *V*, м/мин.**

| Диаметр рассверливания *D*, мм | Диаметр просверленного отверстия *d*, мм | Материал деталей | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Сталь | | | | Серый чугун | | | | | | Алюминиевые сплавы | | |
| | | $S_O$, мм/об, не более | | | | | | | | | | | | |
| | | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 0,3 | 0,5 | 0,8 |
| 30 | 10 | 30 | 26 | 24 | 20 | 37 | 32 | 29 | 24 | 22 | | 132 | 78 | 60 |
| | 15 | 31 | 27 | 25 | 22 | 39 | 33 | 30 | 25 | 23 | | 140 | 81 | 65 |
| | 20 | 33 | 30 | 27 | 23 | 41 | 35 | 31 | 27 | 24 | | 160 | 90 | 70 |

окончание табл. 2.16

| Диаметр рассверливания *D*, мм | Диаметр просверленного отверстия *d*, мм | Материал деталей | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Сталь | | | | Серый чугун | | | | | | Алюминиевые сплавы | | |
| | | $S_O$, мм/об, не более | | | | | | | | | | | | |
| | | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 0,3 | 0,5 | 0,8 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 40 | 15<br>20<br>30 | 27<br>30<br>35 | 24<br>27<br>31 | 22<br>25<br>28 | 19<br>21<br>24 | – | 32<br>34<br>36 | 30<br>31<br>32 | 25<br>26<br>27 | 22<br>23<br>25 | – | 95<br>105<br>120 | 72<br>80<br>93 | 57<br>63<br>72 |
| 50 | 20<br>30<br>40 | 27<br>29<br>33 | 24<br>26<br>30 | 22<br>23<br>27 | 19<br>20<br>23 | | 31<br>32<br>34 | 27<br>29<br>31 | 23<br>24<br>26 | 21<br>22<br>24 | | 90<br>100<br>112 | 72<br>78<br>90 | 57<br>60<br>70 |
| 60 | 30<br>40<br>50 | 78<br>30<br>33 | 27<br>31 | 71<br>24<br>25 | 19<br>21<br>24 | | –<br>– | 28<br>29<br>31 | 24<br>25<br>26 | 21<br>22<br>24 | 20<br>21 | 95<br>105<br>120 | 75<br>82<br>95 | 57<br>63<br>72 |

Примечание. При рассверливании отверстий твердосплавными сверлами скорость резания увеличивать в 2 раза.

## Поправочные коэффициенты на скорость резания

Таблица 2.17

**Коэффициент $k_{TV}$ в зависимости от стойкости инструмента**

| Материал инструмента | Период стойкости $T_м$, мин | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30. | 60 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 400 | 600 | 800 | 1000. |
| Быстрорежущая сталь | 1,2 | 1,1 | 1,0 | 0,95 | 0,95 | 0,9 | 0,85 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,5 |
| Твердый сплав | 1,65 | 1,25 | | 0,85 | 0,75 | 0,7 | 0,65 | 0,55 | 0,5 | 0,45 | 0,4 |

Таблица 2.18

**Коэффициент $k_{MV}$ в зависимости от характеристики обрабатываемого металла**

| *HB* | 143 – 207 | 163 – 229 | 170 – 241 | > 241 |
|---|---|---|---|---|
| $k_{MV}$ | 1,15 | 1,0 | 0,9 | 0,8 |

Таблица 2.19

**Скорость резания при развертывании отверстий в стальных деталях**

| Квалитет | Параметр шероховатости, *Ra*, мкм | *V*, м /мин |
|---|---|---|
| 7 - 8 | 1,6<br>3,2 | 2 – 4<br>4 – 6 |
| 9 - 10 | 3,2<br>6,3 | 4 – 8<br>9 – 16 |

Таблица 2.20

**Поправочный коэффициент $k_{MV}$ на скорость резания в зависимости от обрабатываемого металла**

| Сталь углеродистая | | | | Сталь легированная | |
|---|---|---|---|---|---|
| 30, 40, 45 | | A12, A20 | 15, 20 | нормализованная | улучшенная |
| нормализованная | улучшенная | | | | |
| 1,0 | 0,85 | 1,15 | 0,9 | 0,85 | 0,7 |

Таблица 2.21

**Режимы резания при развертывании отверстий в чугунных деталях**

| Квалитет | Параметры шероховатости поверхности *Ra*, мкм | *V**, м/мин | Квалитет | Параметры шероховатости поверхности *Ra*, мкм | *V* *, м/мин |
|---|---|---|---|---|---|
| 7 – 8 | 1,6<br>3,2 | 7 – 9<br>9 – 11 | 9 – 10 | 3,2<br>6,3 | 12 – 14<br>14 – 16 |

* Для твердосплавных разверток принимать скорость резания 30 — 40 м/мин.

Таблица 2.22

**Поправочный коэффициент $k_{MV}$ на скорость резания в зависимости от обрабатываемого металла**

| Сталь углеродистая | | | | Сталь легированная | |
|---|---|---|---|---|---|
| 30, 40, 45 | | A12, A20 | 15, 20 | нормализованная | улучшенная |
| нормализованная | улучшенная | | | | |
| 1,0 | 0,85 | 1,15 | 0,9 | 0,85 | 0,7 |

Таблица 2.23

**Режимы резания при развертывании отверстий в чугунных деталях**

| Квалитет | Параметры шероховатости поверхности *Ra*, мкм | *V**, м/мин | Квалитет | Параметры шероховатости поверхности *Ra*, мкм | *V* *, м/мин |
|---|---|---|---|---|---|

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 7 – 8 | 1,6<br>3,2 | 7 – 9<br>9 – 11 | 9 – 10 | 3,2<br>6,3 | 12 – 14<br>14 – 16 |

* Для твердосплавных разверток принимать скорость резания 30 – 40 м/мин.

**2.4.2.Протягивание** – процесс обработки металлов резанием на протяжных станках многолезвийным режущим инструментом – протяжкой. Применение протягивания целесообразно при обработке больших партий деталей, т. е. в крупносерийном и массовом производстве (ввиду сложности изготовления и высокой стоимости протяжек).

В зависимости от порядка срезания припуска при протягивании различают следующие виды резания: а) профильное, при котором все режущие зубья протяжки снимают припуск, но не участвуют в окончательном формировании поверхности, последний же зуб придаёт ей окончательную форму; б) генераторное, при котором каждый режущий зуб протяжки, срезая припуск, одновременно участвует в построении поверхности; в) прогрессивно-групповое, применяемое при снятии относительно больших припусков, когда все зубья, распределённые по группам (2 – 3 зуба), снимают слой металла не сразу по всей ширине, а частями.

Существуют свободный и координатный методы протягивания. При свободном методе протяжка обеспечивает получение только размеров и формы поверхности; при координатном, – кроме того, точное расположение обработанной поверхности относительно базовой.

Припуск под протягивание составляет для отверстий в поковках и отливках 2 – 6 мм; для отверстий, полученных сверлением, зенкерованием или растачиванием, 0,2 – 0,5 мм. Скорость резания при протягивании сравнительно низка (2 – 15 м/мин), однако производительность протягивания высока, т. к. велика суммарная длина одновременно работающих режущих кромок. Точность обработки при протягивании – 3 – 2-й класс; шероховатость обработанной поверхности – 7 – 9-й класс. Особенность процесса резания при протягивании – постоянное накопление стружки во впадинах перед каждым зубом. Для лучшего размещения стружки и предотвращения заклинивания протяжки зубья часто снабжаются стружколомающими канавками.

**Режим резания при протягивании.** Определение режима резания сводится к назначению скорости резания, т.к. толщина “$a$” и ширина “$b$” срезаемого слоя обусловлены конструктивными особенностями протяжки

**Элементами резания** при протягивании являются периметр резания $\sum B$ – наибольшая суммарная длина лезвий всех одновременно режущих зубьев, мм, подача на один зуб $S_z$, мм, и скорость резания $v$, м/мин.

**Периметр резания** зависит от формы и размеров обрабатываемой поверхности и схемы резания и определяется уравнением $\sum B = Bz_l / z_c$, где $B$ – периметр резания, мм, равный длине обрабатываемого контура заготовки или больше её величину $1/\cos\lambda$ при наклонном расположении зубьев под углом $\lambda$; $z_c$ – число зубьев в секции протяжки при прогрессивной схеме резания (при профильной или генераторной схемах резания $z_c = 1$); $z_l$ – наибольшее число одновременно режущих зубьев, определяемое из выражения $z_l = l/t$, где $l$ – длина обрабатываемой поверхности, мм (за вычетом пазов или выточек, если таковые имеются); $t$ - шаг режущих зубьев, мм. Вычисленное значение $z_l$ округляют до ближайшего целого числа.

**Подача** при протягивании $S_Z$ – размерный перепад между соседними режущими зубьями протяжки (рис.2.3) – является элементом конструкции протяжки.

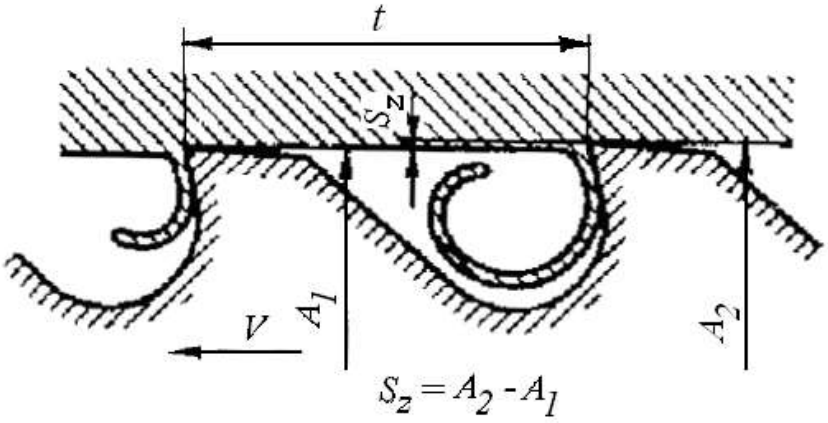



Рис.2.3 Схема срезания припуска при протягивании.

**Скорость резания при протягивании** – скорость относительного перемещения протяжки и заготовки в главном рабочем движении. Скорость резания, определяемую требованиями к точности обработки и параметрам шероховатости обработанной поверхности, выбирают по табл. 2.24 в зависимости от группы скорости. Устанавливаемой из табл. 2.25. При нормативной скорости резания заданный параметр шероховатости поверхности может быть достигнут при оптимальных значениях переднего и заднего углов, при наличии у протяжки чистовых и переходных зубьев.

Установленную нормативную скорость резания сравнивают с максимальной скоростью рабочего хода станка и скоростью резания,
м /мин допускаемой мощностью двигателя станка:

$$V = 61200\frac{N}{P_z}\eta,$$

где $N$ – мощность двигателя станка, кВт;

$P_z$ – сила резания при протягивании, Н;

η – КПД станка.

В качестве рабочей скорости принимают наибольшую из сравниваемых скоростей.

**Сила резания**, Н, при протягивании

$$P_z = P\sum B$$

где $P$ – сила резания на 1 мм длинны лезвия, Н, зависящая от обрабатываемого материала и величины подачи $S_Z$, мм, на один зуб протяжки (табл.П2.2.7).

Таблица 2.24

**Скорость резания, м /мин, для протяжек из быстрорежущей стали Р6М5**

| Группа скорости резания (см. табл.2.25) | Протяжки | | | |
|---|---|---|---|---|
| | цилиндрические | шлицевые | Шпоночные и для наружного протягивания | Всех типов |
| I | 8/6 | 8/3 | 10/7 | 4 |
| II | 7/5 | 7/4.5 | 8/6 | 3 |
| III | 6/4 | 6/3.5 | 7/5 | 2.5 |
| IV | 4/3 | 4/2.5 | 4/3.5 | 2 |

Примечание: 1.В числителе приведены скорости резания при $Ra$ = 3,2 ÷ 6,3 мкм и точности 8 – 9-го квалитетов, в знаменателе – при $Ra$ = 1,6 мкм и точности 7-го квалитета; для протяжек всех типов – при $Ra$ = 0,8 ÷ 0,4 мкм

2. При протягивании наружных поверхностей с допуском до 0,03 мм секциями протяжек с фасонным профилем скорости резания снижать до 4 – 5 м/мин.

3. Для протяжек из стали ХВГ табличные скорости резания снижать на 25 – 30 %.

Основное технологическое время для протягивания –

$$T_o = \left( \frac{L}{1000 \cdot V_{пр}} + \frac{L}{1000 \cdot V_{всп}} \right) \cdot i,$$

где $V_{ПР}$ – скорость протягивания; $V_{ВСП}$ – скорость вспомогательного хода протяжки; $L$ – длина рабочего хода инструмента, мм.

Таблица 2.25

**Группы скорости резания при протягивании стали и чугуна**

| Твердость *НВ* | Сталь | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | углеродистая и автоматная | марганцовистая и хромо- | хромистая | хромистая | хромокремнистая и | хромомарганцови- | хромокремнемар- |

| | | ванадие-вая | | | крем-немар-ган-цови-стая | стая | ган-цовистая |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| До 156 | IV | – | – | – | | – | |
| Св. 156 до187 | III | III | II | | – | II | – |
| » 187 » 197 | II | | I | II | | I | |
| » 197 » 229 | I | II | | | II | | II |
| » 229 » 269 | | | II | III | III | II | |
| » 269 » 321 | II | III | III | | IV | IIII | III |

| Твердость *НВ* | Сталь | | | | | | Чугун | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | никелевая | хромоникелевая | хромомарганцовомолибденовая | никельмолибденовая | хромомарганцовистотитановая | хромоникельмолибденовая | серый | ковкий |
| До 156 | – | – | | | | | – | |
| Св. 156 до187 | | III | – | – | | | I | I |
| » 187 » 197 | IV | | | III | – | – | | |
| » 197 » 229 | III | II | I | | | | II | |
| » 229 » 269 | III | | II | II | II | III | | – |
| » 269 » 321 | - | III | III | III | - | IV | - | |

**2.4.3.Фрезерование** – процесс резания металлов и др. твёрдых материалов фрезой. Фрезерование применяется для обработки плоских и фасонных поверхностей (в т. ч. резьбовых поверхностей, зубчатых и червячных колёс) и осуществляется на фрезерных станках. Схема фрезерование цилиндрической фрезой показана на рис.2.4. Главное движение при фрезеровании – вращение инструмента, движение подачи – поступательное перемещение заготовки; скорость резания равна окружной скорости наиболее удалённых от оси фрезы точек её зубьев.

Существуют две возможные схемы фрезерования: против подачи (встречное фрезерование), когда в нижней точке контакта фрезы с обрабатываемой заготовкой векторы скорости резания и подачи противоположны (рис. 2.5, *а*), и по подаче (попутное фрезерование), когда эти век-

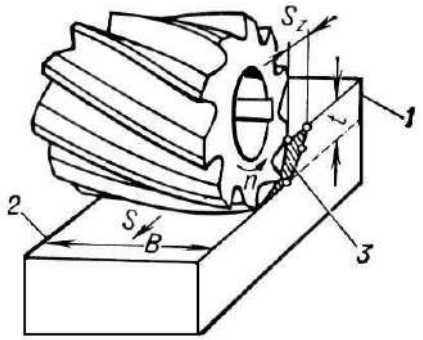



Рис. 2.4. Схема резания при фрезеровании цилиндрической фрезой:
*1* – обрабатываемая поверхность;
*2* – обработанная поверхность;
*3* – поверхность резания.

торы совпадают (рис. 2.5, *б*). При черновом фрезеровании обычно применяется вторая схема, при чистовом фрезеровании – первая. Площадь поперечного сечения слоя металла, срезаемого зубом фрезы, меняется в каждый момент времени резания и, следовательно, меняются и действующие на зуб силы. Равномерное фрезерование может быть достигнуто при использовании фрез с винтовыми зубья ми, работа которых характеризуется примерным постоянством площади поперечного сечения срезаемого слоя металла. Конфигурация обрабатываемой поверхности и вид оборудования определяют тип применяемой фрезы. Ее размеры определяются размерами обрабатываемой поверхности и глубиной срезаемого слоя. Диаметр фрезы для сокращения основного технологического времени и расхода инструментального материала выбирают по возможности наименьшей величины, учитывая при этом жесткость - технологической системы, схему резания, форму и размеры обрабатываемой заготовки.

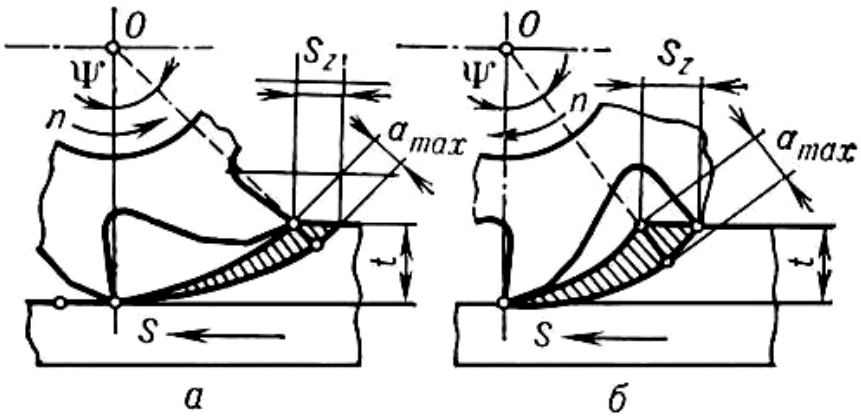



Рис. 2.5. Схемы фрезерования:
*а* – против подачи; *б* – по подаче
$a_{max}$ – наибольшая толщина срезаемого слоя металла; $\Psi$ – угол контакта фрезы.

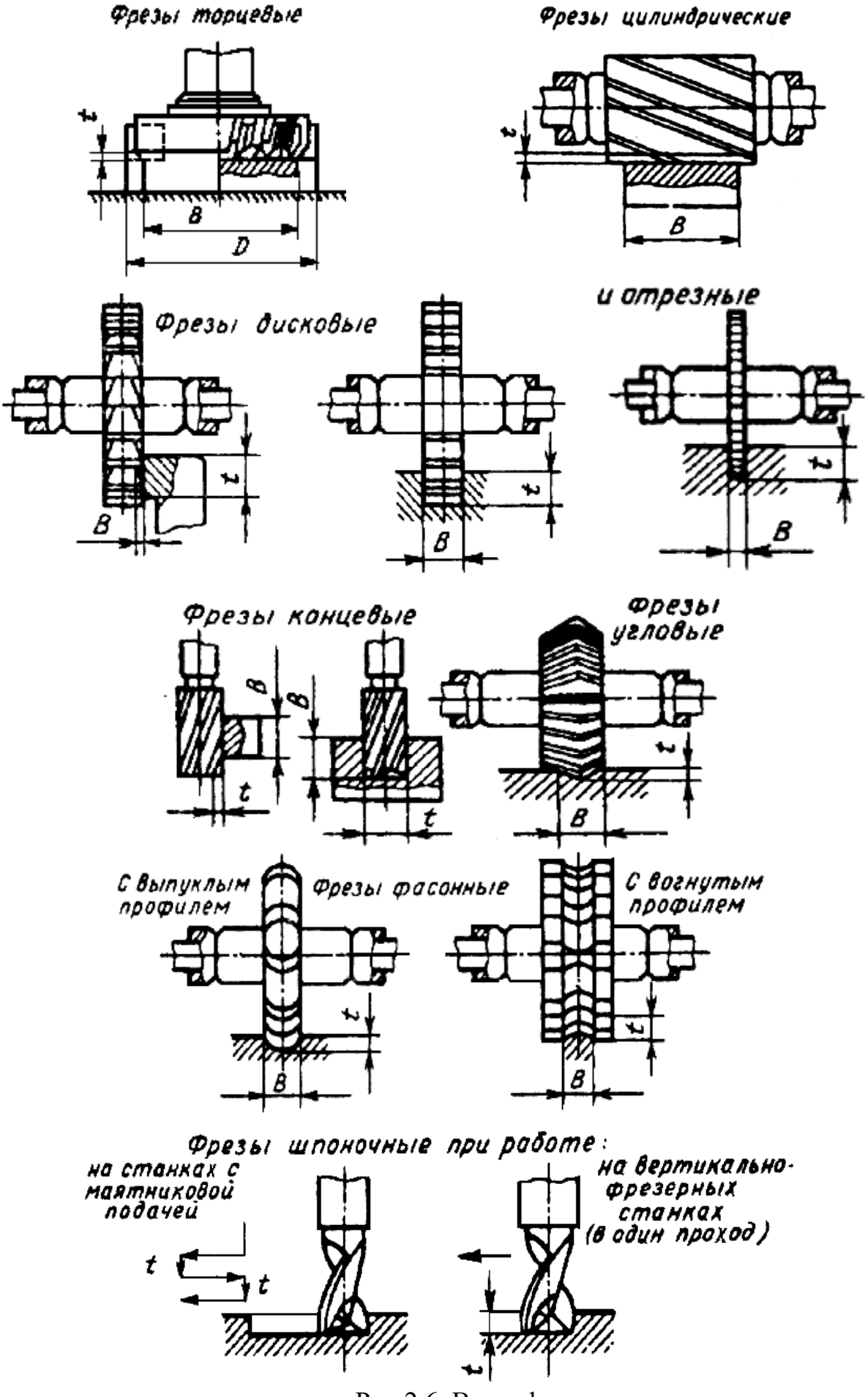



Рис.2.6. Виды фрез.

Таблица 2.26

**Рекомендуемые значения габаритных размеров в мм и числа зубьев цельных фрез**

| Область применения | Вид фрезы | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | дисковая, трехсторонняя | | | цилиндрическая | | | торцевая | | | концевая | |
| | *D* | *d* | *z* | *D* | *d* | *z* | *D* | *d* | *z* | *d* | *z* |
| Обработка хрупких материалов и обработка с малыми глубинами | – | – | – | 40 | 16 | 8–10 | 40 | 16 | 12 | 2–4 | 4 |
| | 50 | 16 | 14 | 50 | 22 | 8–10 | 50 | 22 | 14 | 6–8 | 5 |
| | 63 | 22 | 16 | 63 | 27 | 10–12 | 63 | 27 | 16 | 10–18 | 6 |
| | 80 | 27 | 18 | 80 | 32 | 10–14 | 80 | 27 | 18 | 20–30 | 8 |
| | 100 | 32 | 20 | 100 | 40 | 14–18 | 100 | 32 | 20 | 32–40 | 10 |
| | 125 | 32 | 22 | 125 | 50 | 16–20 | 125 | 40 | 22 | 50 | 12 |
| | 160 | 40 | 26 | 160 | 50 | 16–22 | 160 | 40 | 24 | 63 | 14 |
| | 200 | 40 | 30 | – | – | – | – | – | – | – | – |
| Обработка сталей и обработка с увеличенными глубинами и подачами | – | – | – | 40 | 16 | 6 | 40 | 16 | 8 | 2–6 | 3 |
| | 50 | 16 | 10 | 50 | 22 | 6 | 50 | 22 | 8 | 6–18 | 4 |
| | 63 | 22 | 10 | 63 | 27 | 8 | 63 | 27 | 10 | 20–30 | 5 |
| | 80 | 27 | 12 | 80 | 32 | 8 | 80 | 27 | 10 | 32–40 | 6 |
| | 100 | 32 | 14 | 100 | 40 | 10 | 100 | 32 | 12 | 50; 63 | 8 |
| | 125 | 32 | 16 | 125 | 50 | 10 | 125 | 40 | 14 | – | – |
| | 160 | 40 | 18 | 160 | 50 | 12 | 160 | 40 | 16 | – | – |
| | 200 | 40 | 20 | – | – | – | 200 | 50 | 20 | – | – |

При торцовом фрезеровании для достижения производительных режимов резания диаметр фрезы $D$ должен быть больше ширины фрезерования $B$, т. е. $D = (1{,}25 \div 1{,}5)\ B$, а при обработке стальных заготовок обязательным является их несимметричное расположение относительно фрезы: для заготовок из конструкционных углеродистых и легированных сталей - сдвиг их в направлении врезания зуба фрезы (рис. 2.7, *а*), чем обеспечивается начало резания при малой толщине срезаемого слоя; - для заготовок из жаропрочных и коррозионно-стойких сталей - сдвиг заготовки в сторону выхода зуба фрезы из резания (рис. 2.7, *б*), чем обеспечивается выход зуба из резания с минимально возможной толщиной срезаемого слоя. Несоблюдение указанных правил приводит к значительному снижению стойкости инструмента.

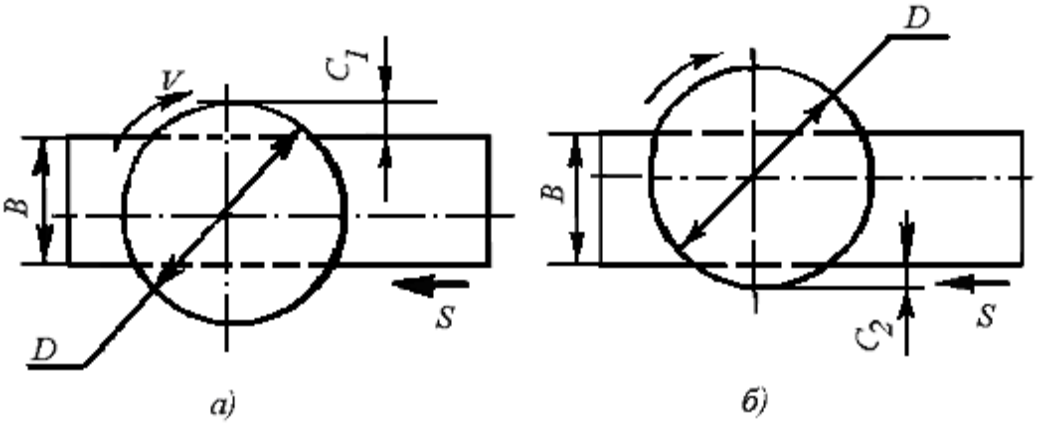



Рис. 2.7. Расположение стальной заготовкой при торцовом фрезеровании относительно фрезы:

*а* - врезание зуба фрезы при $c_1 = (0{,}03 \div 0{,}05)\ D$; *б* - выход зуба фрезы при $c_2 = 0$

**Режим резания при фрезеровании.**

**Глубина фрезерования *t* и ширина фрезерования *B*** – понятия, связанные с размерами слоя заготовки, срезаемого при фрезеровании. Во всех видах фрезерования, за исключением торцового, $t$ определяет продолжительность контакта зуба фрезы с заготовкой; $t$ измеряют в направлении, перпендикулярном к оси фрезы. Ширина фрезерования $B$ определяет длину лезвия зуба фрезы, участвующую в резании; $B$ измеряют в направлении, параллельном оси фрезы.

**Подача.** При фрезеровании различают подачу на один зуб $S_Z$, подачу на один оборот фрезы $S$ и подачу минутную $S_M$, мм/мин, которые находятся в следующем соотношении:

$$S_M = S\,n = S_Z \cdot z \cdot n$$

где $n$ - частота вращения фрезы, об/мин; $z$ - число зубьев фрезы.

Исходной величиной подачи при черновом фрезеровании является величина ее на один зуб $S_Z$, при чистовом фрезеровании – на один оборот фрезы $S$, по которой для дальнейшего использования вычисляют величину подачи на один зуб $S_Z = S/z$. Рекомендуемые подачи для различных фрез и условий резания приведены в табл. 2.27, 2.28, 2.29.

Число зубьев сборных фрез меньше, чем у цельных, и принимается равным (в зависимости от диаметра $d$ фрезы и обрабатываемого материала):

| $d$, мм | < 40 | 50; 63 | 80 | 100 – 125 | 165 | 200 | 250 | 400 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Сталь | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 8 – 10 | | 12 |
| Чугун | 4 | 5 | 6 | 10 | 12 | 16 | 22 | 30 |

**Скорость резания** – окружная скорость фрезы, м /мин,

$$V = \frac{C_v D^q}{T^m t^x S_z^y B^u z^p} K_v$$

Значения коэффициента $C_V$ и показателей степени приведены в табл. П2.2.3, а периода стойкости $T$ – в табл. 2.30.

Общий поправочный коэффициент на скорость резания, учитывающий фактические условия резания:

$$K_v = K_{mv} K_{nv} K_{uv},$$

где $K_{MV}$ – коэффициент, учитывающий качество обрабатываемого материала (см. табл. 1.7, 2.36,); $K_{ПV}$ – коэффициент, учитывающий состояние поверхности заготовки (см. табл.1.9); $K_{ИV}$ – коэффициент, учитывающий материал инструмента (см. табл.1.8).

Рекомендуемые значения скорости резания для различных фрез и условий резания приведены в табл.2.31, 2.32.

Основное технологическое время при фрезеровании:

$$T_o = \frac{L}{S_м} \cdot i, \quad \text{мин},$$

где $L$ – общая длина прохода заготовки (в мм) относительно фрезы в направлении подачи, $i$ – число проходов. Скорость резания, допускаемая при фрезеровании, зависит от типа фрезы, материала и геометрических параметров её режущей части и др. элементов, режима резания, состояния поверхностного слоя заготовки и т. п.

Таблица 2.27

**Подачи при фрезеровании стальных заготовок шпоночными фрезами из быстрорежущей стали**

| Диаметр фрезы *D*, мм | Фрезерование на шпоночно-фрезерных станках с маятниковой подачей при глубине фрезерования на один двойной ход, составляющий часть глубины шпоночного паза | | Фрезерование на вертикально-фрезерных станках за один проход | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Осевое врезание на глубину шпоночного паза | Продольное движение при фрезеровании шпоночного паза |
| | Глубина фрезерования ***t***, мм | Подача на один зуб $S_Z$, мм | | |
| 6 | 0,3 | 0,10 | 0,006 | 0,020 |
| 8 | | 0,12 | 0,007 | 0,022 |
| 10 | | 0,16 | 0,008 | 0,024 |
| 12 | | 0,18 | 0,009 | 0,026 |
| 16 | 0,4 | 0,25 | 0,010 | 0,028 |
| 18 | | 0,28 | 0,011 | 0,030 |
| 20 | | 0,31 | 0,011 | 0,032 |
| 24 | | 0,38 | 0,012 | 0,036 |
| 28 | 0,5 | 0,45 | 0,014 | 0,037 |
| 32 | | 0,50 | 0,015 | 0,037 |
| 36 | | 0,55 | 0,016 | 0,038 |
| 40 | | 0,65 | 0,016 | 0,038 |

**Примечание:** Подачи даны для конструкционной стали с $\sigma_в \leq 750$ МПа; при обработке сталей более высокой прочности подачи снижают на 20 – 40%.

Таблица 2.28

## Подача на зуб фрезы $S_Z$, мм/об, при обработке плоскостей

| Твердость обрабатываемого материала *HB* | Обрабатываемый материал | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Сталь | | | Чугун | | | Алюминиевые сплавы |
| | ***t*,** мм | | | | | | |
| | ≤ 3 | ≤ 5 | > 5 | ≤ 3 | ≤ 5 | > 5 | ≤ 12 |
| **Торцовые фрезы из быстрорежущей стали** | | | | | | | |
| ≤ 229<br>230 – 287<br>287 | 0,2 - 0,3<br>0,5 - 0,25<br>0,2 – 0,2 | 0,15– 0,25<br>0,12– 0,2<br>0,1– 0,15 | 0,12 – 0,21<br>0,1– 0,15<br>0,07 – 0,1 | | | | 0,25–0,3 |
| **Торцовые фрезы с пластинами из твердого сплава** | | | | | | | |
| ≤ 229<br>230 – 287<br>287 | 0,15- 0,2<br>0,1 - 0,15<br>0,08 - 0,1 | 0,1- 0,18<br>0,08 - 0,1<br>0,06 - 0,08 | 0,1 - 0,15<br>0,06 - 0,01<br>0,05 - 0,07 | 0,2 - 0,35<br>0,12 - 0,25<br>0,1 - 0,15 | 0,15-0,20<br>0,12-0,2<br>0,08-0,1 | 0,1 - 0,2<br>0,1- 0,15<br>0,06- 0,08 | 0,2– 0.3 |
| **Дисковые фрезы из быстрорежущей стали** | | | | | | | |
| ≤ 229<br>230 – 287<br>287 | 0,1- 0,25<br>0,12 - 0,2<br>0,1 - 0,15 | 0,12 - 0,2<br>0,1 - 0,15<br>0,08 -0,1 | 0,1 - 0,15<br>0,08 - 0,12<br>0,06 - 0,1 | | | | 0,1– 0,15 |
| **Дисковые фрезы с пластинами из твердого сплава** | | | | | | | |
| ≤ 229<br>230 – 287<br>287 | 0,15-0,12<br>0,08 - 0,1<br>0,06-0,08 | 0,08 - 0,1<br>0,06 - 0,08<br>0,05 - 0,07 | 0,7 - 0,1<br>0,05 - 0,07<br>0,04 -0,06 | 0,15 - 0,25<br>0,12 - 0,2<br>0,08 - 0,15 | 0,12-0,20<br>0,1- 0,15<br>0,06 - 0,1 | 0,1- 0,15<br>0,08- 0,1<br>0,05- 0,08 | 0,15– 0,2 |
| **Цилиндрические крупнозубые фрезы из быстро режущей стали** | | | | | | | |
| ≤ 229<br>230 – 287<br>287 | 0,2 - 0,3<br>0,15 - 0,2<br>0,1 - 0,15 | 0,15 - 0,2<br>0,1 - 0,15<br>0,08 - 0,1 | 0,1 - 0,15<br>0,08 - 0,1<br>0,06 - 0,08 | | | | 0,2– 0,25 |

Примечание. При чистовой обработке для достижения параметра шероховатости поверхности $Ra$ = 3,2 мкм $S_Z$ не должна превышать 0,1 мм. Бóльшие значения подач принимать для жестких систем деталь – станок – инструмент.

Таблица 2.29

## Подачи на зуб $S_Z$, мм/зуб, при обработке пазов

| $B$, мм | Твердость обрабатываемого материала | Обрабатываемый материал | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Сталь | | | Чугун | | | Алюминиевый сплав |
| | | $t$, мм | | | | | | |
| | *HB* | ≤ 3 | < 5 | > 5 | < 3 | < 5 | > 5 | < 12 |
| **Дисковые фрезы из быстрорежущей стали** | | | | | | | | |
| – | ≤ 229<br>230-287<br>287 | 0,07 – 0,12<br>0,05 – 0,10<br>0,03 – 0,06 | | | 0,07 – 0,12<br>0,06 – 0,1<br>0,04 – 0,08 | | | 0,12 – 0,18 |
| **Дисковые фрезы с пластинами из твердого сплава** | | | | | | | | |
| – | ≤ 229<br>230 – 287<br>287 | 0,06 – 0,10<br>0,04 – 0,08<br>0,03 – 0,06 | | | 0,07 – 0,12<br>0,06 – 0,1<br>0,04 – 0,08 | | | 0,1–0,12 |
| **Прорезные фрезы из быстрорежущей стали** | | | | | | | | |
| 2<br>3<br>6 | ≤ 287 | 0,03-0,05<br>0,02-0,04<br>0,01-0,02 | 0,02-0,04<br>0,01-0,02<br>До 0,01 | 0,01–0,02<br>До 0,01<br>– | 0,04-0,06<br>0,03-0,05<br>0,02-0,04 | 0,03-0,05<br>0,02-040,<br>01-0,02 | 0,02–0,04<br>0,01–0,02<br>До 0,01 | 0,04–0,06 |
| **Угловые фрезы с пластинами из твердого сплава для пазов типа «ласточкин хвост»** | | | | | | | | |
| 50 | 230 – 287 | – | | | 0,12–0,18<br>0,01–0,15 | 0,1–0,15<br>0,04–0,1 | 0,08–0,01<br>0,01–0,05 | – |
| **Радиусные фрезы из быстрорежущей стали** | | | | | | | | |
| – | 230 – 287 | 0,04–0,06 | 0,03–0,05 | 0,02–0,04 | 0,06 –0,08 | 0,04-0,06 | 0,03–0,05 | |

Примечания: 1. Большие значения подач принимать для жестких систем деталь – станок – инструмент.

2. При фрезеровании пазов дисковыми фрезами меньшие значения подач принимать при $t > 2B$, где $B$ – ширина паза

Таблица 2.30

**Средние значения периода стойкости *T* фрез**

| Фрезы | Стойкость *T*, мин, при диаметре фрезы, мм | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 20 | 25 | 40 | 60 | 75 | 90 | 110 | 150 | 200 | 250 | 300 | 400 |
| Торцовые | – | | 120 | 180 | | | | | 240 | | 300 | 400 |
| Цилиндрические со вставными ножами и цельные с крупным зубом | | | | | | 180 | | | 240 | – | | |
| Цилиндрические цельные с мелким зубом | – | | 120 | | 180 | | | – | | | | |
| Дисковые | – | | | | | 120 | | 150 | 180 | 240 | – | |
| Концевые | 80 | 90 | 120 | 180 | – | | | | | | | |
| Прорезные и отрезные | – | | | | 60 | 75 | 120 | | 150 | – | | |
| Фасонные и угловые | – | | 120 | | | 180 | – | | | | | |

Таблица 2.31

**Скорость резания *V*, м/мин, при обработке деталей из стали**

| Материал рабочей части режущего инструмента | ***t***, мм | $S_Z$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,3 |
| **Торцовые фрезы** | | | | | | | | |
| Быстрорежущая сталь | 1 | | 70 | 65 | 60 | 50 | 45 | 40 |
| | 3 | | 50 | 47 | 42 | 37 | 33 | 27 |
| | 6 | – | 42 | 40 | 36 | 30 | 25 | 22 |
| Твердый сплав | 1 | | 440 | 400 | 360 | 300 | 280 | 230 |
| | 3 | | 400 | 360 | 310 | 270 | 240 | 180 |
| | 6 | | 350 | 310 | 290 | 240 | 210 | 150 |
| **Дисковые фрезы для обработки плоскостей** | | | | | | | | |
| Быстрорежущая сталь | 1 | | 70 | 65 | 60 | 50 | 45 | 40 |
| | 3 | | 50 | 47 | 42 | 37 | 33 | 27 |
| | 6 | – | 42 | 40 | 36 | 30 | 25 | 22 |
| Твердый сплав | 1 | | 400 | 380 | 330 | 290 | 250 | 230 |
| | 3 | | 350 | 320 | 280 | 230 | 210 | 170 |
| | 6 | | 320 | 300 | 260 | 200 | 180 | 150 |

Окончание табл. 2.31

| Материал рабочей части режущего инструмента | *t*, мм | $S_Z$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,3 |
| **Дисковые фрезы для обработки пазов** | | | | | | | | |
| Быстрорежущая сталь | 5<br>10<br>20 | 60<br>50<br>38 | 55<br>45<br>35 | 50<br>40<br>33 | 40<br>30<br>25 | 30<br>25<br>20 | 25<br>20<br>18 | – |
| Твердый сплав | 5<br>10<br>20 | 420<br>350<br>280 | 340<br>310<br>250 | 310<br>280<br>220 | 280<br>220<br>180 | 220<br>160<br>140 | 140<br>120<br>100 | - |
| **Прорезные фрезы** | | | | | | | | |
| Быстрорежущая сталь | 3<br>6<br>12<br>25 | – | 44<br>37<br>30<br>24 | 42<br>35<br>27<br>22 | 35<br>30<br>25<br>30 | – | – | |
| **Цилиндрические крупнозубые фрезы** | | | | | | | | |
| Быстрорежущая сталь | 40*<br>60*<br>>60* | — | 44<br>42<br>40 | 42<br>40<br>38 | 38<br>34<br>30 | 34<br>30<br>26 | 22<br>20<br>18 | 20<br>18<br>16 |
| **Радиусные фрезы** | | | | | | | | |
| | 20*<br>>20* | – | 40 38 | 36<br>32 | 32<br>28 | – | | |

* Ширина фрезерования *B,* мм

Таблица 2.32

**Скорость резания *V*, м/мин, при обработке деталей из чугуна и алюминиевых сплавов**

| Материал рабочей части режущего инструмента | ***t*,** мм | Чугун | | | | | | | | Алюминиевые сплавы (весь диапазон подач) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $S_Z$, мм/зуб | | | | | | | | |
| | | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | |
| **Торцовые фрезы** | | | | | | | | | | |
| Быстрорежущая сталь | 1<br>3<br>6 | – | | | | | | | | 320 |

Продолжение табл. 2.32

| Материал рабочей части режущего инструмента | ***t***, мм | Чугун | | | | | | | | Алюминиевые сплавы (весь диапазон подач) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ***Sz***, мм/зуб | | | | | | | | |
| | | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | |
| Твердый сплав | 1<br>3<br>6 | — | | 175<br>150<br>130 | 155<br>130<br>110 | 130<br>120<br>90 | 120<br>110<br>80 | 110<br>100<br>70 | 100<br>90<br>60 | 900 |
| **Дисковые фрезы для обработки плоскостей** | | | | | | | | | | |
| Быстрорежущая сталь | 1<br>3<br>6 | – | | 75<br>70<br>67 | 67<br>63<br>58 | 56<br>50<br>47 | 50<br>45<br>40 | 40<br>36<br>32 | 32<br>28<br>26 | 300 |
| Твердый сплав | 1<br>3<br>6 | – | | 160<br>140<br>130 | 130<br>120<br>110 | 110<br>100<br>90 | 90<br>80<br>70 | 80<br>70<br>60 | 60<br>55<br>50 | 700 |
| **Дисковые фрезы для обработки пазов** | | | | | | | | | | |
| Быстрорежущая сталь | 5<br>10<br>20 | 85<br>60<br>45 | 70<br>50<br>40 | 65<br>45<br>35 | 55<br>40<br>30 | 45<br>35<br>25 | 40<br>30<br>20 | 30<br>25<br>18 | | 100 |
| Твердый сплав | 5<br>10<br>20 | 200<br>160<br>140 | 180<br>140<br>120 | 160<br>120<br>100 | 140<br>110<br>90 | 110<br>100<br>80 | 110<br>90<br>70 | 100<br>80<br>60 | – | 500 |
| **Прорезные фрезы** | | | | | | | | | | |
| Быстрорежущая сталь | 2<br>6<br>12<br>25 | | 40<br>30<br>22<br>15 | 35<br>22<br>18<br>12 | 25<br>18<br>13<br>9 | – | | | | – |
| **Цилиндрические крупнозубые фрезы** | | | | | | | | | | |
| Быстрорежущая сталь | 40*<br>60*<br>> 60* | – | 42<br>40<br>38 | 36<br>34<br>32 | 34<br>32<br>30 | 30<br>25<br>20 | 25<br>20<br>18 | 22<br>18<br>16 | – | – |
| **Угловые фрезы для пазов типа «ласточкин хвост»** | | | | | | | | | | |
| Твердый сплав | 50*<br>>50* | – | – | 96<br>88 | 82<br>76 | 76<br>68 | 70<br>62 | 64<br>56 | – | – |
| **Радиусные фрезы** | | | | | | | | | | |
| Быстрорежущая сталь | 20*<br>>20* | | 34<br>32 | 30<br>26 | 26<br>22 | 22<br>20 | – | – | – | – |

* Ширина фрезерования *B*, мм

## Поправочные коэффициенты на скорость резания.

Таблица 2.33

### Коэффициент $k_д$ в зависимости от отношения диаметра фрезы к глубине или ширине фрезерования

| Материал рабочей части режущего инструмента | Отношение $\frac{D}{B}$ или $\frac{D}{t}$ | | Обрабатываемый материал | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Сталь | Чугун |
| | | | $k_д$ | |
| **Торцовые фрезы** | | | | |
| Быстророрежущая сталь | $\frac{D}{B}$ | 1,25<br>2<br>5 | 1,0<br>1,1<br>1,25 | — |
| **Дисковые трехсторонние фрезы для обработки пазов** | | | | |
| Быстрорежущая сталь | $\frac{D}{B}$ | 3<br>10<br>20 | 1,0<br>1,2<br>1,3 | 1,0<br>1,1<br>1,2 |
| Твердый сплав | | 4<br>6<br>9 | 1,1<br>1,2<br>1,3 | 1,0<br>1,15<br>1,25 |
| **Цилиндрические фрезы** | | | | |
| Быстрорежущая сталь и твердый сплав | $\frac{D}{t}$ | 10<br>20<br>30 | 1,0<br>1,2<br>1,3 | 0,8<br>1,0<br>1,2 |
| **Прорезные фрезы** | | | | |
| Быстрорежущая сталь | $\frac{D}{B}$ | 15<br>40<br>75 | 1,0<br>1,2<br>1 5 | 1,1<br>1,2<br>1 4 |
| **Угловые фрезы для пазов типа «ласточкин хвост»** | | | | |
| Твердый сплав | $\frac{D}{B}$ | 10<br>> 10 | – | 1,0<br>0,8 |

Таблица 2.34

**Коэффициент $k_{MV}$ зависимости от характеристики обрабатываемого материала**

| Материал рабочей части режущего инструмента | Обрабатываемый материал | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Сталь | | | | | | | |
| | 30;35;40 | | 45 | | 35Х | | 20Х | 40Х |
| | *НВ* | | | | | | | |
| | 229 | 269 | 229 | 264 | 207 | 255 | 179 | 269 |
| Быстрорежущая сталь | 1,1 | 0,8 | 1,0 | 0,8 | 1,0 | 0,7 | 1,3 | 0,7 |
| Твердый сплав | 1,0 | 0,9 | | 0,9 | | 0,9 | 1,2 | 0,8 |

| Материал рабочей части режущего инструмента | Обрабатываемый материал | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Сталь | | | | Чугун | | | | | |
| | 35ХГС | 18ХГТ | | 30ХГТ | Поверхность без корки | | | Поверхность с коркой | | |
| | *НВ* | | | | | | | | | |
| | 241 | 321 | 187 | 197 | 229 | 241 | 295 | 229 | 241 | 295 |
| Быстрорежущая сталь | 0,6 | 0,5 | 1,1 | 0,7 | - | - | - | - | - | - |
| Твердый сплав | 0,8 | 0,7 | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 0,7 | 0,6 |

Таблица 2.35

**Коэффициент $k_{TV}$ в зависимости от стойкости инструмента**

| Материал рабочей части режущего | Обрабатываемый материал | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Сталь | | | | | | Чугун | | | | |
| | Период стойкости $T_м$, мин | | | | | | | | | | |
| | 150 | 200 | 400 | 600 | 1000 | 1500 | 150 | 200 | 400 | 600 | 1000 |
| **Торцовые, дисковые и прорезные фрезы** | | | | | | | | | | | |
| Быстрорежущая сталь | 0,9 | 0,85 | 0,75 | 0,7 | 0,6 | 0,55 | | | | | |
| Твердый сплав | 0,85 | 0,80 | 0,65 | – | | | | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,55 |
| **Цилиндрические фрезы** | | | | | | | | | | | |
| Быстрорежущая сталь | 0,85 | 0,8 | – | | | | 0,9 | – | | | |
| **Угловые фрезы для пазов** | | | | | | | | | | | |
| Твердый сплав | | | | | | | – | 0,75 | 0,65 | 0,55 | 0,5 |

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2.1

### Вертикально-сверлильный станок 2Н125

Наибольший диаметр обрабатываемого отверстия в заготовке из стали – 25 мм. Мощность двигателя $N_{дв}$ = 2,8 кВт; КПД станка – 0,8. Частота вращения шпинделя, мин $^{-1}$: 45; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 1400; 2000;. Подача, мм /об.: 0,1; 0,14; 0,2; 0,28; 0,4; 0,56; 0,8; 1,12; 1,6. Максимальная осевая сила резания, допускаемая механизмом подачи станка $P_{max}$ = 900 кГс = 9000 Н.

### Вертикально-сверлильный станок 2Н135

Наибольший диаметр обрабатываемого отверстия в заготовке из стали – 35 мм. Мощность двигателя $N_{дв}$ = 4,5 кВт; КПД станка – 0,8. Частота вращения шпинделя, мин $^{-1}$: 31,5; 45; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 1400. Подача, мм /об: 0,1; 0,14;0,2; 0,28; 0,4; 0,56; 0,8; 1,12; 1,6. Максимальная осевая сила резания, допускаемая механизмом подачи станка. $P_{max}$ = 1500 кГс = 15000 Н.

### Вертикально-фрезерный станок 6Т13

Площадь рабочей поверхности стола 400×1600 мм. Мощность двигателя $N_{дв}$ = 11 кВт; КПД станка – 0,8. Частота вращения шпинделя, мин $^{-1}$: 16; 20; 25; 31,5; 45; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 1250; 1600. Скорости продольного и поперечного движения подачи стола, мм /мин: 4,1; 5,3; 6,6; 8; 10,5; 13,3; 16,6; 21; 26,6; 33,3; 41,6; 53,5; 66,6; 93,3; 105; 133,3; 166,6; 210; 266,6; 333,3; 400. Максимальная сила резания, допустимая механизмом движения подачи, Н: продольного – 20000, поперечного – 12000, вертикального – 8000.

### Вертикально-фрезерный станок 6Т12

Площадь рабочей поверхности стола 320 × 1250 мм. Мощность двигателя $N_{дв}$ = 7,5 кВт; КПД станка – 0,8. Частота вращения шпинделя, мин$^{-1}$: 16; 20; 25; 31,5; 45; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 1250; 1600. Скорости продольного и поперечного движения подачи стола, мм /мин: 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 45; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 1250. Скорость вертикального движения подачи стола, мм /мин: 4,1; 5,3; 6,6; 8; 10,5; 13,3; 16,6; 21; 26,6; 33,3; 41,6; 53,5; 66,6; 93,3; 105; 133,3;

166,6; 210; 266,6; 333,3; 400. Максимальная сила резания, допустимая механизмом движения подачи, Н: продольного – 15000, поперечного – 12000, вертикального – 5000.

## Горизонтально-фрезерный станок 6Т82Г

Площадь рабочей поверхности стола, мощность, частота вращения, скорость движения подачи и допускаемая сила резания такие же, как у станка 6Т12

## Поперечно-строгальный станок 7305

Наибольшая длина хода ползуна 500 мм. Число двойных ходов ползуна в мин $^{-1}$: 13,2; 19; 26,5; 37,5; 53; 75; 106; 150. Горизонтальная подача стола, мм /дв. ход ползуна: 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8; 3,0; 3,2; 3,4; 3,6; 3,8; 4,0; 4,2; 4,4; 4,6; 4,8; 5,0. Вертикальная подача суппорта, мм /дв. ход ползуна: 0,16; 0,33; 0,5; 0,66; 0,83; 1,0. Мощность двигателя $N_{дв}$ = 5,5 кВт; КПД станка – 0,65.

Таблица П2.1.2

**Протяжные станки**

| Модель станка | Номинальная тяговая сила, тс | Кол-во плунжеров | Длина рабочего хода ползуна, мм | Скорость рабочего хода, м /мин | | Скорость обратного хода, м /мин | Мощность электродвигателя, кВт |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | наибольшая | наименьшая | | |
| **Горизонтально-протяжные станки** | | | | | | | |
| 7523 | 10 | 1 | 1250 | 11,5 | 1,5 | 20 | 18,5 |
| 7534 | 25 | 1 | 1600 | 13 | 1,5 | 20 | 37 |
| **Вертикально-протяжные станки** | | | | | | | |
| 7623 | 10 | 1 | 1250 | 11,4 | 1,2 | 20 | 8,5 |
| 7634 | 25 | 1 | 1250 | 13 | 1,2 | 20 | 37 |

Таблица П2.1.1

**Зависимость скоростей рабочего хода и допускаемых сил на ползуне от длины обрабатываемой поверхности и числа двойных ходов ползуна в 1 мин**

| Длина рабочего хода ползуна, мм. | Отношение скоростей рабочего и холостого ходов ползуна. | Число двойных ходов в 1 мин. | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 13,2 | | 19 | | 26,5 | |
| | | $V_{р.х.}$ | $P$ | $V_{р.х.}$ | $P$ | $V_{р.х.}$ | $P$ |
| 50 | 0,956 | 1,24 | 147,67 | 1,86 | 98,47 | 2,54 | 72,00 |
| 100 | 0,914 | 2,42 | 76,30 | 3,63 | 50,88 | 4,97 | 37,20 |
| 150 | 0,875 | 3,55 | 52,46 | 5,36 | 34,98 | 7,29 | 25,58 |
| 200 | 0,836 | 4,63 | 40,61 | 6,93 | 27,08 | 9,5 | 19,80 |
| 250 | 0,799 | 5,66 | 33,47 | 8,48 | 22,32 | 11,6 | 16,32 |
| 300 | 0,764 | 6,65 | 28,69 | 10,0 | 19,13 | 13,7 | 13,99 |
| 350 | 0,728 | 7,59 | 25,27 | 11,4 | 16,85 | 15,6 | 12,32 |
| 400 | 0,694 | 8,49 | 22,77 | 12,7 | 15,18 | 17,5 | 11,10 |
| 450 | 0,662 | 9,4 | 20,77 | 14,0 | 13,85 | 19,2 | 10,13 |
| 500 | 0,630 | 10,2 | 19,20 | 15,3 | 12,80 | 20,9 | 9,36 |
| | | 37,5 | | 53 | | 75 | |
| 50 | 0,956 | 3,62 | 50,67 | 5,05 | 36,27 | 7,6 | 24,20 |
| 100 | 0,914 | 7,06 | 26,18 | 9,09 | 18,74 | 14,8 | 18,50 |
| 150 | 0,875 | 10,4 | 18,00 | 15,5 | 12,89 | 21,7 | 8,60 |
| 200 | 0,836 | 13,6 | 13,94 | 18,9 | 9,98 | 28,3 | 6,65 |
| 250 | 0,799 | 16,5 | 11,49 | 23,1 | 8,22 | 34,6 | 5,49 |
| 300 | 0,764 | 19,4 | 9,85 | 27,1 | 7,05 | 40,6 | 4,70 |
| 350 | 0,728 | 22,2 | 8,67 | 31,0 | 6,21 | 47,2 | 4,14 |
| 400 | 0,694 | 24,8 | 7,81 | 34,6 | 5,59 | | |
| 450 | 0,662 | 27,3 | 7,13 | 38,2 | 5,10 | | |
| 500 | 0,630 | 29,5 | 6,59 | 42,4 | 4,72 | | |
| | | 106 | | 150 | | | |
| 50 | 0,956 | 10,4 | 17,69 | 14,7 | 12,45 | | |
| 100 | 0,914 | 20,2 | 9,14 | 28,8 | 6,43 | | |
| 150 | 0,875 | 29,7 | 6,28 | 42,6 | 4,42 | | |
| 200 | 0,836 | 38,7 | 4,87 | Запрещается работа на режимах, лежащих ниже линии | | | |
| 250 | 0,799 | 47,5 | 4,01 | | | | |
| 300 | 0,764 | | | | | | |
| 350 | 0,728 | | | | | | |
| 400 | 0,694 | | | | | | |
| 450 | 0,662 | | | | | | |
| 500 | 0,630 | | | | | | |

Примечание. При работе на режимах, ограниченных верхней линией, сила на ползуне не должна превышать 17,66 кН. $V_{Р.Х.}$.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 2.2

Таблица П2.2.1

**Значения коэффициента $C_V$ и показателей степени в формуле скорости резания при сверлении**

| Обрабатываемый материал: | Материал режущей части инструмента | Подача $S$, мм /об | Коэффициент и показатели степени | | | | Охлаждение |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $C_V$ | $q$ | $y$ | $m$ | |
| Сталь конструкционная углеродистая, $\sigma_в$ = 750 МПа | Р6М5 | ≤ 0,2<br>> 0,2 | 7,0<br>9,8 | 0,40 | 0,70<br>0,50 | 0,20 | Есть |
| Сталь жаропрочная 12Х18Н9Т, *НВ* 141 | | – | 3,5 | 0,50 | 0,45 | 0,12 | |
| Чугун серый, *НВ* 190 | | ≤ 0,3<br>> 0,3 | 14,7<br>17,1 | 0,25 | 0,55<br>0,40 | 0,125 | Нет |
| | ВК8 | – | 34,2 | 0,45 | 0,30 | 0,20 | |
| Чугун ковкий, *НВ* 150 | Р6М5 | ≤ 0,3<br>> 0,3 | 21,8<br>25,3 | 0,25 | 0,55<br>0,40 | 0,125 | Есть |
| | ВК8 | – | 40,4 | 0,45 | 0,3 | 0,20 | Нет |
| Медные гетерогенные сплавы средней твердости (*НВ* 100 – 140) | Р6М5 | ≤ 0,3<br>> 0,3 | 28,1<br>32,6 | 0,25 | 0,55<br>0,40 | 0,125 | Есть |
| Силумин и литейные алюминиевые сплавы, $\sigma_в$ = 100 ÷ 200 МПа, *НВ* ≤ 65; дюралюминий, *НВ* ≤ 100 | | ≤ 0,3<br>> 0,3 | 36,3<br>40,7 | 0,25 | 0,55<br>0,40 | 0,125 | |

**Примечание:** Для сверл из быстрорежущей стали рассчитанные по приведенным данным скорости резания действительны при двойной заточке и подточенной перемычке, При одинарной заточке сверл из быстрорежущей стали рассчитанную скорость резания следует уменьшать, умножая ее на коэффициент
$K_{3V}$ = 0,75.

Таблица П2.2.2

**Значения коэффициента $C_V$ и показателей степени в формуле скорости резания при рассверливании, зенкеровании и развертывании**

| Обрабатываемый материал | Вид обработки | Материал режущей части инструмента | Коэффициент и показатели степени | | | | | Охлаждение |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $C_V$ | $q$ | $x$ | $y$ | $m$ | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Конструкционная углеродистая сталь, $\sigma_в$ = 750 МПа | Рассверливание | Р6М5<br>ВК8 | 16,2<br>10,8 | 0,4<br>0,6 | 0,2 | 0,5<br>0,3 | 0,2<br>0,25. | Есть |
| | Зенкерование | Р6М5<br>Т15К6 | 16,3<br>18,0 | 0,3<br>0,6 | | 0,5<br>0,3 | 0,3<br>0,25 | |
| | Развертывание | Р6М5<br>Т15К6 | 10,5<br>100,6 | 0,3<br>0,3 | 0,2 0 | 0,65<br>0,65 | 0,4 | |
| Конструкционная закаленная сталь, $\sigma_в$ = 600 – 1800 МПа, *HRC* 49 – 54 | Зенкерование | Т15К6 | 10,0 | 0,6 | 0,3 | 0,6 | 0,45 | |
| | Развертывание | | 14,0 | 0,4 | 0,75 | 1,05 | 0,85 | |
| Серый чугун, *НВ* 190 | Рассверливание | Р6М5<br>ВК8 | 23,4<br>56,9 | 0,25<br>0,5 | 0,1<br>0,15 | 0,4<br>0,45 | 0,125<br>0,4 | Нет |
| | Зенкерование | Р6М5<br>ВК8 | 18,8<br>105,0 | 0,2<br>0,4 | 0,1<br>0,15 | 0,4<br>0,45 | 0,125<br>0,4 | |
| | Развертывание | Р6М5<br>ВК8 | 15,6<br>109,0 | 0,2<br>0,2 | 0.10 | 0,5<br>0,5 | 0,3<br>0,45 | |
| Ковкий чугун, *НВ* 150 | Рассверливание | Р6М5<br>ВК8 | 34,7<br>77,4 | 0,25<br>0,5 | 0,1<br>0,15 | 0,4<br>0,45 | 0,125<br>0,4 | Есть |
| | Зенкерование | Р6М5<br>ВК8 | 27,9<br>143,0 | 0,2<br>0,4 | 0,1<br>0,15 | 0,4.<br>0,45 | 0,125<br>0,4 | Есть |
| | Развертывание | Р6М5<br>ВК8 | 23,2<br>148,0 | 0,2<br>0,2 | | 0,5<br>0,5 | 0,3<br>0,45 | Есть<br>Нет |

Таблица П2.2.3

## Значения коэффициента $C_V$ и показателей степени в формуле скорости резания при фрезеровании

| Фрезы | Материал режущей части | Операция | Параметры срезаемого слоя, мм | | | Коэффициент и показатели степени в формуле скорости резания | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | *B* | *t* | $S_Z$ | $C_V$ | *q* | *x* | *y* | *u* | *p* | *m* |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| *Обработка конструкционной углеродистой стали*, $\sigma_в$ = 750 МПа**.** | | | | | | | | | | | | |
| Торцовые | Т15К6*[1] | Фрезерование плоскостей | | | | 332 | 0.2 | 0.1 | 0,4 | 0.2 | 0 | 0,2 |
| | Р6М5 *[2] | | – | – | ≤0,1<br>>0,1 | 64,7<br>41 | 0.25 | 0,1 | 0,2<br>0,4 | 0,15 | 0 | 0,2 |
| Цилиндрические | Т15К6*[1] | | ≤35<br>>35 | ≤2<br>>2<br>≤2<br>>2 | – | 390<br>443<br>616<br>700 | 0,17<br>0,17 | 0,19<br>0,38<br>0,19<br>0,38 | 0,28<br>0,28 | –0,05<br>0,08 | 0,1<br>0,1 | 0,33<br>0,33 |
| | Р6М5 *[2] | | – | – | <0,1<br>>0,1 | 55<br>35,4 | 0,45 | 0,3 | 0,2<br>0,4 | 0,1 | 0,1 | 0,33 |
| Дисковые со вставными ножами | Т15К6*[1] | Фрезерование плоскостей и уступов | – | | <0,12<br>≥0,12 | 1340<br>740 | 0.2 | 0,4 | 0,12<br>0,4 | 0 | 0 | 0,35 |
| | | Фрезерование пазов | – | – | <0,06<br>>0,06 | 1825<br>690 | 0,2 | 0,3 | 0,12<br>0,4 | 0,1 | 0 | 0,35 |
| Дисковые со вставными ножами | Р6М5 *[2] | Фрезерование плоскостей, уступов и пазов | – | – | < 0,1<br>>0,1 | 75,5<br>48,5 | 0,25 | 0,3 | 0,2<br>0,4 | 0,1 | 0,1 | 0,2 |
| Дисковые цельные | Р6М5 *[2] | | – | – | – | 68,5 | 0,25 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,2 |
| Концевые с коронками | Т15К6*[1] | | – | – | – | 145 | 0,44 | 0,24 | 0,26 | 0,1 | 0,13 | 0,37 |
| Концевые с напаянными пластинами | | | – | – | – | 234 | 0,44 | 0,24 | 0,26 | 0,1 | 0,13 | 0,37 |
| Концевые цельные | Р6М5*[2] | | – | – | | 46,7 | 0,45 | 0,5 | 0,5 | 0,1 | 0,1 | 0,33 |

Продолжение табл. П2.2.3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Прорезные и отрезные | Р6М5*[2] | Прорезание пазов и отрезание | – | – | – | 53 | 0,25 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,2 |
| Фасонные с выпуклым профилем | Р6М5*[2] | Фасонное фрезерование | – | – | – | 53 | 0,45 | 0.3 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,33 |
| Угловые и фасонные с вогнутым профилем | | Фрезерование угловых канавок и фасонное | | | | 44 | 0,45 | 0.3 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,33 |
| Шпоночные двухперые | Р6М5*[2] | Фрезерование шпоночных пазов | – | | – | 12 | 0,3 | 0,3 | 0,25 | 0 | 0 | 0,26 |

*Обработка серого чугуна, НВ* 190

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Торцовые | Р6М5*[1] | Фрезерование плоскостей | – | – | – | 445 | 0,2 | 0,15 | 0,35 | 0,2 | 0 | 0,32 |
| | | | – | – | – | 42 | 0,2 | 0,1 | 0,4 | 0,1 | 0,1 | 0,15 |
| Цилиндрические | ВК6*[1] | | – | <2,5<br>≥2,5 | ≤0,2<br>>0,2<br>≤0,2<br>>0,2 | 923<br>588<br>1180<br>750 | 0,37<br>0,37 | 0,13<br>0,40 | 0,19<br>0,47<br>0,19<br>0,47 | 0,23<br>0,23 | 0,14<br>0,14 | 0,42<br>0,42 |
| | Р6М5*[1] | | | – | ≤0,15<br>>0,15 | 57,6<br>27 | 0,7 | 0,5 | 0,2<br>0,6 | 0,3 | 0,3 | 0,25 |
| Дисковые со вставными ножами | Р6М5*[1] | Фрезерование плоскостей, уступов и пазов | – | – | – | 85 | 0,2 | 0,5 | 0,4 | 0.1 | 0,1 | 0,15 |
| Дисковые цельные | Р6М5*[1] | | – | – | – | 72 | 0,2 | 0,5 | 0,4 | 0,1 | 0,1 | 0,15 |
| Концевые | Р6М5*[1] | Фрезерование плоскостей и уступов | – | – | – | 72 | 0,7 | 0,5 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,25 |
| Прорезные и отрезные | Р6М5*[1] | Прорезание пазов и отрезание | – | – | – | 30 | 0,2 | 0,5 | 0,4 | 0,2 | 0,1 | 0,15 |

Окончание табл.П2.2.3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Обработка ковкого чугуна, НВ* 150 | | | | | | | | | | | | |
| Торцовые | ВК6*[1] | Фрезерование плоскостей | – | – | ≤0,18<br>>0,18 | 994<br>695 | 0,22 | 0,17 | 0,1<br>0,32 | 0,22 | 0 | 0,33 |
| | Р6М5*[2] | | – | – | ≤0,1<br>>0,1 | 90,5<br>57,4 | 0,25 | 0,1 | 0,2<br>0.4 | 0,15 | 0,1 | 0,2 |
| Цилиндрические | Р6М5*[2] | | – | – | ≤0,1<br>>0,1 | 77<br>49,5 | 0,45 | 0,3 | 0.2<br>0,4 | 0,1 | 0,1 | 0,33 |
| Дисковые со вставными ножами | Р6М5*[2] | Фрезерование плоскостей, уступов и пазов | – | – | <0,1<br>>0,1 | 105,8<br>68 | 0,25 | 0,3 | 0,2<br>0,4 | 0,1 | 0,1 | 0.2 |
| Дисковые цельные | Р6М5*[2] | | – | – | – | 95,8 | 0,25<br>0,45 | 0,3<br>0,3 | 0,2<br>0,2 | 0,1<br>0,1 | 0,1 | 0,2 |
| Концевые | Р6М5 *[2] | Фрезерование плоскостей и уступов | – | – | – | 68,5 | | | | | 0,1 | 0,33 |
| Прорезные и отрезные | Р6М5 *[2] | Прорезание пазов и отрезание | – | – | – | 74 | 0,25 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,2 |

*[1] Без охлаждения.
*[2] С охлаждением.

**Примечание:** Скорость резания для торцовых фрез, рассчитанная по табличным данным действительна при главном угле в плане φ = 60°. При других величинах этого угла значения скоростей следует умножать на коэффициенты: при φ =15°– на 1,6; при φ = 30° – на 1,25; при φ = 45° – на 1,1; при φ = 75° – на 0,93;при φ = 90° – на 0,87.

Таблица П2.2.4

**Суммарная величина врезания $l_1$ и перебега $l_2$ при работе сверлами, зенкерами и развертками**

| Вид работы | | Диаметр инструмента $D$ | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 3 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 и более |
| | | Врезание $l_1$ + перебег $l_2$ | | | | | | | | | |
| Сверление напроход при заточке сверл | одинарной | 2 | 2,5 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 15 | 18 | 23 |
| | двойной | – | – | 6 | 8 | 10 | 15 | 17 | 18 | 22 | 27 |
| Сверление в упор | | 1,5 | 2 | 4 | 6 | 7 | 9 | 11 | 14 | 17 | 21 |
| Рассверливание при глубине резания | 5 | – | – | – | 4 | | 5 | | | 6 | |
| | 10 | – | – | – | – | 7 | 8 | | | 9 | |
| | 15 | – | – | – | – | – | – | 11 | | 12 | |
| | 20 | – | – | – | – | – | – | – | 14 | 15 | |
| | 30 | – | – | – | – | – | – | – | – | 18 | |
| Зенкерование напроход при глубине резания | 1 | – | – | – | 3 | | | 4 | | 5 | |
| | 3 | – | – | – | 5 | | | 6 | | 7 | |
| | 5 | – | – | – | – | 7 | | 8 | | 9 | |
| | 10 | – | – | – | – | – | 12 | 13 | | 14 | 15 |
| Зенкерование в упор | | – | – | – | 2 | | | 3 | | 4 | |
| Развертывание цилиндрических отверстий | напроход | – | 8 | 9 | 15 | 18 | 19 | | 24 | 25 | 26 |
| | в упор | – | 2 | 3 | | | | 4 | | | 5 |
| Центрование отверстий | | 1–2 | 2 | – | – | – | – | – | – | – | – |

Таблица П2.2.5

**Суммарная величина врезания $l_1$ и перебега $l_2$ при работе концевыми фрезами**

| Диаметр фрезы $D$ | Глубина резания $t$ | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 10 |
| 12 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | – | – | – | – |
| 14 | | | | | | | | | | |
| 16 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | – | – | – |
| 18 | | | | | | | | – | – | – |
| 20 | | | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | – | – | – |
| 22 | | | | | 11 | 12 | 13 | 14 | – | – |
| 25 | | | | 10 | 12 | 13 | 13 | 15 | – | – |
| 28 | 6 | 7 | 9 | 11 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | – |
| 30 | | | | 12 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | – |
| 35 | | | 10 | 13 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | – |
| 40 | 7 | 8 | 11 | 14 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
| 45 | 8 | 9 | 13 | 15 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |
| 50 | 8 | 11 | 14 | 16 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 24 |

Примечание. При чистовой обработке величину врезания и перебега для дисковых фрез следует брать вдвое больше приведенной в таблице

Таблица П2.2.6

## Обработка фрезами цилиндрическими, дисковыми, прорезными и фасонными

| Глубина резания, мм | Диаметр фрезы, мм | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 25 | 32 | 40 | 50 | 63 | 80 | 100 | 125 |
| | Врезание и перебег, мм | | | | | | | |
| 1 | 6,5 | 7 | 8,5 | 9 | 10 | 11 | 13 | 15 |
| 5 | 12 | 13 | 15 | 17 | 20 | 22 | 25 | 28 |
| 10 | – | 16 | 19 | 22 | 26 | 29 | 33 | 38 |
| 14 | – | – | – | 24 | 29 | 33 | 38 | 43 |
| 15 | – | – | – | 25 | 29 | 34 | 39 | 44 |
| 18 | – | – | – | – | 31 | 36 | 42 | 47 |

Примечание. При чистовой обработке в целях обеспечения чистой поверхности при выходе фрезы величину врезания и перебега для дисковых фрез следует **удвоить**

Таблица 2.2.7

## Сила резания *P*, Н, приходящаяся на 1 мм длины лезвия зуба протяжки

| Подача | Обрабатываемый материал | | |
|---|---|---|---|
| | Углеродистая сталь | Легированная сталь | Чугун |

| на один зуб $S_Z$, мм | *HB* ≤ 197 | *HB* 198 - 229 | *HB* > 229 | *HB* ≤ 197 | *HB* 198 - 229 | *HB* > 229 | серый | | ковкий |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | *HB* ≤ 180 | *HB* > 180 | |
| 0,01 | 65 | 71 | 85 | 76 | 85 | 91 | 55 | 75 | 63 |
| 0,02 | 95 | 105 | 125 | 126 | 136 | 158 | 81 | 89 | 73 |
| 0,03 | 123 | 136 | 161 | 157 | 169 | 186 | 104 | 115 | 94 |
| 0,04 | 143 | 158 | 187 | 184 | 198 | 218 | 121 | 134 | 109 |
| 0,06 | 177 | 195 | 232 | 238 | 255 | 282 | 151 | 166 | 134 |
| 0,08 | 213 | 235 | 280 | 280 | 302 | 335 | 180 | 200 | 164 |
| 0,10 | 247 | 273 | 325 | 328 | 354 | 390 | 207 | 236 | 192 |
| 0,12 | 285 | 315 | 375 | 378 | 407 | 450 | 243 | 268 | 220 |
| 0,14 | 324 | 357 | 425 | 423 | 457 | 505 | 273 | 303 | 250 |
| 0,16 | 360 | 398 | 472 | 471 | 510 | 560 | 305 | 336 | 276 |
| 0,18 | 395 | 436 | 520 | 525 | 565 | 625 | 334 | 370 | 302 |
| 0,2 | 427 | 473 | 562 | 576 | 620 | 685 | 360 | 402 | 326 |
| 0,2 | 456 | 503 | 600 | 620 | 667 | 738 | 385 | 427 | 349 |
| 0,25 | 495 | 545 | 650 | 680 | 730 | 810 | 421 | 465 | 376 |
| 0,30 | 564 | 615 | 730 | 785 | 845 | 933 | 476 | 522 | 431 |

Примечание. Значение силы резания приведены для нормальных условий эксплуатации: а) передние и задние углы зубьев оптимальные; б) величина износа не превышает допускаемую.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Обработка металлов резанием: Справочник технолога./А. А. Панов, В. В. Аникин, Н. Г. Бойм и др.; Под общ. ред. А. А. Панова.– М.: Машиностроение . 1988. – 736 с.: ил.

2. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Суслова. - М.:Машиностроение, 1986, 496 с., ил.

Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Суслова. - М.:Машиностроение-1, 2001. - 944 с., ил..

3. Альбом «Металлорежущие инструменты». – М.: 1979. Кучер А. М., Киватицкий М. М., Покровский А. А. Металлорежущие станки. – М.: Машиностроение, 1965.

# 3.РАБОТА. ВЫБОР ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА

## 3.1. Общие сведения.

Шлифование является одним из производительных методов обработки различных поверхностей. Парк станков для абразивной обработки достигает 20% общего станочного парка.

Обработка осуществляется абразивным инструментом (шлифовальные круги, бруски, сегменты, шкурки и т. п.), абразивные зерна которых являются режущими элементами. Абразивные зерна в инструменте закреплены связующим компонентом – связкой с обязательным наличием пор (рис.3.1).

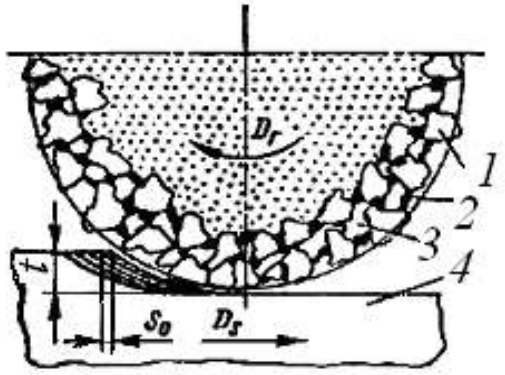



Рис. 3.1. Схема срезания припуска при шлифовании и конструктивные особенности абразивного инструмента: *1* – зерна; *2* – связка; *3* – поры,*4* – заготовка

## 3.2.Схемы обработки при шлифовании.

В современном машиностроении шлифованию подвергают различные поверхности деталей машин: плоские, цилиндрические, фасонные, внутренние, наружные и т. п. Существуют различные схемы шлифования этих поверхностей. Для всех способов шлифования главным движением резания является вращательное движение шлифовального круга $D_г$, а движение подачи $D_s$ совершает заготовка.

***Обработка заготовок на круглошлифовальных станках.*** На круглошлифовальных станках обрабатывают наружные поверхности заготовок тел вращения с прямолинейными образующими. При наружном круглом шлифовании возвратно-поступательное продольное движение (рис.3.2) подачи осуществляется столом с закрепленной на нем заготовкой. Круговое движение подачи заготовки производится передней бабкой шлифовального станка, а поперечное движение подачи шлифовальным кругом осуществляется на каждый ход стола или двойной ход стола вне зоны обработки.

В зависимости от направления поступательного движения подачи различают еще несколько видов круглого шлифования: глубинное; врезное шлифование и шлифование уступами (рис.3.3). Глубинное шлифование может производиться по схеме с продольным движении. При глубинном шлифовании с продольным движением подачи применяют круг с конусной *1* (режущая часть круга) и калибрующей *2* частями (рис.3.3, *а*).

Режущую часть шлифовального круга иногда выполняют ступенчатой, калибрующая часть может работать по схеме осциллирующего шлифования

.

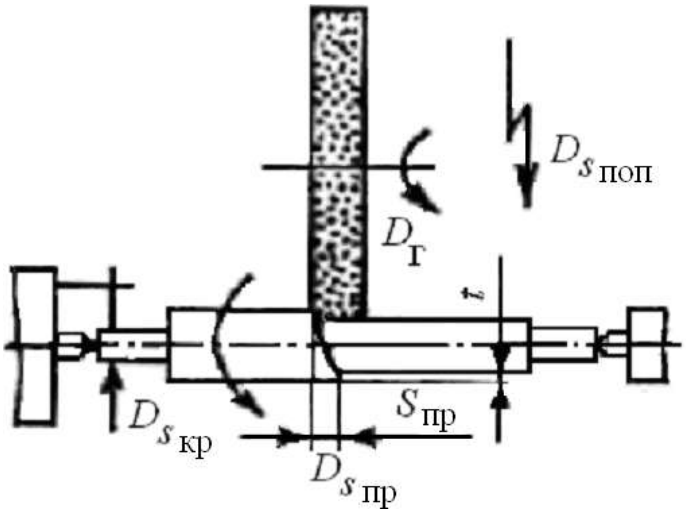



Рис. 3.2. Схема наружного круглого шлифования

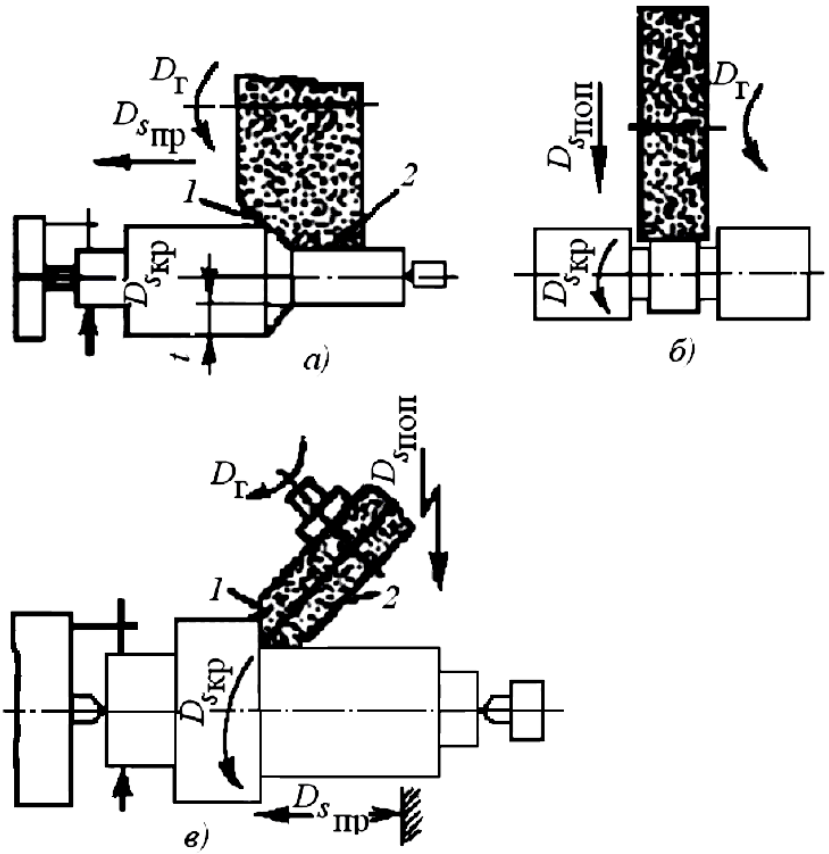



Рис. 3.3. Схемы наружного шлифования в центрах:
*а* - глубинное; *б* - врезное; *в* - шлифование двух взаимно перпендикулярных поверхностей.

При глубинном шлифовании снимается чаще всего припуск большой величины (0,1 – 0,8 мм), а иногда и более за один-два продольных хода.

В массовом и серийном производстве много деталей обрабатывают врезным шлифованием (рис.3.3, *б*). При врезном шлифовании обрабатывают шейки коленчатых валов, плунжеры, фасонные поверхности, кольцевые канавки и т. п. Движение подачи при врезном шлифовании обеспечивается только в одном направлении – перпендикулярно оси вращения обрабатываемой заготовки до определенного размера.

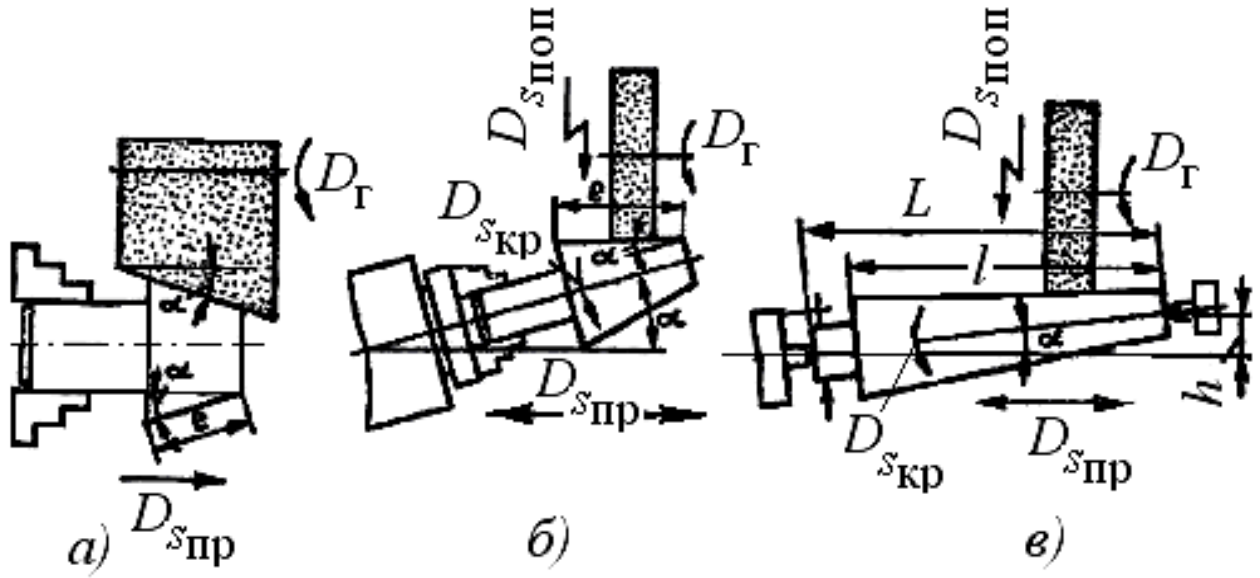
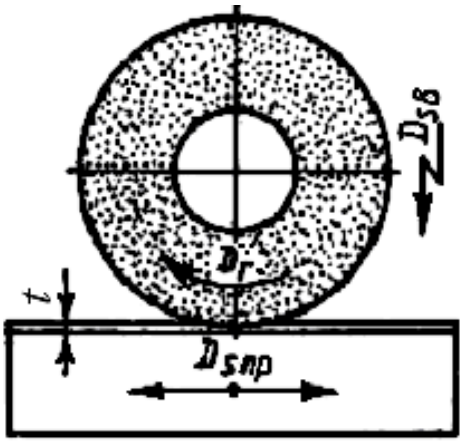



Рис. 3.4. Схемы обработки конических поверхностей
на круглошлифовальном станке.

***Обработка заготовок на плоскошлифовальных станках***. При плоском шлифовании периферией круга (рис.3.5) обеспечивается наиболее высокая точность обработки, лучшие показатели качества обработанной поверхности возможна обработка заготовок малой жесткости. При плоском шлифовании возвратно-поступательное продольное движение подачи ($D_{\text{в пр.}}$) и прерывистое движение поперечной подачи ($D_{\text{s поп}}$) совершает заготовка или шлифовальный круг.

Движение подачи круга на глубину резания осуществляется в крайнем положении стола по мере обработки всей плоскости. Если заготовка уже ширины круга, то вертикальное движение подачи осуществляется на каждый двойной ход заготовки

Рис. 3.5. Схема обработки заготовки на плоскошлифовальном станке периферией круга



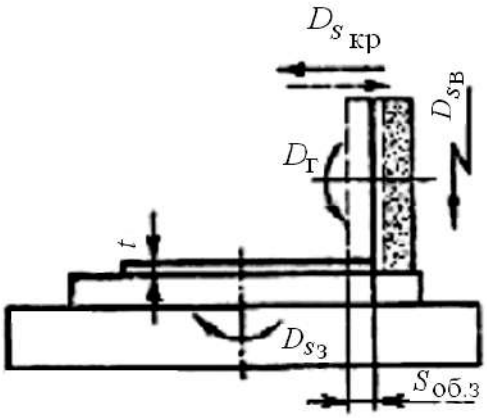




Рис.3.6. Схема обработки заготовок периферией круга на плоскошлифовальном станке с круглым столом

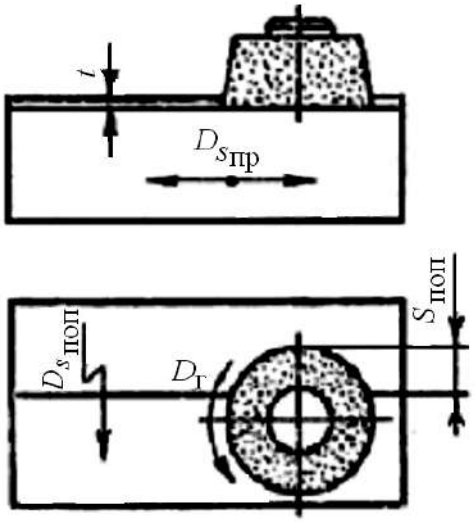



Рис. 3.7. Схема обработки на плоскошлифовальном станке торцом чашечного круга

Плоское шлифование торцом круга (рис.3.7) также может осуществляться на станках, подобных плоскошлифовальному с прямоугольным и круглым столом. Но в отличие от резания периферией круга при торцовом шлифовании одновременно участвует в резании намного больше режущих элементов-зерен (большая площадь контакта). В этой связи при торцовом шлифовании выделяется существенно больше теплоты и возможны прижог и коробление тонких заготовок. Чтобы уменьшить выделение теплоты, часто используют сегментные торцовые круги с меньшей площадью контакта.

***Обработка заготовок на внутришлифовальных станках***. Внутренним круглым шлифованием обрабатывают внутренние поверхности. Обработка производится следующими методами: шлифование с продольным движением подачи (рис.3.8, *а, б*), врезное шлифование с поперечным движением подачи, врезное шлифование с дополнительной осцилляцией круга (рис.3.8, *в*), шлифование с планетарным $D_{S\ пл.}$ движением круга (рис.3.8, *г*).

***Бесцентровое круглое наружное шлифование***. Сущность бесцентрового шлифования заключается в том, что заготовка в процессе обработки не закрепляется в центрах и других зажимных приспособлениях, а базируется на опорном ноже станка и ведущем круге (рис. 3.9). Таким образом, возможно шлифование большими партиями не только заготовок колец, гильз, но и заготовок, имеющих

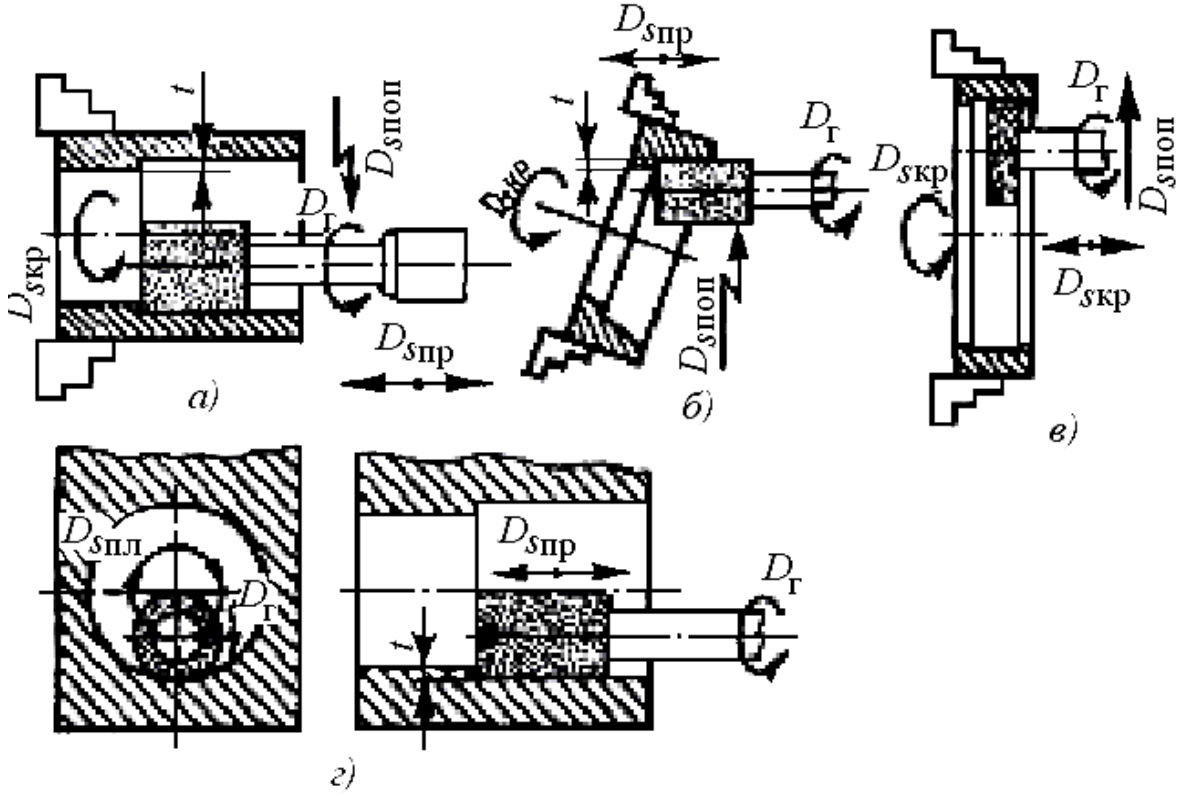



Рис.3.8. Схемы обработки заготовок на внутришлифовальных станках

большую длину и малый диаметр. Обработка заготовки (заготовок) *2* заключается в следующем. Шлифовальный *3* и ведущий *1* круги вращаются с разной частотой. Окружная скорость шлифовального круга в 50 – 60 раз выше окружной скорости ведущего круга. Конструктивно ведущий круг выполнен так же, как шлифовальный, но на основе вязких, вулканитовых связующих веществ, обеспечивающих контакт с заготовкой практически без скольжения.

Рассмотрим схему бесцентрового шлифования напроход (рис. 3.9). Меняя угол наклона ведущего круга α, можно изменять в значительной

степени угловую скорость и скорость поступательного движения заготовки. При α = 0 $V_{з\,пр.} = 0$ происходит врезное шлифование.

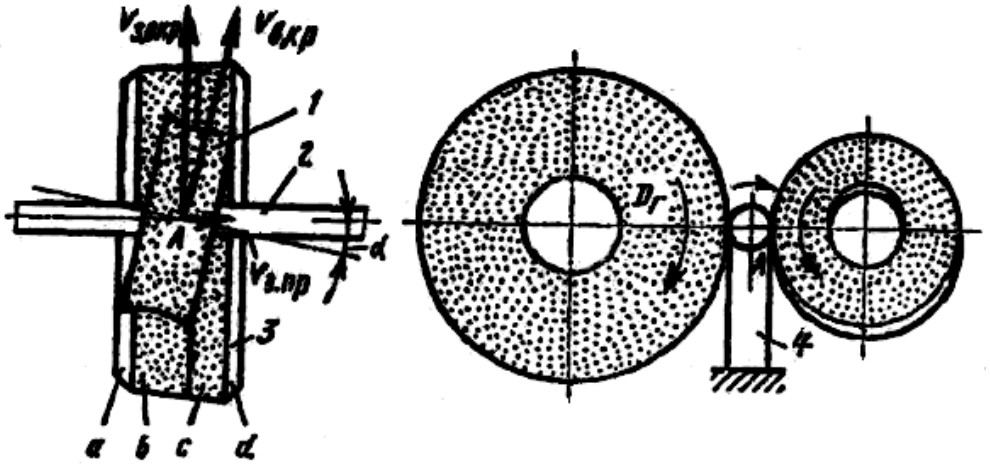



Рис. 3.9. Схема обработки на бесцентрово-шлифовальном станке.

## 3.2.Элементы режима резания при шлифовании.

Элементы срезаемого слоя при шлифовании относятся не к единичным режущим зернам, а к их совокупности – режущей поверхности абразивного инструмента. Основными элементами режима резания при шлифовании являются: окружная скорость круга $V_{кр}$, окружная скорость (перемещения) заготовки $V_з$, глубина резания $t$, подача $S$.

Элементы режима резания при плоском, круглом шлифовании показаны на рис.3.2, 3.5, 3,7; а при внутреннем шлифовании – на рис. 3.8.

Скоростью (м /с) резания при шлифовании $V_{кр}$ называют линейную скорость на наибольшей окружности шлифовального круга $V_{кр} = \pi D n$, где $n$ – частота вращения, с $^{-1}$.

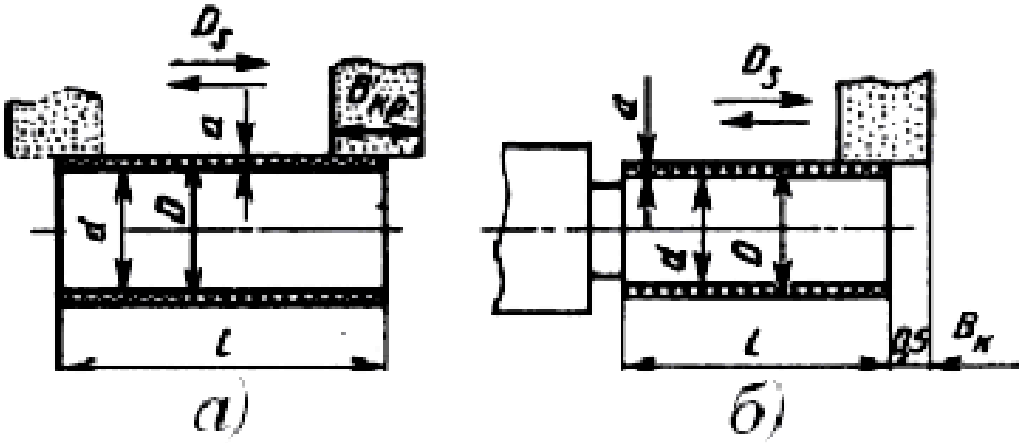
Скоростью перемещения заготовки при шлифовании называют: при плоском шлифовании – скорость перемещения стола, при круглом шлифовании – окружную скорость заготовки.

Поперечной подачей $S_{поп}$(при плоском шлифовании) и продольной подачей $S_{прод}$ (при круглом и внутреннем шлифовании) называют перемещение точки круга вдоль оси за один оборот, ход или двойной ход заготовки. Поперечную подачу измеряют в долях высоты круга $H$;
$S_{поп} = k \cdot H$, где $k$ – коэффициент (табл.П3.1.9).

Глубиной резания при шлифовании называют слой металла между обработанной и обрабатываемой поверхностью, снимаемый за один рабочий ход.

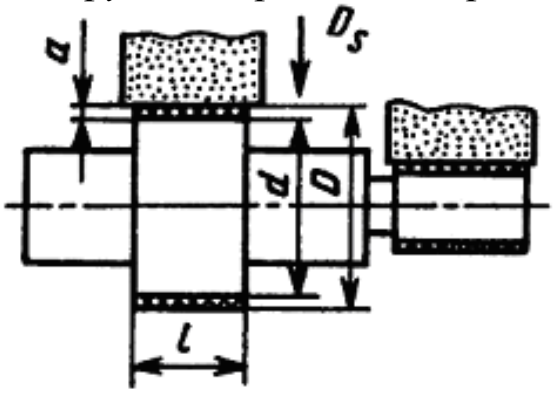
## 3.3.Определение основного времени при шлифовальных работах.

*Наружное круглое шлифование методом продольной подачи напроход (а) и в упор (б).*




$$T_{\text{о}} = \frac{L}{S_{\text{прод}} \cdot n_{\text{д}}} \cdot i \cdot K; \quad i = \frac{a}{S_{2\text{х}}}$$

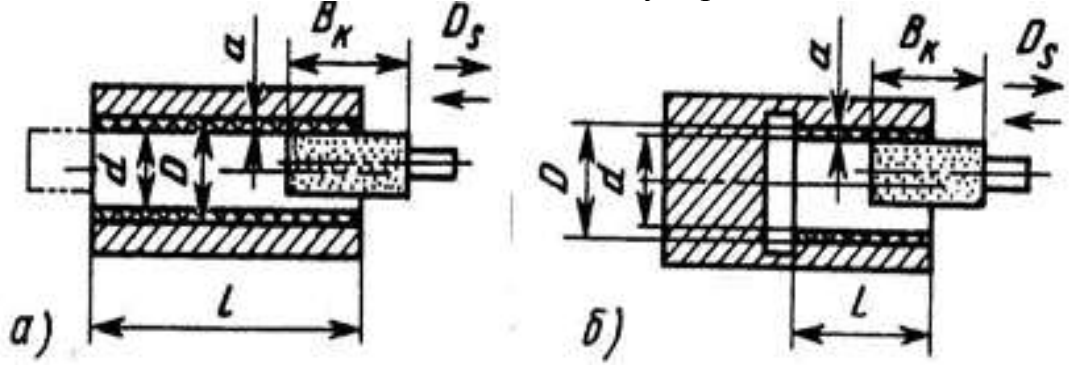
*Наружное врезное шлифование*



$$T_{\text{о}} = \frac{L}{n_{\text{д}} \cdot S_{\text{рад}}} \cdot K; \quad L = a = \frac{D-d}{2}.$$

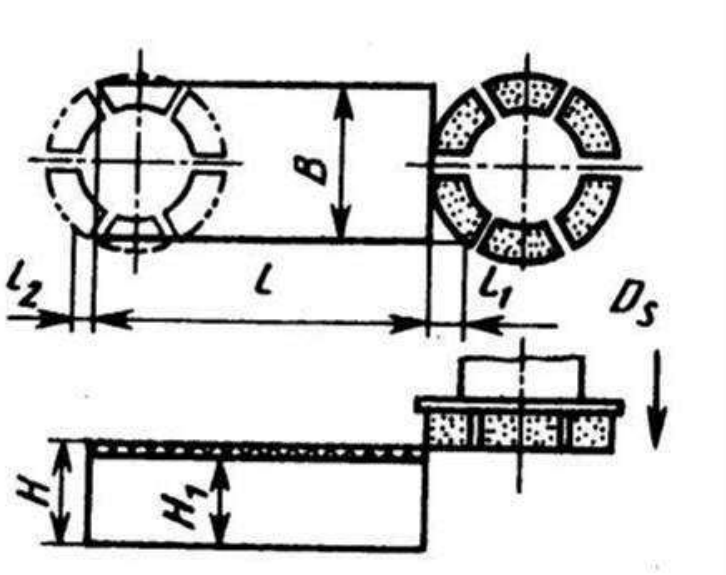
*Шлифование отверстий методом продольной подачи*:

*а* – сквозных; *б* – в упор



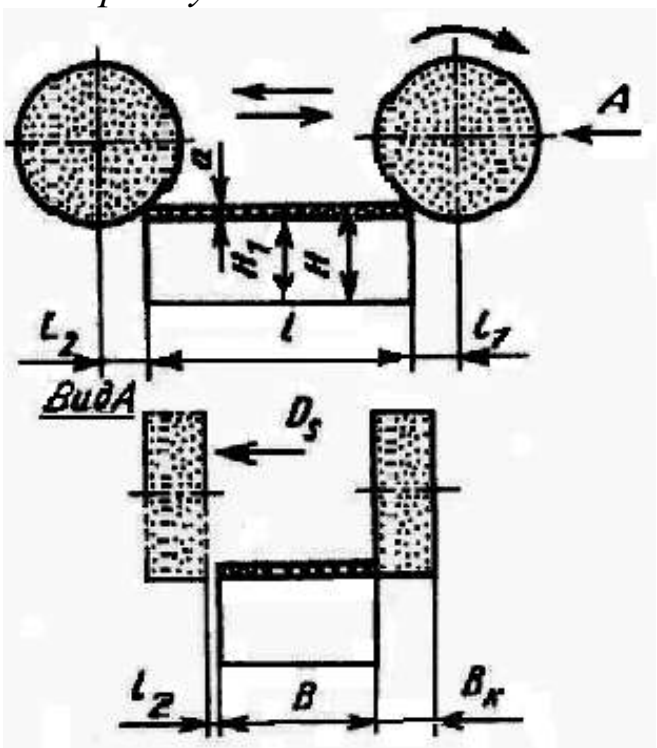

$$T_{\text{о}} = \frac{L}{S_{\text{прод}} \cdot n_{\text{д}}} \cdot i \cdot K; \qquad i = \frac{a}{S_{2\text{х}}}$$

*Плоское шлифование торцом круга на станках с прямоугольным столом*



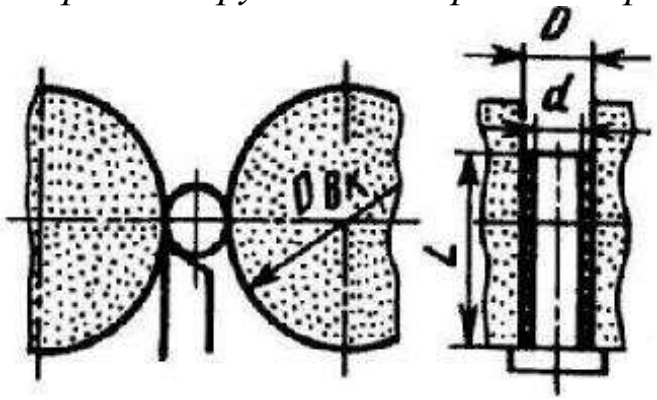

$$T_{\text{о}} = \frac{L \cdot K}{S_{\text{прод}} \cdot n_{2\text{х}}} \cdot i; \quad L = a = H - H_1$$

*Плоское шлифование периферией круга на станках с прямоугольным столом*




$$T_{\text{о}} = \frac{L \cdot K}{S_{\text{прод}} \cdot n_{2\text{х}} \cdot Q} \cdot i; \quad i = \frac{a}{S_{2\text{х}}}; \quad L = B + B_{\text{к}} + 10$$

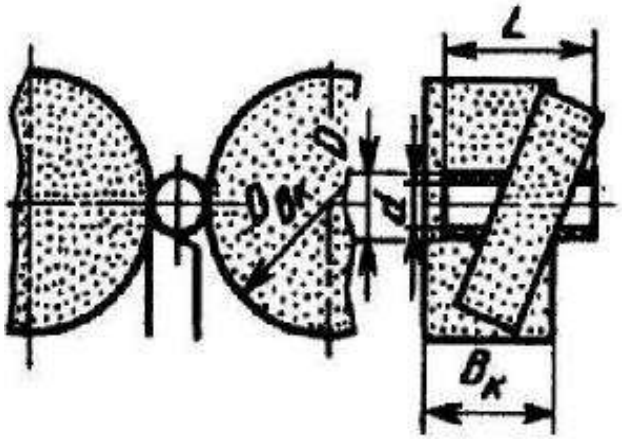
*Бесцентровое наружное шлифование врезное*




$$T_{\text{о}} = \frac{L}{n_{\text{д}} \cdot S_{\text{рад}}} \cdot K; \quad n_{\text{д}} = \frac{n_{\text{вк}} \cdot D_{\text{вк}}}{D}; \quad L = a = \frac{D-d}{2},$$

где $D_{\text{вк}}$ – диаметр ведущего круга

*методом продольной подачи*




$$T_{\text{о}} = \frac{L \cdot i}{S_{\text{м}}}.$$

## 3.4.Абразивные материалы.

Рабочими элементами любого абразивного инструмента являются классифицированные частицы абразивного материала, твердость которых выше твердости обрабатываемого материала. В качестве абразивного материала широко используются электрокорунды, карбид кремния, алмаз, кубический нитрид бора (эльбор). Алмазно-абразивной обработке подвергают самые различные поверхности и материалы. Наиболее широкое применение в машиностроении находят круги из электрокорунда и карбида кремния (рис. 22.12) по ГОСТ 2424 – 83, алмазные круги по ГОСТ 16167 – 80, 16172 – 80Е и др., а также эльборовые круги по ГОСТ 17123 – 79Е.

Электрокорунды (кристаллическая окись алюминия $A1_2O_3$) получают из естественных бокситов с незначительными примесями некоторых материалов. Выпускают следующие разновидности электрокорундов: нормальный (13А – 16А), белый (22А – 25А), хромистый (32А – 34А), титанистый (37А), монокорунд (43А – 45А), циркониевый (38А). По мере возрастания номера индекса растет процентное содержание окиси алюминия и увеличивается режущая способность. Легируя глинозем в процессе плавки титаном, цирконием, хромом, получают абразивные материалы с требуемыми свойствами.

Карбид кремния (карборунд) содержит 97 – 99 % SiC и незначительные примеси других элементов. Выпускают две разновидности карбида кремния: черный (53С, 54С) и зеленый (63С, 64С). Зеленый карбид кремния более хрупок, чем черный, и применяется для обработки чугуна, твердых сплавов цветных металлов, камня. Черный карбид кремния более прочен и применяется в аналогичных случаях, но более тяжелых условиях обработки.

Правильно подобранный круг работает в частичном режиме самозатачивания, т. е. изношенные зерна частично скалываются или вырываются из режущей поверхности круга, образуя или обнажая новые режущие кромки. Поэтому правильный выбор шлифовального круга имеет большое значение

## 3.5.Выполнение работы.

3.5.1.Цель работы.

Научиться выбирать шлифовальные круги в зависимости от материала детали и требований, предъявляемых к ней, изучить шлифовальный станок.

3.5.2.Задание по работе.

Изучить шлифовальный станок. По полученному заданию выбрать схему шлифования и круг. Ознакомиться с работой станка.

3.5.3.Ход работы.

Начертить схему обработки детали на шлифовальном станке, указав стрелками движение резания, движение подачи и вспомогательного движения.

Выбрать станок для шлифования заданной детали по техническим характеристикам станка [1].

Выбрать тип круга по области применения (табл. П3.1.1).

Основные размеры круга принимаются по техническим характеристикам станка [1].

Выбрать примерную характеристику круга в зависимости от материала детали и ее шероховатости (табл. П3.1.2).

В выбранной примерной характеристике отсутствуют ряд параметров круга, предусмотренных стандартом, поэтому ее необходимо дополнить.

Все параметры, входящие в характеристику круга необходимо расшифровать, указав:

а) абразивный материал – условное обозначение и область применения (табл. П3.1.3), получение абразивного материала, микротвердость, теплоустойчивость (табл. П3.1.4);

б) зернистость инструмента. Уточняется в зависимости от условий обработки (табл.П3.1.5), обозначается по ГОСТ 3647 – 80. Уточняется размер зерна основной фракции и выбирается индекс обозначения содержания зерна в основной фракции (процент). В зависимости от выбранного по условиям обработки процентного содержания основной фракции, номер зернистости в полной характеристике круга дополняется буквенным индексом – В, П, Н, Д;

в) твердость инструмента – параметр, характеризующий способность инструмента сопротивляться нарушению сцепления между зернами и связкой при сохранении характеристик инструмента в пределах установленных норм (табл. П3.1.6);

г) структура абразивного инструмента в примерной характеристике не приведена, поэтому в соответствии с требованиями ГОСТ 2424 – 83 ее необходимо выбрать по таблице П3.1.7 и привести к полной характеристике. Номер структуры обозначает соотношение объемов шлифовального материала, связки и пор в абразивном инструменте;

д) связка абразивного круга в примерной характеристике не указана, поэтому для полной характеристики ее необходимо выбрать по табл.П3.1.8 в соответствии с примерной характеристикой предназначена для закрепления абразивных зерен и наполнителя и является веществом или совокупностью веществ;

е) в полной характеристике абразивного круга указывается окружная скорость круга. Скорость ограничивается прочностью инструмента, принимается по табл.П3.1.8;

ж) класс точности инструмента. В зависимости от требований к зерновому составу, предельных отклонениям поверхностей, их взаимному расположению, наличию сколов, трещин и раковин абразивные круги выпускаются трех классов точности: АА, А и Б. В зависимости от требуе-

мого класса точности необходимо учитывать, что для кругов класса Б используют шлифовальные материалы со всеми индексами – В, П, Н, Д; для кругов класса точности А – только с индексами В, П, Н; для кругов класса точности АА – только с индексами В и П. Номинальные размеры инструмента и их предельные отклонения указаны в ГОСТ 2424 – 84 [5].

з) класс неуравновешенности инструмента. Во многом определяет производительность обработки, качество поверхности детали, стойкость шлифовального круга – один из показателей качества круга.

Согласно ГОСТ 3060 – К установлены четыре класса неуравновешенности кругов, обозначаемые цифрами 1, 2, 3 и 4.

Для кругов класса АА класс неуравновешенности должен быть первым, для кругов класса А – первым или вторым, для кругов точности Б – первым, вторым или третьим. Цифра класса неуравновешенности указывается в полной характеристике.

и) все выбранные параметры составляют полную характеристику абразивного круга.

к) По таблицам [1] или П3.1.9 определяются режимы резания.

л) По полученным данным изображают эскиз круга с предельными отклонениями (табл. )**9999999999**

**Пример:**

*ПП 100 × 50 × 20 24А 10П С2 7 К5 35 м/с А 1кл. ГОСТ 2424 - 83*

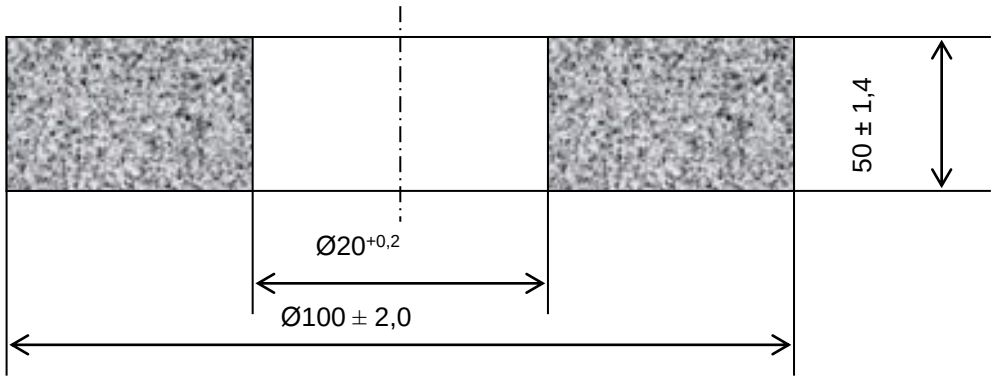



Рис. 3.10

Круг шлифовальный: тип ПП, $D$ = 100, $H$ =50, $d$ = 20, белого электрокорунда марки 24А, зернистости 10П, степень твердости С2, структура 7, связка керамическая К5, рабочая скорость 35 м/с, класс точности А, класс неуравновешенности 1.

3.5.4.Отчетность по работе.

Отчет выполняется на бланке. Все рисунки и подписи к ним выполняются аккуратно карандашом

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3.1

Таблица П3.1.1

**Применение основных типов абразивных кругов [1, 2]**

| Вид круга | Тип | Область применения |
|---|---|---|
| Плоский прямого профиля | ПП | Круглое наружное при $D < 1000$ мм. Внутреннее при $D \leq 150$ мм. Бесцентровое при $D \leq 600$мм. Плоское периферией круга. Заточка инструментов, резьбо-, шлице- и зубошлифование. |
| Плоский с выточкой | ПВ | Круглое внутреннее цилиндрическое шлифование шейки и торца при внутреннем шлифовании. |
| Плоский с конической выточкой | ПВК | Круглое шлифование шейки и торца вала. |
| Плоский с двухсторонней конической выточкой | ПВДК | |
| Плоский с двусторонней выточкой | ПВД | Круглое, плоское шлифование. Ведущий круг для бесцентрового шлифования. |
| Плоский с запрессованными крепежными элементами | ПН | Обдирочное шлифование. |
| Плоский с двусторонним коническим профилем | 2П | Заточка многолезвийных инструментов, шлифование зубьев шестерен, резьбошлифование |
| Плоский с коническим профилем | 3П | |
| Кольцо | К | Плоское шлифование |
| Чашечный цилиндрический | ЧЦ | Заточка инструмента, плоское шлифование направляющих станин станков |
| Чашечный конический | ЧК | |
| Тарельчатый | Т | Заточка и доводка передних граней зубьев фрез, заточка червячных фрез |

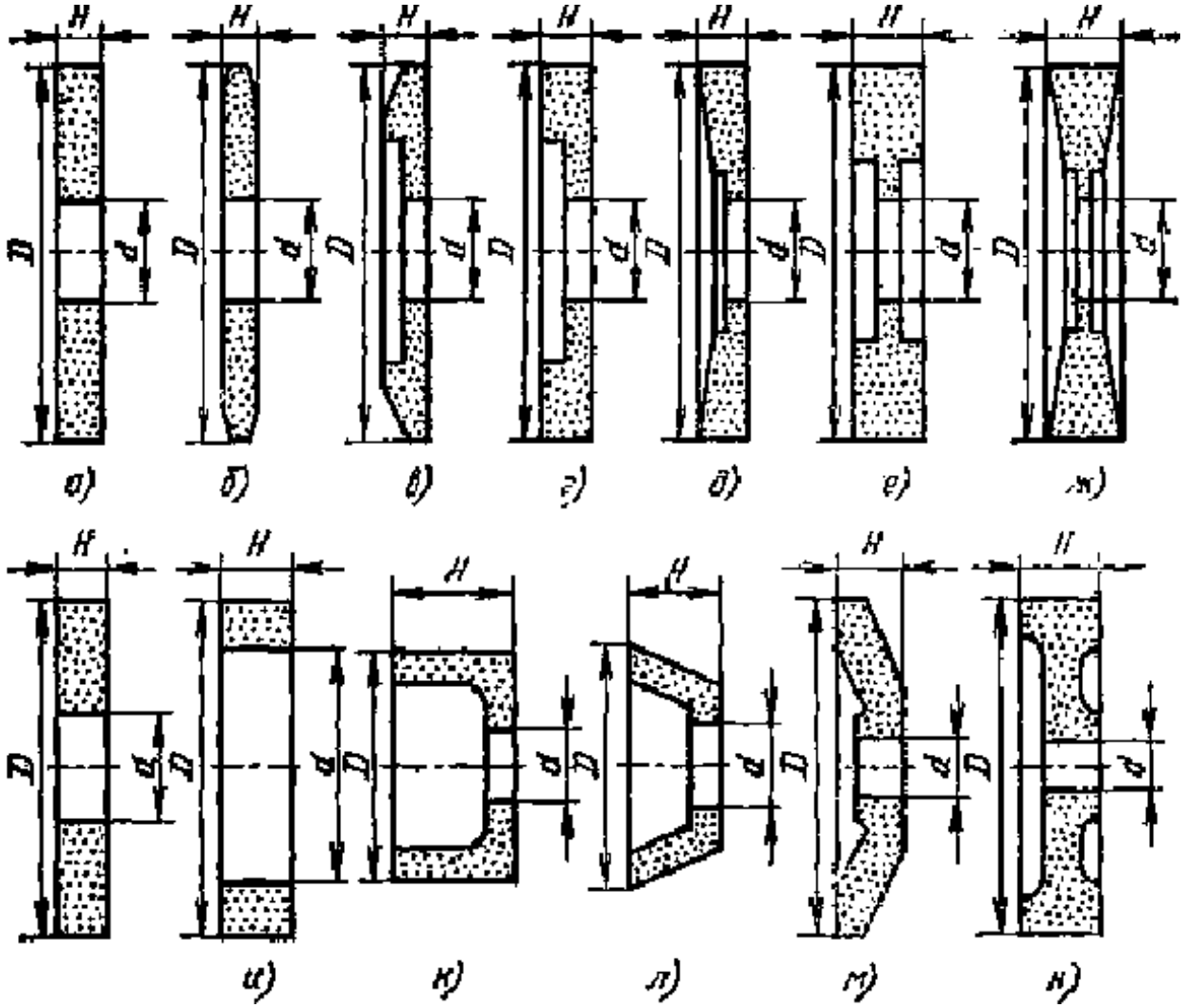


Рис.3.11. Форма сечений шлифовальных кругов по ГОСТ 2424 – 83:

*а* – с прямым профилем (ПП); *б* – с двусторонним коническим профилем (2П); *в* – с коническим профилем (ЗП); *г* – с выточкой (ПВ); *д* – с конической выточкой (ПВК); *е* – с двусторонней выточкой (ПВД); *ж* – с двусторонней конической выточкой (ПВДК); *з* – специальный (ПН); *и* – кольцевой (К); *к* – чашечный цилиндрический (ЧЦ); *л* – чашечный конический (ЧК); *м* – тарельчатый (Т); *н* – с двусторонней выточкой и ступицей (ПВДС).

## Выбор примерной характеристики

| Вид шлифования | Шероховатость, мкм | Конструкционная сталь | |
|---|---|---|---|
| | | незакаленная | закаленная |
| Круглое наружное | 3,2 - 5,0<br>1,6 - 2,5<br>0,8 - 1,25<br>0,4 - 0,63 | 15А 40-50 СМ2-С1К<br>15А 32-40 С1-С2К<br>15А, 23А 32-40 С1СТ1К<br>23А, 16-25 С2СТ1К | 15А 40-50 СМ1-СМ2К<br>15А 32-40 СМ2-С1К<br>15А, 23А 32-40 СМ2С1К<br>23А 16-25 С1-С2К |
| Круглое внутреннее | 3,2 - 5,0<br>1,6 - 2,5<br>0,8 - 1,25<br>0,4 - 0,63 | 15А 40-50 СМ2-С1К<br>15А 32-40 С1-С2К<br>15А, 23А 25 С2К<br>15А, 23А 16 С2К | 15А 40-50 СМ2К<br>15А 32-40 СМ2-С1К<br>15А, 23А 25 С1К<br>15А, 23А 16 С2К |
| Плоское периферией круга | 3,2 - 5,0<br>1,6 - 2,5<br>0,8 - 1,25<br>0,4 - 0,63 | 15А 50 СМ2К<br>15А 40 СМ2К<br>15А 25 С1К<br>15А 16 С1К | 15А 50 М3-СМ1К<br>15А 40 М3-СМ1К<br>15А 25 СМ1-СМ2К<br>15А 16 СМ1-СМ2К |
| Плоское торцом круга | 3,2 - 5,0<br>1,6 - 2,5<br>0,8 - 1,25<br>0,4 - 0,63 | 15А 50 СМ1Б<br>15А 40 СМ1Б<br>15А 25 СМ2Б<br>15А 25 СМ2Б | 15А 50 СМ1-СМ2Б<br>15А 40 М2-СМ1Б<br>15А 25 М3-СМ1Б<br>15А 25 М3-СМ1Б |
| Бесцентро-вое | 3,2 - 5,0<br>1,6 - 2,5<br>0,8 - 1,25<br>0,4 - 0,63 | 15А 50 С2К<br>15А 40 СТ1К<br>15А, 23А 32 СТ1К<br>23А 16-25 СТ2К | 15А 50 СМ2-С1К<br>15А 40 СМ2-С2К<br>15А, 23А 32 СМ1-С1К<br>23А 16-25 С1-СТ1К |

Таблица П3.1.2

**абразивных кругов**

| Быстрорежущая закаленная сталь | Чугун и бронза | Твердый сплав |
|---|---|---|
| 23А 40-50 СМ1К<br>23А 32-40 СМ1К<br>44А, 23А 32-40 СМ2К<br>44А, 23А 16-25 СМ2К | 53С 40-50 СМ1К<br>53С 32-40 СМ1К<br>15А, 53С 32-40 СМ2К<br>15А, 53С 16-25 СМ2К | 63С 40-50 СМ1К<br>63С 32-40 СМ1К<br>63С 32-40 СМ2БК<br>63С 16-25 СМ2БК |
| 23А 40-50 СМ2-С1К<br>23А 32-40 СМ2-С1К<br>44А,23А32-40СМ1-СМ2К<br>44А,23А16-25СМ1-СМ2К | 53С 50 СМ1К<br>53С 40 СМ1К<br>53С, 15А 25 СМ2К<br>53С, 15А 16 С1К | 63С 40-50 М3К<br>63С 32-40 М3К<br>63С 25-32 СМ1К<br>63С 16-25 СМ1К |
| 23А 40-50 СМ2-С1К<br>23А 32-40 СМ2-С1К<br>23А 32-40 СМ1-СМ2К<br>23А 16-25 СМ1-СМ2К | 53С, 15А 50 СМ2К<br>53С, 15А 40 СМ2К<br>53С, 15А 25 С1К<br>53С, 15А 16 С1К | 63С 40-50 СМ1К<br>63С 32-40 СМ2К<br>63С 32-40 М3-СМ1К<br>63С 16-25 М3-СМ1К |
| 15А 50-80 СМ1-СМ2Б<br>15А 40-50 СМ1-СМ2Б<br>15А 32-40 М3-СМ2Б<br>15А 25 М3-СМ2Б | 53С, 15А 50 СМ2Б<br>53С, 15А 40 СМ2Б<br>53С, 15А 25 С1Б<br>53С, 15А 25 С1Б | 63С 40-50 М3-СМ1Б<br>63С 32-40 М3-СМ1Б<br>63С 32-40 М2-М3Б<br>63С 16-25 М2-М3Б |
| 23А 40-50 СМ1-СМ2К<br>23А 32-40 СМ1-СМ2К<br>44А,23А 32-40 М3-СМ1К<br>44А,23А 16-25 М3-СМ1К | 53С 50 СМ2К<br>53С 40 СМ2К<br>53С, 15А 25 С1К<br>53С, 15А 16 С2К | 63С 32-40 СМ1К<br>63С 32-40 СМ1К<br>63С 25 СМ1К<br>63С 16 М3-СМ1К |

Таблица П3.1.3

**Марки и область применения абразивных материалов [1]**

| Материал зерна, марка | Область применения |
|---|---|
| 1 | 2 |
| Электрокорунд нормальный 12А, 13А, 14А, 15А | Обдирочное шлифование стальных заготовок кругами на органических связках, обработка углеродистой и легированной стали, ковкого и высокопрочного чугуна, легированной бронзы, никелевых и алюминиевых сплавов. Шлифование стальных заготовок кругами на органических и неорганических связках. Предварительное шлифование с большим объемом съема и получистовое шлифование. |
| Электрокорунд белый 23А,22А, 24А,25А | То же. Шлифование закаленных стальных заготовок кругами на всех связках. Окончательное и профильное шлифование, резьбошлифование инструментальной и легированной конструкционной стали. Скоростное шлифование, доводка стальных закаленных заготовок. Шлифование труднообрабатываемых сталей и сплавов. |
| Электрокорунд хромистый 32А, 33А, 34А | Шлифование доводка и отделка изделий из углеродистой и конструкционной сталей в незакаленном и закаленном состояниях. Применяется для заточки режущего инструмента. |
| Электрокорунд титанистый 37А | Скоростное шлифование стальных заготовок кругами на керамической и бакелитовой связках. Предварительное шлифование с увеличенным съемом металла. |
| Электрокорунд циркониевый 38А | Обдирочное силовое шлифование стальных заготовок кругами на бакелитовой связке при высоких скоростях и подачах. |
| Микрокорунд 43А, 44А | Шлифование и заточка. Шлифование труднообрабатываемых сталей и сплавов инструментом на керамических связках, прецизионное шлифование деталей сложных профилей. |
| Электрокорунд хромотитанистый 91А, 92А, 93А, 94А | Шлифование на получистовых и чистовых режимах закаленных изделий из углеродистых, конструкционных, быстрорежущих и труднообрабатываемых сталей кругами на всех связках. Шлифование стальных закаленных и незакаленных заготовок кругами на керамической и бакелитовой связках. |

Окончание табл.П.3.1.3

| 1 | 2 |
|---|---|
| Карбид кремния черный 53С, 53С, 54С | Обработка заготовок из чугуна, цветных металлов, вольфрамовых твердых сплавов. Тяжелые обдирочные и заточные работы (53С). Обработка заготовок из чугуна, цветных металлов и вольфрамовых твердых сплавов. |
| Карбид кремния зеленый 62С,63С,64С | Обработка заготовок из чугуна, алюминия, меди инструментом на всех связках. Обработка титановых и титанотанталовых твердых сплавов инструментом на всех связках. Обработка заготовок из чугуна, алюминия, меди инструментом на всех связках. Скоростное шлифование заготовок из чугуна заготовок кругами на керамической связке. Чистовая заточка твердосплавного инструмента. |

Таблица П3.1.4

**Получение абразивного материала, микротвердость, теплоустойчивость**

| Абразивный материал | Получение | Микротвердость, кГс /мм | Теплоустойчивость, °С |
|---|---|---|---|
| Электрокорунд нормальный | в дуговых печах восстановительной плавки высокосортного углеродистого материала и железной стружки | 1900 – 2000 | 1700 – 1800 |
| Электрокорунд белый | расплавлением глинозема (чистой окиси алюминия) в дуговой печи | 2000 – 2100 | 1700 – 1800 |
| Электрокорунд хромистый | в дуговых печах плавки глинозема с добавкой окиси хрома (до 2%) | 2000 – 2200 | 1700 – 1800 |
| Электрокорунд циркониевый | в дуговых печах плавки глинозема и двуокиси циркония | 2300 – 2400 | 1900 – 2000 |

Окончание табл.П3.1.4

| Абразивный материал | Получение | Микротвердость, кГс/мм | Теплоустойчивость, °С |
|---|---|---|---|
| Электро-корунд титанистый | Сплав окиси алюминия с окисью титана | 2200 – 2300 | 1700 – 1800 |
| Моно-корунд | Сплавлением в электродуговых печах боксита с сернистым железом и восстановителем. После выщелачивания шлака материал распадается на монокристальные частицы | 2300 – 2400 | 1700 – 1800 |
| Карбид кремния черный | Сырье: жильный кварц, кварцевые пески, кварциты, нефтяной кокс, антрацит. В электрических печах сопротивления силицированием частиц углерода | 3300 – 3600 | 1300 – 1400 |
| Карбид кремния зеленый | – " – | 3300 – 3600 | 1300 – 1400 |

Таблица П3.1.5

**Зернистость абразивных материалов [1]**

<table>
<tr><th rowspan="2">Зернистость по ГОСТ 3647 – 80</th><th rowspan="2">Размер основной фракции, мкм</th><th colspan="4">Индекс обозначения содержания основной фракции</th><th rowspan="2">Область применения</th></tr>
<tr><th>В</th><th>П</th><th>Н</th><th>Д</th></tr>
<tr><td>200<br>160</td><td>2500 – 2000<br>2000 – 1600</td><td rowspan="8">55</td><td rowspan="6">45</td><td rowspan="6">41</td><td>Обдирочное силовое шлифование</td></tr>
<tr><td>125<br>100<br>80</td><td>1600 – 1250<br>1250 – 1000<br>1000 – 800</td><td>Обдирочные операции; зачистка отливок, поковок и др. заготовок</td></tr>
<tr><td>63<br>56</td><td>800 – 630<br>630 – 500</td><td>Предварительное круглое нарезание, внутреннее, бесцентровое и плоское шлифование с шероховатостью поверхности Ra = 2,5 ÷ 0,63. Шлифование вязких материалов отреза, правка инструмента.</td></tr>
<tr><td>40<br>32</td><td>500 – 400<br>400 – 315</td><td>Предварительное и чистовое шлифование деталей с шероховатостью поверхности Ra = 2,5 ÷ 0,32. Заточка режущего инструмента</td></tr>
<tr><td>25<br>20<br>16</td><td>315 – 250<br>250 – 200<br>200 – 160</td><td>Чистовое шлифование до шероховатости Ra = 1,2 ÷ 0,16. Шлифование хрупких материалов</td></tr>
<tr><td>12<br>10</td><td>160 – 125<br>125 – 100</td><td>Отделочное шлифование до шероховатости Ra = 0,63 ÷ 0,16. Предварительное хонингование.</td></tr>
<tr><td>8<br>6</td><td>100 – 80<br>80 – 63</td><td colspan="2" rowspan="2">40</td><td>Чистовое и тонкое шлифование деталей из твердых сплавов, металлов, стекла и других неметаллических материалов. Резьбошлифование, чистовое хонингование</td></tr>
<tr><td>5<br>4</td><td>63 – 50<br>50 – 40</td><td>Отделочное шлифование хрупких материалов, резьбошлифование</td></tr>
</table>

Таблица П3.1.6

**Маркировка и применение инструмента в зависимости от вида обработки [1]**

| Область применения | Обозначение степени твердости по ГОСТу | Твердость круга |
|---|---|---|
| Правка абразивных инструментов, шлифование торцов шарикоподшипников | ЧТ2, ЧТ1 ВТ2, ВТ1 | Чрезвычайно твердый, Весьма твердый |
| Обдирочные операции, ведущиеся вручную; отрезка; круглое наружное шлифование методом врезания ведущие круги бесцентрового шлифования; хонингование отверстий малого диаметра. | Т2, Т1, СТ3, СТ2 | Твердый, Среднетвердый |
| Предварительное круглое наружное и бесцентровое шлифование сталей (преимущественно незакаленных) и чугуна. Хонингование и резьбошлифование кругами на бакелитовой связке; обработка прерывистых поверхностей. | СТ2, СТ1, С2 | Средний |
| Плоское шлифование сегментами и кольцевыми кругами; резьбошлифование кругами на бакелитовой связке. | СТ1, С2, С1 | Средний |
| Чистовое и комбинированное круглое, наружное, бесцентровое и внутреннее шлифование сталей, плоское шлифование периферией круга, резьбошлифование деталей с крупным шагом. Заточка режущих инструментов вручную или с механической подачей. | С2, С1, СМ2, СМ1 | Средний |
| Плоское шлифование торцом круга. Обработка цветных металлов, закаленных сталей, чистовое шлифование. | СМ2, СМ1, М3, М2 | Мягкий |
| Заточка и доводка режущего инструмента, оснащенного твердым сплавом, шлифование труднообрабатываемых специальных сплавов. | М3, М2, М1 | Мягкий |

Таблица П3.1.7

**Структуры шлифовальных кругов в зависимости от вида обработки [1,2]**

| Номер структуры | Объемное содержание шлиф. материала, % | Область применения |
|---|---|---|
| 1,2,3 | 60,58,56 | Шлифование деталей с малым съемом материала кругами на бакелитовой и керамической связках. |
| 3,4 | 56, 54 | Отрезка, шлифование с большими подачами и переменной нагрузкой; шлифование твердых и хрупких материалов. |
| 5,6 | 52,50 | Круглое наружное бесцентровое плоское периферией круга; шлифование металлов с высоким сопротивлением разрыву. |
| 7,8 | 48, 46 | Шлифование вязких металлов с низким сопротивлением разрыву. Внутренне шлифование, заточка инструментов, плоское шлифование торцом круга. |
| 9,10, 11,12 | 44,42,40,38 | Скоростное шлифование. Профильное шлифование мелкозернистыми кругами. Шлифование резьбы. Шлифование и заточка инструмента, твердым сплавом |
| 14,15, 16 | 36,34,32,30 | Шлифование неметаллических материалов, металлов с низкой теплопроводностью (устранение отжигов и трещин). |

Таблица П3.1.8

**Связки абразивных инструментов и область их применения [2]**

| Маркировка связки | Область применения | Состав и особенности связки |
|---|---|---|
| **Неорганические** | | |
| Керамическая | | |
| К1-К6, К8, К10 | Инструмент общего назначения для всех видов шлифования кроме отрезных и прорезных работ | Огнеупорная глина, полевой шпат, тальк, кварц, растворимое стекло Высокая водоупорность, Температурная и химическая стойкость, чувствительность к ударным и изгибающим нагрузкам. |
| К2, К3 | Инструмент из карбида кремния для всех видов шлифования и заточки | |

Продолжение табл.П3.1.8

| Маркировка связки | Область применения | Состав и особенности связки |
|---|---|---|
| К1, К5, К8 | Инструмент повышенной прочности – кромкостойкости для скоростного, профильного, врезного прецизионного шлифования. | Окружная скорость шлифования круга до 35 м /с. |
| Магнезиальная | | |
| МГ | Сухое шлифование на заточных и зачистных операциях при обработке деталей прямого профиля не требующих выдерживания точных размеров | Каустический магнезит и хлористый магний (магнезиальный цемент). Чувствительность к влаге и холоду, уменьшенное выделение тепла в зоне резания. Круг плохо сохраняет рабочий профиль. Окружная скорость круга до 20 м /с. |
| Силикатовая | | |
| С | Плоское сухое шлифование торцом круга; шлифование особо чувствительных к перегреву деталей, а также в случаях, когда круг имеет большую площадь контакта с деталью. | Растворимое стекло (силикат натрия), окись цинка, мел, пластичная глина. Малая сцепляемость с зернами способствует самозатачиваемости. Круги размягчаются при работе с охлаждающей жидкостью. |
| **Органические** | | |
| Бакелитовая | | |
| Б | Инструмент с повышенной режущей способностью для шлифования деталей, имеющих склонность к прижогам, зачистное и обдирочное шлифование, заточка и хонингование | Фенолформальдегидные смолы, фурфуры. Высокая прочность и упругость. Разрушается под действием 15%-ой щелочной охлаждающей жидкости. Не выдерживает температуру больше 250°С. Окружная скорость круга: 50 – 65 м /с – для кругов общего назначения, 80 – 100 м/с для отрезных, обдирочных работ, заточки режущих инструментов. Круги имеют упрочняющие элементы |
| Б1 | Инструмент общего назначения. Для плоского, внутреннего шлифования, заточки, разрезных работ. | |
| Б2 | Инструмент для торцешлифования сегментными кругами | |

Окончание табл.П3.1.8

| Маркировка связки | Область применения | Состав и особенности связки |
|---|---|---|
| Б3 | Инструмент для резьбошлифовальных и отрезных работ, хонингования. | То же |
| БП2, БУ, Б156 | Инструмент повышенной прочности для скоростного шлифования, зачистки литья и поковок, отрезных работ. | |
| Глифталевая | | |
| ГФ | Чистовое и отделочное шлифование. | Глифталевая смола. Повышенная упругость по сравнению с бакелитовой связкой |
| Вулканитовая | | |
| В,В1 | Инструмент общего назначения, ведущие круги бесцентрового шлифования, отрезные работы, обработка фасонных поверхностей, хонингование незакаленной стали | Каучук и наполнители (окись магния, окись цинка, сажа и др. Высокая упругость. Разрушается при температуре выше 1500С. Непригодна для снятия больших припусков, так как имеет плотную структуру и склонна к засаливанию. Окружная скорость круга до 80 м/с |
| В2 | Инструмент повышенной прочности для скоростного шлифования и резьбошлифования. | |
| В3,В5 | Инструмент повышенной режущей способности для профильной обработки подшипников качения, чистового шлифования цилиндрических и некруглых поверхностей | |

## Технические требования на шлифовальные круги [5].

Предельные отклонения размеров кругов должны соответствовать указанным в табл. П3.1.9

Таблица П3.1.9

**Наружный диаметр, мм**

| *D* | Предельные отклонения для классов точности | |
|---|---|---|
| | АА | А, Б |
| До 6 | ± 0,3 | ± 0,4 |
| Св 6 » 30 | ± 0,5 | ± 0,8 |
| » 30 » 50 | ± 0,8 | ± 1,2 |
| »50 » 80 | ± 1,0 | ± 1,6 |
| » 80 » 180 | ± 1,2 | ± 2,0 |
| »180 » 260 | ± 1,5 | ± 2,7 |
| » 260 » 500 | ± 2,0 | ± 4,0 |
| » 500 » 800 | ± 2,5 | ± 5,0 |
| » 800 | ± 3,0 | ± 6,0 |

Таблица П3.1.10

**Высота, мм**

| *T* | Предельные отклонения для классов точности | |
|---|---|---|
| | АА | А, Б |
| До 3 | ± 0,10 | ± 0,3 |
| Св 3 » 6 | ± 0,15 | ± 0,5 |
| » 6 » 10 | ± 0,20 | ± 0,6 |
| »10 » 16 | | ± 0,9 |
| » 16 » 40 | | ± 1,2 |
| » 40 » 100 | ± 1,5 | ± 1,4 |
| » 100 | ± 2,0 | ± 2,0 |

Таблица П3.1.11

**Диаметр посадочного отверстия(кроме кругов типов ПН и К), мм**

| *H* | Предельные отклонения для классов точности | | |
|---|---|---|---|
| | АА | А | Б |
| До 10 | + 0,1 | + 0,2 | + 0,2 |
| Св 10 » 18 | | | + 0,3 |
| Св 18 » 50 | | | |
| Св 50 » 80 | + 0,2 | | + 0,4 |
| Св 80 » 120 | | | + 0,5 |
| Св 120 » 180 | | + 0,3 | |
| Св 180 » 260 | | | + 0,6 |
| Св 260 | + 0,3 | + 0,4 | |

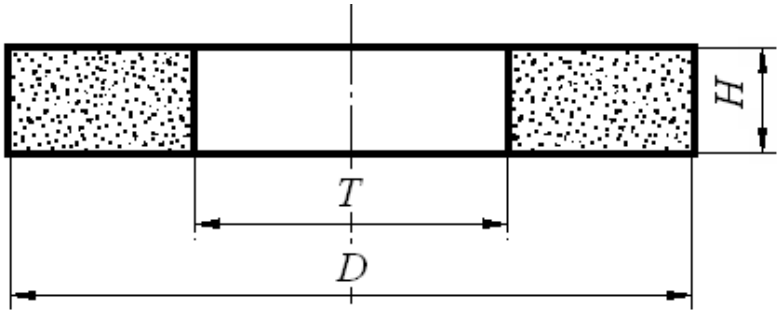



Рис..П3.1Размеры круга.

ТаблицаП3.1.12

**мм**

| *D* | *T* | *H* | *D* | *T* | *H* |
|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 6,0; 8,0; 10,0 | 1,0 | 8 | (6,0); (10,0); 16,0 | 4,0 |
| 4 | 1,0; 1,3; 1,6; 2,0; 2,5; 3,2; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0 | 1,6 | 10 | 3,2; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 13,0 16,0; 20,0 | 3,0 |
| 5 | 8,0 | 2,0 | | (6,0); (10,0); 135Q; 16,0 | 4,0 |
| | 2,0 | | 13 | 3,2; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10i,0; 13,0; 16,0; 20,0 | |
| 6 | 6,0; 8,0; 10,0 | 1,6. | | 10,0; 13,0; 16,6; 20,0 | 6,0 |
| | 2,0; 2,5; 3,2; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 13,0 | 2,0 | 16 | 3,2; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0 | |
| 8 | 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; (16,0) | 3,0 | 20 | 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0 | |

Продолжение табл. П3.1.12

| *D* | *T* | *H* | *D* | *T* | *H* |
|---|---|---|---|---|---|
| 20 | (16,0); 25,0; 32,0 | 8,0 | 63 | 13,0 | 16,0 |
| 25 | 3,2; 4,0; 5,0; 6,0 8,0: 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0 | 6,0 | | 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0 | 20 |
| | 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0 | 8,0 | 80 | 3,2; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 16,0 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0; 80,0; 100,0 | |
| | 16,0; 20,0; 25,0; 32,0 | 10,0 | | | |
| 32 | (6,0); 8,0; 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0 | | 100 | 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0 | 13,0 |
| | 2,5; 3,2; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0 | 6,0 | | 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0; 80,0; 100,0 | 20,0. |
| | 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0 | 13,0 | | 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0; 80,0 | 32,0 |
| 40 | 6,0; 8,0; 10,0 | 6,0 | 125 | 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0 | 32 |
| | 2,0; 2,5; 3,2; 4,0; 5,0; 6,0'; 8,0; 10,0; | 8,0; 10,0 | | (6,0); (8,0); (10,0); (13,0); (16,0); 20,0; (25,0); (32,0); (40,0); (50,0); (63,0); | 20,0 |
| | 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0 | 13,0 | | (6,0); (8,0); (10,0); (13,0); (16,0); (20,0); 25,0; 32,0; 40,0 50,0; 63,0; 80,0; 100,0 | 51,0 |
| | 32,0; 40,0; 50,0; 63,0 | 16,0 | 150 | 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; (63,0) | 20,0; 32,0 |
| 50 | 4,0; 5,0 | 10,0 | | 6,0; 8,0; 10,0; 13,0 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0; 80,0; 100,0 | 51,0 |
| | (6,0); (8,0); 10,0; 13,0; (16,0); (20,0); (25,0); (32,0); 40,0; (50,0) | 13,0 | 175 | 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0 | 32,0 |
| | 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0 | 16,0 | | 3,2; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0;32,0; 40,0; 50,0; 63,0; 80,0 | |
| 63 | 3,2; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; | 10,0 | 200 | 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0 (32,0); (40,0); (50,0); (63,0); (80,0); (100,0) | 51 |

Окончание табл. П3.1.12

| *D* | *T* | *H* | *D* | *T* | *H* |
|---|---|---|---|---|---|
| 200 | 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25Д 32,0; 40,0; 50,0; 63,0; 80,0; 100,0; 125,0; (150,0); 160',0; 200,0 | 76,0 | 450 | 6,0; 8,05 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0; 80,0 | 127,0 |
| 250 | 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0 | 32,0<br>51,0 | | 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63; 80,0; 100,0 | 203,0 |
| | 2,5; 3,2; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0; (80,0); (100,0); (125,0) | 76,0 | 500 | 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0; 80,0; 100,0; 125,0; (150,0); 160,0; 200,0 | 203,0 |
| | 2,5; 3,2; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63.0; 80,0; 100,0; 125,0; (150,0); 160,0 | 127,0 | | 8,0; 10,0; 13,0; 16,0 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0; 80,0; 100,0; 125,0; (150,0); 160,0; 200,0; 250,0 | 305,0 |
| 300 | 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0; 80,0; 100,0; 125,0; (150,0); 160,0; 200,0 | 32,0;<br>76,0 | 600 | 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0*; 80,0*; 100,0*; 125,0; (150,0); 160,0; 200,0; 250,0* | |
| | 2,5; 3,2; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0; 80,0; 100,0; 125,0; (150,0); 160,0 200,0 | 127,0 | | 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0; 80,0; 125,0; 160,0; 200,0 | 203,0 |
| 350 | 32,0; 40,0; 50',0; | 76,0 | 750 | 16,0; 20,0; 25,0; 32,0 40,0; 50,0; 63,0; 80,0; 100,0; 125,0; (150,0); 160,0; 200,0; (250,0) | 305,0 |
| | 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0; 80,0; 100,0; 125,0; (150,0); 160,0; 200,0 | 127,0; 203,0 | | | |
| 400 | 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0; 80,0; 100,0; (125,0); (150,0); 160',0; 200,0 | 127,0 | 900 | 25,0; 32,0; 40,0; 50,0*; 63,0*; 80,0*; 100,0*; 125,0 | |
| | 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0; 80,0; 100,0; (125,0); (150,0); 160,0; 200,0 | 203,0 | 1060 | 40,0*; 50,0*; 63,0*; 80,0*; 100,0*; 125,0* | |

* Должны изготовляться на керамической связке классов точности АА или А.

**Примечание**. Размеры, заключенные в скобках, применять не рекомендуется

Таблица П3.1.10

**Параметры резания при различных видах шлифования**

| Обрабатываемый материал | Характеристика процесса шлифования | Скорость круга $V_к$, м/с | Скорость заготовки $V_з$, м /мин | Глубина шлифования $t$,мм | Продольная подача $S$ | Радиальная подача $S_р$, мм/об |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Круглое наружное шлифование* | | | | | | |
| Конструкционные металлы и инструментальные стали | С продольной подачей на каждый ход: предварительное | 30–35 | 12 – 25 | 0,01 – 0,025 | (0,3 – 0,7)$B$ | |
| | окончательное | | 15 –55 | 0,005 – 0,015 | (0,2 – 0,4)$B$ | |
| | С продольной подачей на двойной ход | | 20 – 30 | 0,015 – 0,05 | (0,3 – 0,7)$B$ | |
| | Врезное: предварительное | | 30 – 50 | – | – | 0,0025- – 0,075 |
| | окончательное | | 20 – 40 | | | 0,001 – – 0,005 |
| *Круглое внутреннее шлифование* | | | | | | |
| Конструкционные металлы и инструментальные стали | На станках общего назначения: предварительное | 30 – – 35 | 20 – 40 | 0,005 – 0,02 | (0,4 – 0,7)$B$ | – |
| | окончательное | | | 0,0025– 0,01 | (0,25 – 0,4)$B$ | |
| | На полуавтоматических станках: предварительное | | 50 – 150 | 0,0025– 0,005 | (0,4 – 0,75)$B$ | |
| | окончательное | | | 0,0015 – 0,0025 | (0,25 – 0,4)$B$ | |

Продолжение табл.П3.1.10.

| Обрабатываемый материал | Характеристика процесса шлифования | Скорость круга $V_к$, м /с | Скорость заготовки $V_з$, м/мин | Глубина шлифования $t$, мм | Продольная подача $S$ | Радиальная подача $S_р$, мм/об |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Круглое бесцентровое шлифование* | | | | | | |
| Конструкционные металлы и инструментальные стали | На проход: предварительное при $d \leq 20$мм | 30 – – 35 | 20 – 120 | 0,02 – 0,05 | 0,5 – 3,8 м/мин | – |
| | предварительное при $d > 20$мм | | | 0,05 – 0,2 | | |
| | окончательное | | 40 – 120 | 0,0025–0,01 | 1,2 – 2,0 м/мин | |
| | Врезное: предварительное | | 10 – 45 | – | – | 0,001– 0,005 |
| | окончательное | | 10 – 30 | | | |
| *Плоское шлифование периферией круга* | | | | | | |
| Конструкционные металлы и инструментальные стали | На станках с круглым столом: предварительное | 30 – – 35 | 20 – 60 | 0,005– 0,015 | (0,3 – 0,6)$B$ | |
| | окончательное | | 40 – 60 | 0,005– 0,01 | (0,2 – 0,25)$B$ | |
| | На станках с прямоугольным столом в серийном производстве: предварительное | | 8 – 30 | 0,015 – 0,04 | (0,4 – 0,7)$B$ | |
| | окончательное | | 15–20 | 0,005 – 0,015 | (0,2 – 0,3)$B$ | |
| | На станках с прямоугольным столом инструментального типа: предварительное | | 3 – 8 | 0,05 – 0,15 | 1,0 –2,0 мм/ход | |
| | окончательное | | | 0,005 – 0,015 | 1,0 – 1,5 мм/ход | |

Окончание табл.П3.1.10

.

| Обрабатываемый материал | Характеристика процесса шлифования | Скорость круга $V_к$, м /с | Скорость заготовки $V_з$, м/мин | Глубина шлифования $t$, мм | Продольная подача $S$ | Радиальная подача $S_р$, мм /об |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Плоское шлифование торцом круга* | | | | | | |
| Конструкционные металлы и инструментальные стали | На станках с круглым столом: предварительное | 25 – – 30 | 4 – 12 | 0,015 – 0,04 | – | – |
| | окончательное | | 2 – 3 | 0,005 – 0,01 | | |
| | На станках с круглым столом с вертикальной подачей на каждый оборот стола: предварительное | | 10 – 40 | 0,015 – 0,03 | – | |
| | окончательное | | | 0,005 | | |
| | На станках с круглым столом одно-проходного шлифования с автоматической подачей заготовок: предварительное | | 2 – – 3 | 0,1 – 0,15 | – | |
| | окончательное | | | 0,005 | | |

Примечания:1. $B$ – толщина круга, мм.

2. Для расчета мощности при круглом шлифовании, если значение продольной подачи приведено в м /мин продольную подачу в мм /об заготовки по формуле, $S(\text{мм/мин}) = S(\text{м/мин}) \times \frac{\pi \cdot d}{1000 \cdot V_З}$

где $d$ – диаметр заготовки, мм $V_з$ – окружная скорость заготовки, м/мин.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3.2

### Круглошлифовальный станок 3М131

Наибольший диаметр и длина шлифуемой поверхности: 200 ×700 мм. Мощность двигателя шлифовальной бабки $N_{дв}$ = 7,5 кВт; КПД станка – 0,8. Частота вращения обрабатываемой заготовки: 100 ÷ 600 мин$^{-1}$ .Частота вращения круга, мин$^{-1}$: 40 ÷ 400 (регулируется бесступенчато). Скорость продольного хода стола 50 ÷ 5000 мм/мин (регулируется бесступенчато). Периодическая поперечная подача шлифовального круга 0,002 ÷ 0,1 мм/ход стола (регулируется бесступенчато). Непрерывная подача для врезного шлифования 0,1 – 4,5 мм /мин. Размеры шлифовального круга (нового): $D_K$ = 600 мм; $B_К$ = 63 мм.

### Внутришлифовальный станок 3К228В

Наибольший диаметр шлифуемого отверстия: 200 мм; наибольшая длина обрабатываемой поверхности: 200 мм. Мощность двигателя шлифовального шпинделя $N_{дв}$ = 5,5 кВт; КПД станка – 0,85. Частота вращения обрабатываемой заготовки: 100 ÷ 600 мин$^{-1}$ (регулируется бесступенчато). Частота вращения круга, мин$^{-1}$: 4500; 6000; 9000; 13000. Скорость продольного хода стола 50 ÷ 5000 мм/мин (регулируется бесступенчато). Периодическая поперечная подача шлифовальной бабки 1–7 м /мин (регулируется бесступенчато). Поперечная подача шлифовального круга, мм /ход: 0,001; 0,002; 0,003; 0,004; 0,005; 0,006. Наибольшие размеры шлифовального круга: $D_К$ = 175 мм; $B_К$ = 63 мм.

### Плоскошлифовальный станок 3П722

Площадь рабочей поверхности стола 320×1250. Мощность двигателя шлифовального шпинделя $N_{дв}$ = 15 кВт; КПД станка – 0,85. Частота вращения шлифовального круга 1500 мин$^{-1}$. Скорость продольного хода стола 3 ÷ 45 м/мин (регулируется бесступенчато). Вертикальная подача круга, мм на реверс шлифовальной бабки: 0,004; 0,005; 0,01; 0,015; 0,02; 0,025; 0,03; 0,08; 0,085; 0,09; 0,095; 0,1. Размеры шлифовального круга (нового): $D_К$ = 450 мм; $B_К$ = 80 мм.

## ЛИТЕРАТУРА


1. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова.- М.: Машиностроение, 1986, 496 с., ил.
2. Справочник инструментальщика, М. Машиностроение, 1987. 846 с.
3. Обработка металлов резанием: Справочник технолога./А. А. Панов, В. В. Аникин, Н. Г. Бойм и др.; Под общ. ред. А. А. Панова.– М.: Машиностроение 1988. – 736 с.: ил.
4. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник. М. 1977.
5. ГОСТ 2424-84 Круги шлифовальные.
6. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.1 / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. - М.: Машиностроение, 1985,

659 с., ил.


## ОГЛАВЛЕНИЕ


1.РАБОТА. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ И ОСНОВНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВРЕМЕНИ ПРИ ТОЧЕНИИ ..... 1
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 ..... 12
Таблица П.1.7 ..... 15
**Значение коэффициента $C_V$ и показателей степени в формулах** ..... 15
**скорости резания при обработке резцами** ..... 15
Таблица П1.8 ..... 16
**Режимы резания при тонком точении и растачивании** ..... 16
ЛИТЕРАТУРА. ..... 16
2.РАБОТА. ВЫБОР И ИЗУЧЕНИЕ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ..... 17
**2.1.Общие сведения.** ..... 17
**2.2. Выполнение работы.** ..... 17
**2.3. Оформление отчета** ..... 18
**2.4. Характеристика методов обработки металлов.** ..... 19
**Режим резания при сверлении.** ..... 21
Таблица 2.2. ..... 21
**Качество отработанной поверхности отверстий** ..... 21
Таблица 2.3. ..... 22
**Последовательность обработки отверстий с использованием** ..... 22
**сверления, зенкерования и развёртывания** ..... 22
Таблица 2.4 ..... 24
**Средние значения периода стойкости сверл, зенкеров и разверток** ..... 24
**Рекомендуемые режимы резания при сверлении** ..... 25
**деталей из стали, алюминиевых сплавов и чугуна** ..... 25
Таблица 2.5 ..... 25
**Рекомендуемые группы подач при обработке отверстий** ..... 25

**в зависимости от условий обработки** ..... 25
Таблица 2.6 ..... 26
**Подачи $S_O^*$, мм /об, при обработке отверстий в деталях из стали,** ..... 26
Таблица 2.7 ..... 27
**Скорость резания *V*, м/мин при обработке отверстий** ..... 27
**в стальных деталях** ..... 27
**Поправочные коэффициенты на скорость резания** ..... 28
Таблица 2.8 ..... 28
**Коэффициент $k_{MV}$ в зависимости от характеристики** ..... 28
**обрабатываемого материала** ..... 28
Таблица 2.9 ..... 28
**Коэффициент $k_{TV}$ в зависимости от периода стойкости инструмента** ..... 28
Таблица 2.10 ..... 29
**Коэффициент $k_{lV}$ в зависимости от глубины обработки** ..... 29
Таблица 2.11 ..... 29
**Скорость резания *V*, м/мин при обработке отверстий в чугунных деталях** ..... 29
**Поправочные коэффициенты на скорость резания** ..... 29
Таблица 2.12 ..... 29
**Коэффициент $k_{MV}$ в зависимости от характеристики** ..... 29
**обрабатываемого металла** ..... 29
Таблица 2.13 ..... 30
**Коэффициент $k_{Tv}$ в зависимости от периода стойкости инструмента $T_M$** 30
Таблица 2.14 ..... 30
**Коэффициент $k_{lV}$ в зависимости от глубины обработки** ..... 30
**Рекомендуемые режимы резания при рассверливании** ..... 30
**деталей из стали, алюминиевых сплавов и чугуна** ..... 30
Таблица 2.15 ..... 30
**Подача $S_O$, мм /об** ..... 30
Таблица 2.16 ..... 31
**Скорость резания *V*, м/мин.** ..... 31
**Поправочные коэффициенты на скорость резания** ..... 32
Таблица 2.17 ..... 32
**Коэффициент $k_{TV}$ в зависимости от стойкости инструмента** ..... 32
Таблица 2.18 ..... 32
**Коэффициент $k_{MV}$ в зависимости от характеристики** ..... 32
**обрабатываемого металла** ..... 32
Таблица 2.19 ..... 32
**Скорость резания при развертывании отверстий в стальных деталях** ..... 32
Таблица 2.20 ..... 33
**Поправочный коэффициент $k_{MV}$ на скорость резания в зависимости** ..... 33
**от обрабатываемого металла** ..... 33
Таблица 2.21 ..... 33
**Режимы резания при развертывании отверстий в чугунных деталях** ..... 33
Таблица 2.22 ..... 33
**Поправочный коэффициент $k_{MV}$ на скорость резания в зависимости** ..... 33

**от обрабатываемого металла** ..... 33
Таблица 2.23 ..... 33
**Режимы резания при развертывании отверстий в чугунных деталях** .... 33
Таблица 2.24 ..... 36
**Скорость резания, м /мин, для протяжек из быстрорежущей стали Р6М5** ..... 36
Таблица 2.25 ..... 36
**Группы скорости резания при протягивании стали и чугуна** ..... 36
Таблица 2.26 ..... 40
**Рекомендуемые значения габаритных размеров в мм и числа зубьев цельных фрез** ..... 40
**Режим резания при фрезеровании.** ..... 41
Таблица 2.27 ..... 43
**Подачи при фрезеровании стальных заготовок шпоночными** ..... 43
**фрезами из быстрорежущей стали** ..... 43
Таблица 2.28 ..... 44
**Подача на зуб фрезы $S_Z$, мм/об, при обработке плоскостей** ..... 44
Таблица 2.29 ..... 45
**Подачи на зуб $S_Z$, мм/зуб, при обработке пазов** ..... 45
Таблица 2.30 ..... 46
**Средние значения периода стойкости $T$ фрез** ..... 46
Таблица 2.31 ..... 46
**Скорость резания $V$, м/мин, при обработке деталей из стали** ..... 46
Таблица 2.32 ..... 47
**Скорость резания $V$, м/мин, при обработке деталей из чугуна** ..... 47
**и алюминиевых сплавов** ..... 47
**Поправочные коэффициенты на скорость резания.** ..... 49
Таблица 2.33 ..... 49
**Коэффициент $k_д$ в зависимости от отношения диаметра фрезы к глубине** ... 49
**или ширине фрезерования** ..... 49
Таблица 2.34 ..... 50
**Коэффициент $k_{MV}$ зависимости от характеристики** ..... 50
**обрабатываемого материала** ..... 50
Таблица 2.35 ..... 50
**Коэффициент $k_{TV}$ в зависимости от стойкости инструмента** ..... 50
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.1 ..... 51
Таблица П2.1.2 ..... 52
**Протяжные станки** ..... 52
Таблица П2.1.1 ..... 53
**Зависимость скоростей рабочего хода и допускаемых сил на ползуне** ... 53
**от длины обрабатываемой поверхности и числа двойных ходов** ..... 53
**ползуна в 1 мин** ..... 53
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.2 ..... 54
Таблица П2.2.2 ..... 55
**Значения коэффициента $C_V$ и показателей степени в формуле** ..... 55

**скорости резания при рассверливании, зенкеровании и развертывании** ..... 55
Таблица П2.2.3 ..... 56
**Значения коэффициента $C_V$ и показателей степени в формуле** ..... 56
**скорости резания при фрезеровании** ..... 56
Таблица П2.2.4 ..... 59
**Суммарная величина врезания $l_1$ и перебега $l_2$ при работе** ..... 59
**сверлами, зенкерами и развертками** ..... 59
Таблица П2.2.5 ..... 59
**Суммарная величина врезания $l_1$ и перебега $l_2$ при работе** ..... 59
**концевыми фрезами** ..... 59
Таблица П2.2.6 ..... 60
**Обработка фрезами цилиндрическими, дисковыми, прорезными** ..... 60
**и фасонными** ..... 60
Таблица 2.2.7 ..... 60
**Сила резания $P$, Н, приходящаяся на 1 мм длины лезвия зуба протяжки** ..... 60
ЛИТЕРАТУРА ..... 61
3.РАБОТА. ВЫБОР ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА ..... 61
**3.1. Общие сведения.** ..... 61
**3.2.Схемы обработки при шлифовании.** ..... 62
**3.2.Элементы режима резания при шлифовании.** ..... 67
**3.3.Определение основного времени при шлифовальных работах.** ..... 68
**3.4.Абразивные материалы.** ..... 70
**3.5.Выполнение работы.** ..... 71
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.1 ..... 74
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.2 ..... 93
ЛИТЕРАТУРА ..... 94

# ИЗУЧЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И ВЫБОР РЕЖИМА РЕЗАНИЯ
(часть 1)

*Пособие по выполнению самостоятельных работ*
по дисциплине

«ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ»
для студентов очного и заочного обучения направления
150400 –«Технологические машины и оборудование»

25 листов

Минобрнауки России
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

**УТВЕРЖДАЮ**
Проректор по учебно-методическому комплексу

_____ С.А. Упоров

# Конспект лекций по дисциплине "Технология конструкционных материалов"

Разделы: «Производство чугуна и стали», «Литье», «Обработка металлов резанием»

**для специальности 15.03.01 - "Машиностроение"**

Автор: Симисинов Д.И., к.т.н., доц., Глинникова Т.П., к.т.н.

| | |
|---|---|
| Одобрен на заседании кафедры | Рассмотрен методической комиссией факультета |
| Эксплуатации горного оборудования | Горно-механического |
| *(название кафедры)* | *(название факультета)* |
| Зав. кафедрой _____ | Председатель _____ |
| *(подпись)* | *(подпись)* |
| Симисинов Д.И. | Барановский В.П. |
| *(Фамилия И.О.)* | *(Фамилия И.О.)* |
| Протокол № 8 от 17.04.2019 | Протокол № 7 от 19.04.2019 |
| *(Дата)* | *(Дата)* |

Екатеринбург
2019

Комплект оценочных средств дисциплины согласован с выпускающей кафедрой эксплуатации горного оборудования

Заведующий кафедрой _____ Симисинов Д.И.

*подпись*

# 1. КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

## 1.1. Общие понятия и определения

**Обработка резанием** – технологический процесс изготовления деталей, заключающийся в образовании новых поверхностей путём отделения поверхностных слоев материала с образованием стружки.

Примеры схем обработки различных поверхностей (рис. 1.1).

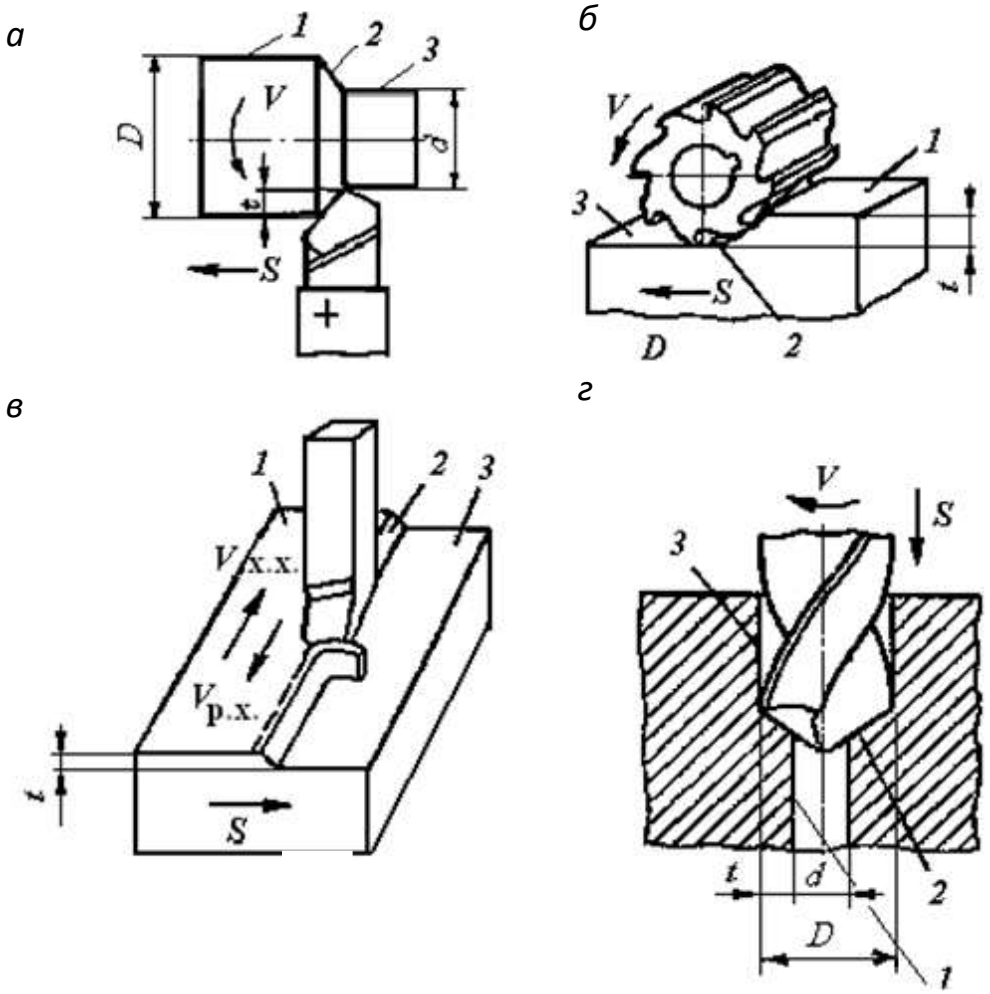



Рис. 1.1 Схемы обработки заготовок:
*а* – точением; *б* – фрезерованием; *в* – строганием; *г* – сверлением (рассверливанием);
*1* – обрабатываемая поверхность; *2* – поверхность резания;
*3* – обработанная поверхность

Для осуществления процесса резания необходимо относительное движение между заготовкой и режущим инструментом. Совокупность относительных движений инструмента и заготовки, необходи-

мых для получения заданной поверхности, **называют кинематической схемой обработки.** *Движения резания* – это движения, обеспечивающие снятие слоя металла со всей обрабатываемой поверхности.

Движение, происходящее с наибольшей скоростью и определяющее скорость снятия стружки (прямолинейное или вращательное движение инструмента или заготовки), называют *главным движением резания* – $\boldsymbol{D_v}$. Скорость главного движения обозначают буквой ***V*.**

Движение (прямолинейное поступательное или вращательное) инструмента или заготовки, скорость которого меньше скорости главного движения резания, обеспечивающее непрерывность снятия стружки со всей обрабатываемой поверхности, называют *движением подачи* – $\boldsymbol{D_s}$. Скорость движения подачи обозначают буквой ***S*.**

На обрабатываемой заготовке различают *три поверхности:* обработанную (3), полученную на заготовке в результате обработки; обрабатываемую (*1*), подлежащую обработке, и поверхность резания (*2*), образуемую режущей кромкой инструмента (рис.1, *а – г*).

## 1.2. Элементы режима резания

Процесс обработки задаётся режимом резания. Элементами режима резания являются **скорость резания, подача и глубина резания**. Совокупность этих значений принято называть **режимом резания**. ***Режим резания выбирается в следующей последовательности:***

- глубина резания – *t*;
- подача – *S*;
- скорость резания – *V*.

***Глубина резания*** – определяется как расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями заготовки, измеренное по нормали. Глубина резания измеряется в мм (см. рис.1.1).
$t = (D - d)/2$ (*а* и *г* – при точении и рассверливании); $t = d/2$ (при сверлении); $t = H - h$ (*б* и *в)* при фрезеровании и строгании).

***Глубина резания зависит от следующих факторов:***

– величины припуска *а* (слой металла, подлежащий удалению в процессе обработки);

– вида обработки (черновая или чистовая);

– мощности станка.

Глубина резания может быть равна припуску $t = a$, или $t = a / i$, если припуск снимается за несколько проходов ($i$ – количество ходов, за которое снимется весь припуск при данной глубине резания).

***Подача (S)*** – это перемещение заготовки или инструмента в направлении движения подачи за цикл движения резания.

При точении и сверлении подача задается в миллиметрах (мм) за 1 оборот (мм/об), при фрезеровании подача может быть задана в миллиметрах на зуб (мм/зуб), в миллиметрах в минуту (мм/мин), при строгании – в миллиметрах за двойной ход стола (мм/дв. х.).

Величина подачи зависит от требований к обработанной поверхности: шероховатости и точности поверхности – чем выше точность и чистота обработки, тем меньше величина подачи.

***Скорость резания (V)*** – перемещение точки режущей кромки инструмента относительно заготовки за единицу времени. Скорость резания измеряют в метрах в минуту (м/мин.) ***при всех видах обработки резанием***, кроме шлифования и полирования (метры в секунду (м/с)).

Если главное движение резания является вращательным, то скорость резания определяется по формуле

$$V = \pi D n /1000,$$

где $D$ – диаметр заготовки или инструмента, мм; $n$ – частота вращения заготовки или инструмента, об/мин.

При возвратно-поступательном движении скорость резания определяется по формуле

$$V = 2L n (k + 1) /1000,$$

где $L$ – длина хода инструмента или детали при обработке данной поверхности, мм; $n$ – число двойных ходов в минуту ($n = 500 \cdot V / L (k + 1)$); $k$ – коэффициент отношения скорости рабочего хода к скорости холостого хода ($k = V_{р.х.} / V_{х.х.}$).

По выбранным элементам режима резания определяется ***основное технологическое время,*** $T_о$, затрачиваемое непосредственно на обработку резанием данной поверхности (изменение формы и размеров заготовки).

Основное время определяется по формуле (рис. 1.2):

$$T_о = L \cdot i / S \cdot n,$$

где $L = l + l_1 + l_2$; $l$ – длина обрабатываемой поверхности, мм; $l_1$ – величина врезания инструмента, мм; $l_2$ – величина перебега инструмента, мм.

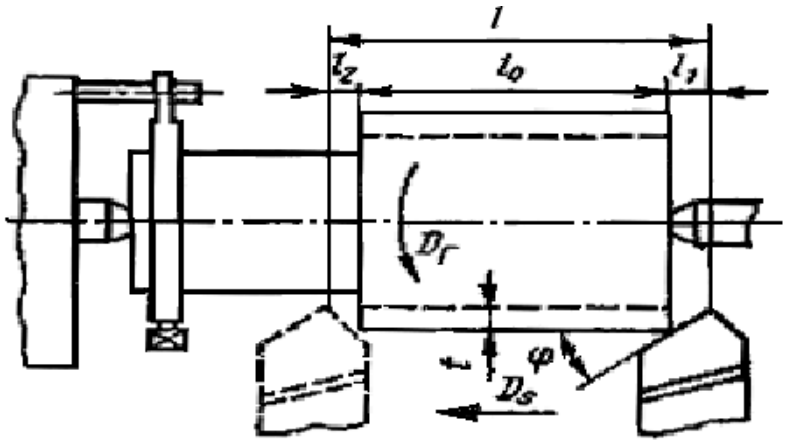



Рис. 1.2. Схема к расчёту $T_o$ при обработке цилиндрической поверхности

## 1.3. Геометрические параметры режущего клина

Геометрические параметры клина режущего инструмента рассмотрим на примере токарного проходного резца (рис. 1.3). Резец состоит из двух частей: режущей *A* и крепежной *B*. Крепежная часть служит для закрепления резца в приспособлении. Режущая часть осуществляет резание и состоит из следующих элементов: *1* – передняя поверхность (по ней сходит стружка); *2* – главная задняя поверхность (обращена к поверхности резания заготовки); *3* – вспомогательная задняя поверхность (обращена к обработанной поверхности заготовки); *4* – главная режущая кромка; *5* – вспомогательная режущая кромка; *6* – вершина резца.

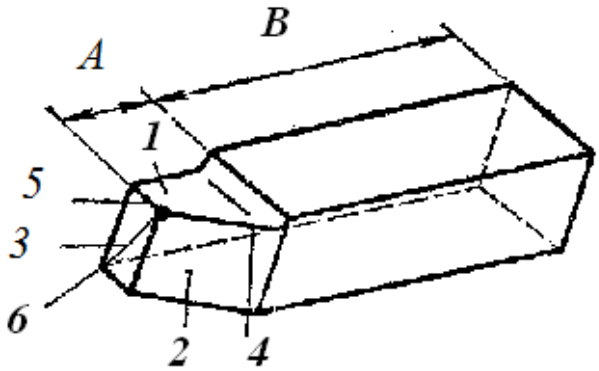



Рис. 1.3. Элементы токарного резца

Углы резца рассматриваются в сечении и в плане. Для определения углов в сечении через режущую кромку перпендикулярно главной режущей кромке проводят секущую плоскость. В сечении получаем режущий клин (рис. 1.4).

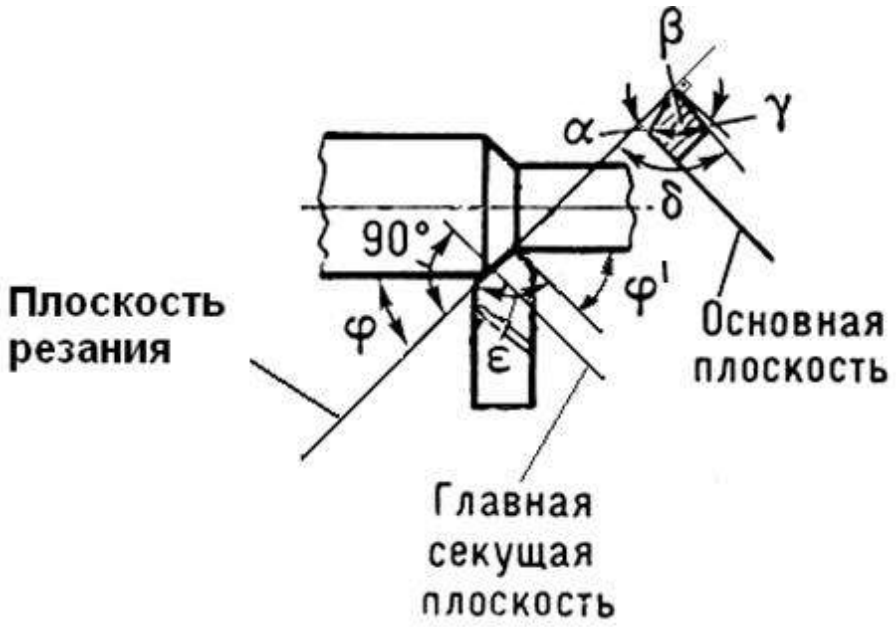



Рис. 1.4. Основные углы резца

*Углы резца в сечении:*

γ – главный передний угол; α – главный задний угол резца; β – угол заострения резца; δ – угол резания.

*Углы в плане:*

φ – главный угол в плане – между главной режущей кромкой и направлением движения подачи; φ' – вспомогательный угол в плане – между вспомогательной режущей кромкой и направлением движения подачи; ε – угол при вершине резца.

Передний угол γ оказывает большое влияние на процесс резания. С увеличением переднего угла уменьшается работа, затрачиваемая на процесс резания, улучшаются условия схода стружки и повышается качество обработанной поверхности. Вместе с тем, увеличение переднего угла приводит к снижению прочности режущего лезвия. Поэтому при обработке закаленных сталей, а также при прерывистом резании для увеличения прочности лезвия назначают отрицательные углы γ. В зависимости от механических свойств обрабатываемого и инструментального материала углы γ назначают от –10° до +20° (для обработки обычных конструкционных сталей γ = 0÷10°).

Задний угол α служит для уменьшения трения между задней поверхностью лезвия и поверхностью резания заготовки. При обработке вязких материалов применяют резцы с большими углами α. При обработке твердых и хрупких материалов, а также при большом сечении срезаемого слоя выбирают меньшие углы. Для различных условий угол α назначают в пределах 6÷12°.

Главный угол в плане φ существенно влияет на стойкость режущего инструмента и на шероховатость обработанной поверхности (рис. 1.5). С уменьшением угла φ уменьшается шероховатость обработанной поверхности.

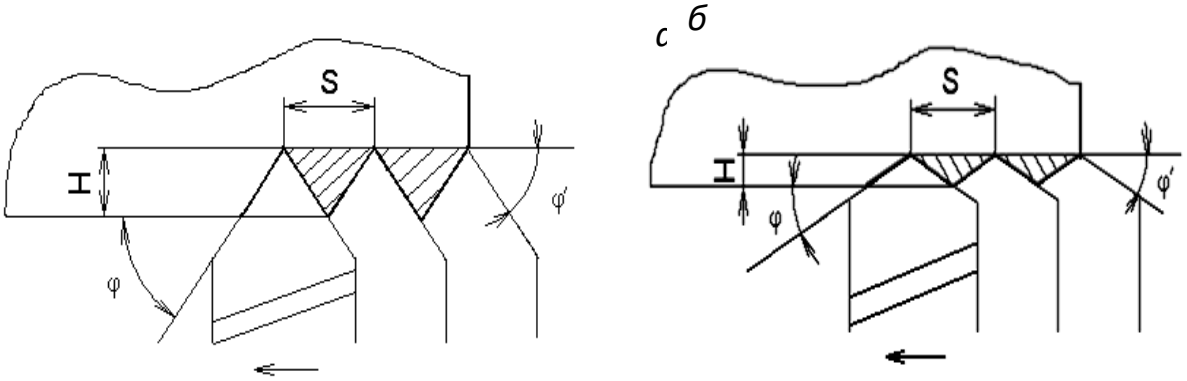



Рис. 1.5. Влияние углов φ и φ' на шероховатость обработанной поверхности:
*а* – больших; *б* – малых

Одновременно с уменьшением φ увеличивается длина активной части режущей кромки и уменьшается толщина срезаемого слоя, что приводит к снижению тепловой и силовой нагрузки на единицу длины режущей кромки, следовательно, к уменьшению износа инструмента. Однако при малых углах φ резко возрастает составляющая силы резания, перпендикулярная оси заготовки, что приводит к ее прогибу. Угол φ назначают в зависимости от вида обработки и типа резца в пределах 30÷90°. При обработке заготовок малой жёсткости угол φ берут близким или равным 90°.

Вспомогательный угол в плане φ' служит для уменьшения трения вспомогательной задней поверхности об обработанную поверхность. С уменьшением угла φ' уменьшается шероховатость обработанной поверхности, увеличивается прочность вершины лезвия для проходных резцов, обрабатывающих жесткие заготовки, φ' = 5÷10°; при обработке заготовок малой жесткости φ' = 30÷45°.

Угол наклона главной режущей кромки λ определяет направление схода стружки: при λ = 0 стружка сходит в направлении главной секущей плоскости перпендикулярно главной режущей кромки (рис. 1.6, *в*). При положительном λ стружка сходит к обработанной поверхности, при отрицательном λ стружка сходит к обрабатываемой поверхности. Положительный угол λ служит также для упрочнения режущей кромки, так как в момент врезания ударная сила приходится не на вершину лезвия, а на более прочное место режущего лезвия.

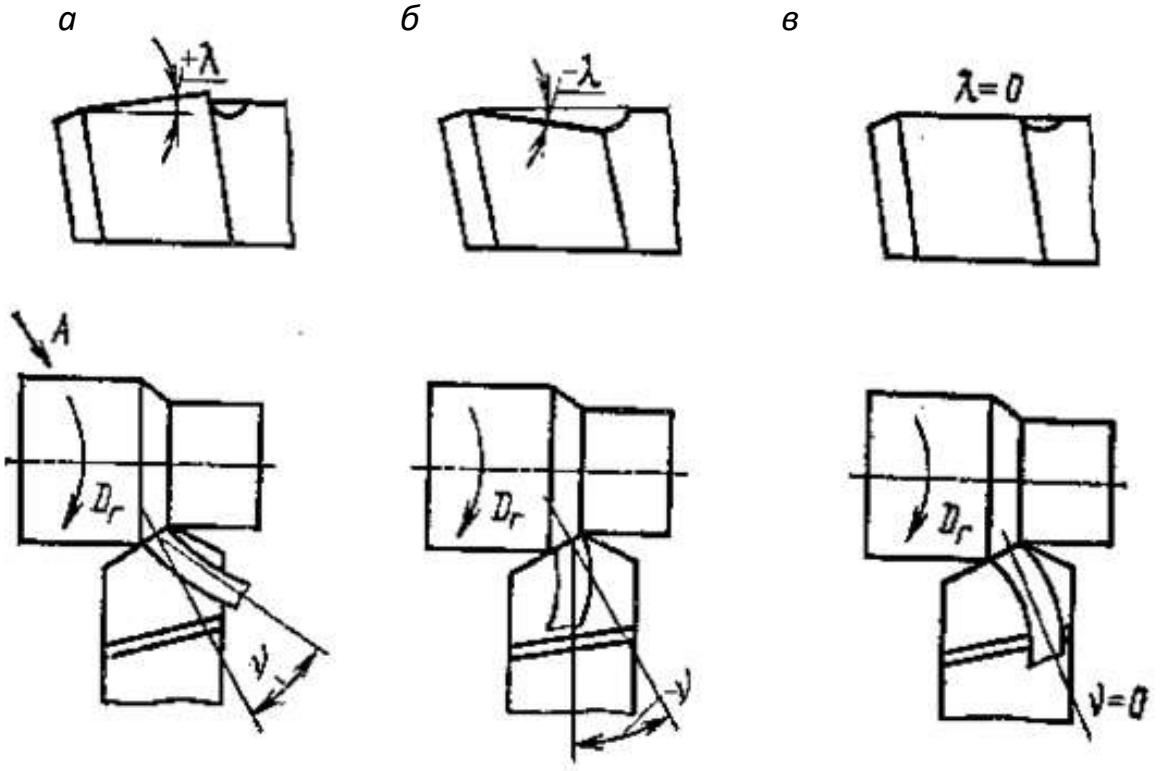



Рис. 1.6. Углы наклона главной режущей кромки:
*а* – λ > 0; *б* – λ < 0; *в* – λ = 0

## 1.4. Материалы для изготовления режущих инструментов. Требования, предъявляемые к инструментальным материалам

Режущие лезвия инструмента в процессе работы находятся под действием больших давлений, трения и высоких температур, что приводит к изнашиванию режущего инструмента.

Поэтому *инструментальные материалы должны обладать особыми физико-механическими свойствами и отвечать определенным требованиям,* связанным с условиями протекания процесса резания, технологическими особенностями каждого вида обработки, *свойствами и состоянием обрабатываемого материала, а именно:*

- высокими механическими свойствами (прочность на изгиб и твердость);
- высокой износостойкостью, заключающейся в способности инструментальных материалов сопротивляться разрушению при работе;

- высокой теплостойкостью – свойство инструментальных материалов сохранять свою твёрдость, а следовательно, и режущие свойства при нагреве;
- инструментальные материалы должны обладать определенной технологичностью, к которой относят: обрабатываемость резанием, свариваемость, шлифуемость, закаливаемость и т. д.;
- экономичностью, т. е. режущие инструменты не следует целиком изготавливать из дорогих и дефицитных материалов.

Краткая характеристика инструментальных материалов приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1

**Инструментальные материалы**

| Инструмен-тальный материал | Химический состав | Марка материала | Твердость *HRC* | Теплостой-кость, °С | $V_{max}$, м /мин | Область применения |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| *Инструментальные стали* | | | | | | |
| Углероди-стые | (0,7–1,3 %)С | У7, У13, У12А | 60 – 62 | 200 – 250 | 5 – 15 | Слесарный инструмент (нож. полотна метчики, плашки и т. д.) |
| *Легированные стали* | | | | | | |
| Низколеги-рованные | С + Cr + +V+W+ + Si и т. д. | Х, В2Ф, 13Х | 62 – 64 | 250 – 350 | 15 – 25 | То же |
| Высоколеги-рованные | | ХВГ, 9ХС, ХВСГ | | | | Развертки, сверла, протяжки, метчики, плашки и т. д.) |
| Быстрорежу-щие | 8,5 – 19 %W, 3,8 – 4,4 %Cr 2 – 10 % Co,V | Р9, Р12, Р6М5, Р9Ф5, Р18К5Ф2, Р9, Р18, Р6М5, Р9К5, Р18Ф2 | 62 – 64 | До 650 | 80 – 100 | Резцы, фрезы зенкеры (Р9, Р18, Р6М5) |
| | | | | | | Для труднообраб. сталей (Р18К5Ф2, Р9К5) |
| | | | | | | Для чистовой обраб. (Р9Ф5, Р14Ф4) |
| | | | | | | Черновая обработка (Р9М4, Р6М3) Протяжки, долбяки, фрезы, сверла |

Окончание табл. 1.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Твердые сплавы* | | | | | | |
| Вольфрамовые (однокарбидные) | WC | ВК2, ВК3, ВК6, ВК8 | *HRA* 74 – 86 | 800 – 900 | До 800 | Для обработки хрупких материалов, пластмасс, чугуна |
| Титановольфрамовые (двухкарбидные) | TiC + WC | Т5К10, Т14К8, Т15К6 | | | | Пластичные и вязкие материалы |
| Титанотанталовольфрамовые (трехкарбидные) | TiC + WC, | ТТ7К12, ТТ7К15, ТТ8К6 | | | | Для повышенной износостойкости сложного инструмента |
| *Минералокерамика* | | | | | | |
| Оксидная керамика | | ЦМ – 332, ВО – 13 | *HRA* 91 – 93 | 1200 | 1500 | Для чистовых операций (сталь, чугун), для трудно-обрабатываемых сталей |
| *Абразивы* | | | | | | |
| Электрокорунды | $Al_2O_3$ + + SiC + CrO | 15А, 53С | – | 1800 – 2000 | 15 – 100 м /с | Шлиф. круги, бруски и т. д. Окончательная обработка |
| *Природные алмазы и синтетические сверхтвердые материалы* | | | | | | |
| Алмазы и кубический нитрид бора | С | А, АСО, АСБ, АСВ, КНБ | – | 1150 | > 100 м /с | Резцы, сверла – тонкое точение – алюминий, бронза, латунь, пластмасса |

## 1.5. Физические основы резания

### *1.5.1. Стружкообразование при резании*

Резание является сложным физическим процессом, при котором возникают упругие и пластические деформации. Процесс сопровождается трением, тепловыделением, наростообразованием, усадкой стружки, наклепом обработанной поверхности и изнашиванием инструмента. Знание физической сущности резания и закономерности явлений, которыми он сопровождается, позволяет рационально управлять этим процессом и качеством обработанной поверхности.

В начальный момент, когда движущийся резец под действием силы *P* соприкасается с металлом (рис. 1.7, *а*), в материале возникают упругие деформации. При дальнейшем движении резец своей кромкой вдавливается в металл, вызывая его пластическое деформирование (рис. 1.7, *б*).

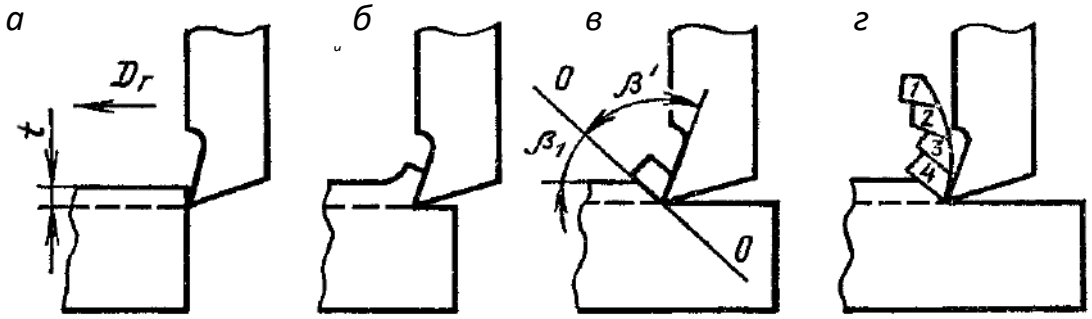



Рис. 1.7. Последовательность образования элементов стружки

По мере перемещения резца объем пластически деформированного металла возрастает, и внутренние напряжения достигают значений, превышающих временное сопротивление металла. В этот момент весь пластически деформированный металл под действием сил сдвигается резцом в виде окончательно сформированного элемента стружки (рис. 1.7, *в*). Далее процесс повторяется.

Срезаемый слой подвергается дополнительному деформированию вследствие трения стружки о переднюю поверхность инструмента. Окончательная структура формируется в виде вытянутых зерен (рис. 1.8).

Характер деформирования зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, геометрических параметров инструмента, режимов резания и условий обработки. По действующей

классификации профессора И. А. Тиме при обработке различных материалов могут образовываться следующие виды стружек: *сливная, скалывания и надлома.* Вид стружки в основном определяется физико-механическими свойствами обрабатываемого материала, режимом резания и геометрическими параметрами инструмента.

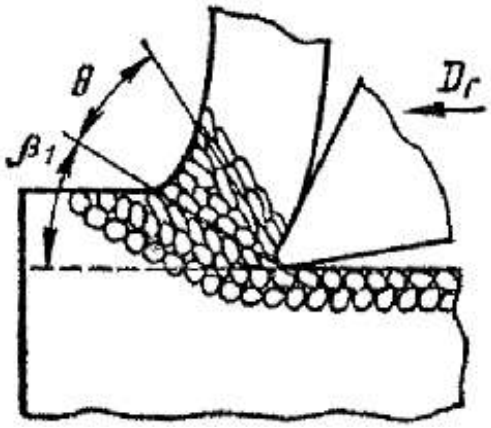



Рис. 1.8. Схема пластически деформированной зоны при резании

*Сливная стружка* (рис. 1.9, *а*) представляет собой сплошную ленту с гладкой блестящей наружной (прирезцовой) стороной. Внутренняя сторона стружки матовая со слабо выраженными пилообразными зазубринами. Она образуется при резании пластических материалов с большими скоростями резания, с малой толщиной срезаемого слоя и с большими передними углами инструмента.

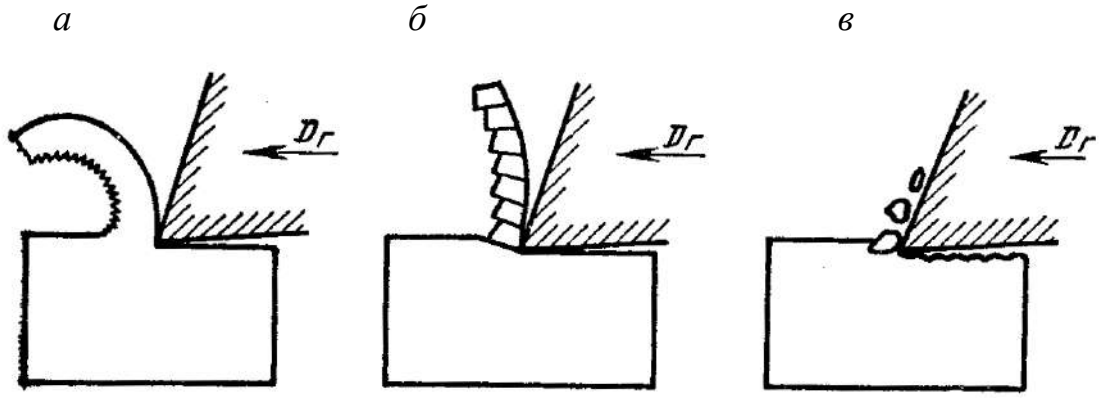



Рис. 1.9. Типы стружек:
*а* – сливная; *б* – скалывания; *в* – надлома

*Стружка скалывания* (рис. 1.9, *б*) с наружной стороны гладкая, а на внутренней имеет ярко выраженные зазубрины – отдельные элементы, соединенные между собой в ленту. Такая стружка характерна для обработки материалов средней твердости, при малых скоростях резания, с большой толщиной срезаемого слоя и небольшими передними углами.

*Стружка надлома* (рис. 1.9, *в*) образуется при обработке хрупких материалов. Под действием силы, приложенной к инструменту, происходит надлом и разрушение материала. Образуются мелкие разнообразных форм и размеров кусочки, не связанные или слабо связанные между собой. Обработанная поверхность при образовании такой стружки получается шероховатой с зазубринами и вырывами.

Изменяя условия и режим резания, можно получить различные виды стружки. По мере увеличения скорости резания большинства углеродистых и легированных конструкционных сталей стружка скалывания превращается в сливную. Повышение скорости резания при обработке хрупких материалов также приводит к упрочнению связей между отдельными элементами. Однако это сцепление легко нарушается и стружка, имеющая вид сливной, рассыпается на отдельные кусочки.

Образующаяся при обработке большинства сталей сливная стружка сходит в виде длинных полос или спирали. Она наматывается на механизмы станка, на инструмент и обрабатываемую заготовку, может травмировать рабочего, повредить обработанную поверхность. Кроме того, такая стружка загромождает цех, так как занимает большой объем. Оптимальной стружкой в массовом производстве считают спираль в виде отрезков длиной 30 – 80 мм, диаметром до 15 мм. Разработан ряд способов дробления стружки: регулирование режимов резания и геометрических параметров режущего инструмента; искусственное дробление с помощью различных приспособлений.

### *1.5.2. Усадка стружки*

В результате пластического деформирования обрабатываемого материала в зоне резания длина стружки $L_c$ (рис. 1.10) получается меньше длины срезаемого слоя $L$. Изменение размеров срезаемого слоя называется *усадкой стружки:* $k = L / L_c$.

Усадка стружки характеризуется $k_l$ – *коэффициентом усадки стружки*. Коэффициент усадки стружки является обратной величиной усадки:

$$k_l = L_c / L = \frac{1}{k}.$$

В тех случаях, когда длину стружки измерить трудно, $k_l$ определяют по соотношению площадей сечений стружки и срезаемого слоя.

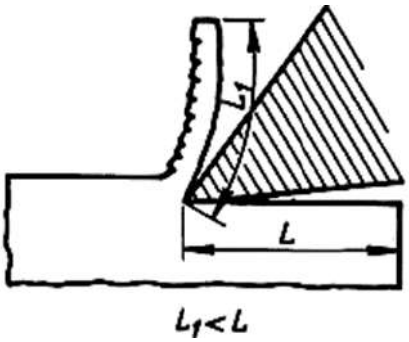



Рис. 1.10. Усадка стружки

Усадка стружки является внешним выражением пластического деформирования и характеризует условия протекания резания: чем меньше усадка стружки, тем меньше пластическая деформация, более благоприятные условия для стружкообразования и меньше расход мощности на обработку данной заготовки.

На усадку стружки основное влияние оказывают механические свойства обрабатываемого материала, передний угол инструмента γ, толщина срезаемого слоя (подача), скорость резания и применяемая смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ).

При резании пластичных материалов усадка стружки больше, чем при резании хрупких материалов. Например, при резании чугуна $k$ =1,5÷2,5, а при резании стали $k$ = 2÷6.

С уменьшением угла γ усадка стружки увеличивается. Чем больше γ, тем меньше деформируется срезаемый слой. Уменьшение усадки с увеличением скорости резания объясняется снижением коэффициента трения между стружкой и передней поверхностью резца. Увеличение толщины срезаемого слоя (подачи) ведет к уменьшению усадки стружки. Чем тоньше срезаемый слой, тем больше его деформация и больше $k_l$.

Применение СОЖ снижает коэффициент трения, уменьшает коэффициент усадки стружки. Эффект от влияния СОЖ увеличивается с уменьшением срезаемого слоя.

### *1.5.3. Силы резания при точении*

В процессе резания, в результате сопротивления деформированию, возникает сила сопротивления резанию $P$. Для практических целей обычно рассматривается не сама сила $P$, а ее составляющие $P_x$, $P_y$, $P_z$ (рис. 1.11).

*Главная (касательная) составляющая силы резания* $P_z$ совпадает по направлению со скоростью резания в вершине лезвия. С учетом силы

$P_z$ рассчитывают на прочность детали и узлы коробки скоростей станка, определяют потребляемую мощность.

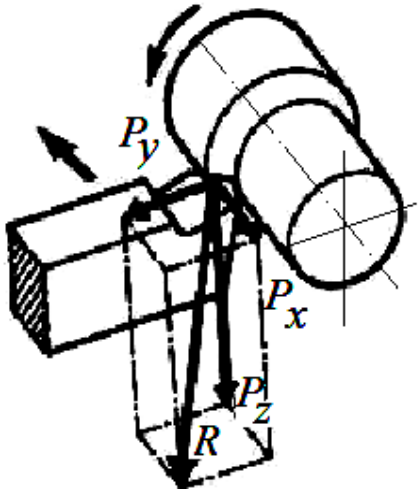



Рис. 1.11. Разложение силы резания на составляющие

*Радиальная составляющая силы резания* $P_y$ направлена по радиусу (перпендикулярно оси заготовки). Эта составляющая определяет силу отжима резца и прогиб заготовки, влияющие на точность обработки. По силе $P_y$ рассчитывают на прочность механизм поперечной подачи.

*Осевая составляющая силы резания* $P_x$ действует вдоль оси главного вращательного движения резания. По этой силе рассчитывают механизм продольной подачи станка и изгибающий момент, действующий на тело резца.

Силу $P_z$ называют главной составляющей силы резания и на практике мощность, расходуемая на резание, рассчитывается по силе $P_z$

$$N_e = P_z \cdot V,$$

где $V$ – скорость резания, м/мин.

С учетом коэффициента полезного действия станка η можно подсчитать необходимую мощность электродвигателя:

$$N_{э.д.} = N_e / \eta,$$

где η = 0,75 – 0,80.

Так как влияние различных факторов на силы резания весьма сложно, для определения сил резания приняты упрощенные эмпирические формулы

$$P_z = C_p t^x S^y V^z k_p,$$

где *x, y, z* – показатели степеней, учитывающие влияние элементов режима резания (*t, S, V*) на величину силы резания; $C_p$ – коэффициенты, учитывающие физико-механические свойства обрабатываемого мате-

риала; $k_р$ – обобщенные поправочные коэффициенты, численно равные произведению коэффициентов, учитывающие условия обработки.

### *1.5.4. Наклеп при резании*

В процессе резания инструмент получает скругление режущей кромки, в стружку переходит часть срезаемого металла, равная $a_ф$ (рис. 1.12). Слой металла, равный ($a_t - a_ф$) и соизмеримый с радиусом режущего клина ρ, упругопластически деформируется и проходит под резцом. После прохождения клина резца относительно обработанной поверхности происходит упругое восстановление поверхностного деформированного слоя на величину $h_у$ – упругое восстановление.

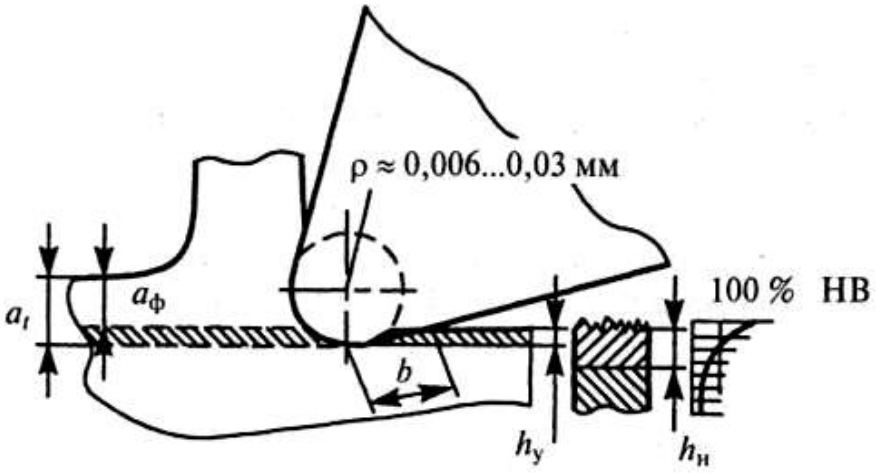



Рис. 1.12. Образование наклепа

В результате сил трения и сил давления, возникающих между задней поверхность резца и обработанной поверхностью, происходит дополнительная упругопластическая деформация поверхностного слоя, сопровождающаяся изменением физических свойств материала (временное сопротивление $σ_в$, предел текучести $σ_т$, твердость *HB*).

Совокупность изменения указанных свойств материала называют **наклепом.** Наклеп характеризуется глубиной $h_н$ и степенью наклепа

$$i_н = HV_{пов} / HV_{исх},$$

где $HV_{пов}$ и $HV_{исх}$ – микротвердость поверхностного и исходного материала.

Глубина и степень наклепа зависят от физико-механических свойств обрабатываемого материала, геометрических параметров инструмента, радиуса кривизны вершины лезвия, режима резания.

Глубина $h_н$ составляет несколько миллиметров при черновой обработке и тысячные доли миллиметров – при чистовой.

Чем мягче и пластичнее обрабатываемый материал, тем больше наклеп. Глубина наклепанного слоя возрастает с увеличением сечения срезаемого слоя, радиуса режущего клина ρ и уменьшением переднего угла γ. Увеличение скорости резания также снижает глубину наклепа $h_н$.

Упрочнение обработанной поверхности полезно при чистовой обработке. Однако повышение твердости поверхностного слоя в результате черновой обработки затрудняет чистовую обработку, так как повышается износ инструмента и увеличивается шероховатость поверхности. Уменьшить глубину и степень наклепа можно применением СОЖ, увеличением скорости резания и термообработкой.

### *1.5.5. Наростообразование*

При некоторых условиях резания под влиянием высоких давлений и температур (> 200 °С) частицы обрабатываемого материала задерживаются на передней поверхности режущего клина, прочно сцепляются с ней, образуя **нарост**. Вследствие значительных деформаций частиц, присоединившихся к передней поверхности клина, твердость нароста в 2 – 3 раза больше твердости обрабатываемого материала и нарост сам начинает резать обрабатываемый материал.

При наличии нароста изменяется форма передней поверхности резца, увеличивается передний угол γ (рис. 1.13). Это облегчает стружкообразование, уменьшает нагрев режущего лезвия, защищает его от износа.

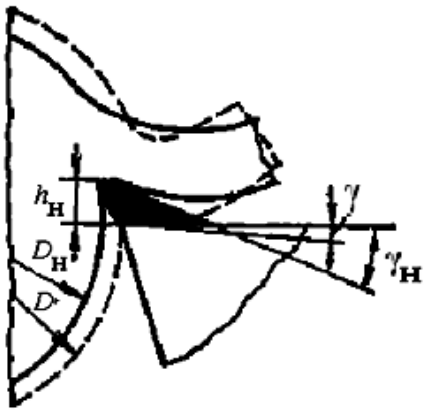



Рис.1.13. Схема наростообразования и влияние нароста на размер детали (γ, $γ_н$ – передние углы соответственно без нароста и с наростом; $D$ и $D_н$ – соответственно диаметры детали)

Образование нароста явление нестабильное. В процессе обработки нарост, постепенно формируясь, достигает максимального значения. Затем за счет сил трения он может быть унесен со стружкой или вдавлен в обработанную поверхность. Нестабильность нароста

приводит к существенному увеличению шероховатости обработанной поверхности и изменяет её размер.

Нарост является положительным явлением при черновой обработке и отрицательным – при чистовой.

Наростообразование зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, режима резания, геометрических параметров инструмента, применения СОЖ. Наиболее интенсивно нарост образуется при обработке пластичных материалов. Зависимость высоты нароста $h_н$ от скорости резания $V$дана на рис. 1.14. С увеличением подачи размеры нароста увеличиваются.

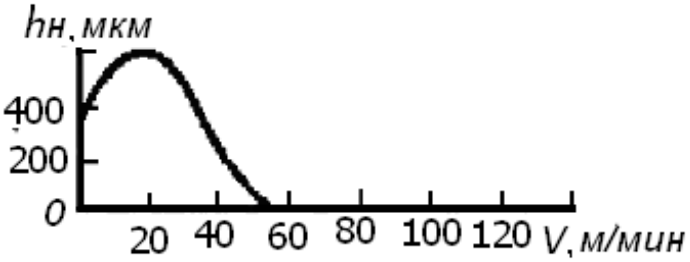



Рис. 1.14. Зависимость величины нароста от скорости резания для стали 40Х

Глубина резания существенного влияния на размеры нароста не оказывает. С уменьшением переднего угла γувеличивается зона деформированного материала и, следовательно, увеличивается нарост. Применение СОЖ уменьшает нарост.

### *1.5.6. Тепловые явления при резании*

*Теплота* – один из основных факторов, влияющих на резание. Теплообразование оказывает двойное воздействие на процесс резания.

С одной стороны, интенсивное тепловыделение облегчает деформирование материала срезаемого слоя. С другой стороны, тепловое воздействие на режущее лезвие инструмента приводит к снижению твердости.

Кроме того, с повышением температуры инструмента увеличиваются его размеры, что вызывает снижение точности обработки.

Почти вся механическая энергия, затрачиваемая на деформирование, разрушение и трение, переходит в тепловую. Поэтому количество $Q$ выделяющейся теплоты в единицу времени (Дж/с) можно подсчитать по формуле

$$Q = P_z \cdot V,$$

где $P_z$ – сила резания, Н; $V$ – скорость резания, м/мин.

Уравнение теплового баланса можно представить следующим образом:

$$Q_д + Q_{т.п.} + Q_{т.з.} = Q_{стр.} + Q_з + Q_и + Q_{окр},$$

где $Q_д$ – количество теплоты, выделяющееся при пластическом деформировании обрабатываемого материала; $Q_{т.п.}$ – количество теплоты, выделяющееся при трении стружки о переднюю поверхность инструмента; $Q_{т.з}$ – количество теплоты, выделяющееся при трении задней поверхности лезвия о заготовку; $Q_{стр}$ – количество теплоты, уходящей в стружку; $Q_з$ – количество теплоты, уходящей в заготовку; $Q_и$ – количество теплоты, уходящей в инструмент; $Q_{окр.}$ – количество теплоты, передаваемое окружающей среде.

Источниками теплоты при резании являются: пластическое деформирование в зоне стружкообразования $Q_з$, трение стружки о переднюю поверхность инструмента $Q_{т.п.}$ и трение поверхности резания о заднюю поверхность лезвия инструмента $Q_{т.з.}$ (рис. 1.15).

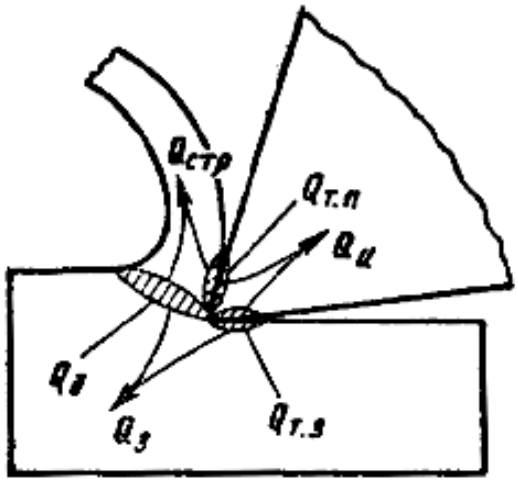



Рис.1.15. Источники образования и распределение теплоты при резании

Количественное выражение составляющих уравнения теплового баланса зависит от вида операции, физико-механических свойств материала заготовки и инструмента, режима резания и геометрических параметров инструмента, условий обработки.

Например, при точении конструкционных материалов наибольшее количество теплоты уходит в стружку, а при сверлении – в обрабатываемую заготовку. При обработке сталей со скоростями резания до 50 м/мин количество теплоты, выделяющееся при пластическом деформировании $Q_д = 0{,}75Q$, при $V = 200$ м/мин – $Q_д = 0{,}25Q$, следовательно, при скоростном резании основным источником теплоты является трение.

С уменьшением переднего угла γ увеличивается сила резания и, следовательно, температура резания. С уменьшением угла в плане φ

удлиняется активная часть режущей кромки, увеличивается угол при вершине **ε** – за счет этого улучшается теплоотвод.

### *1.5.7. Изнашивание и стойкость инструмента*

Одной из основных характеристик работоспособности режущего инструмента является его способность сопротивляться изнашиванию. При изнашивании имеют место абразивный, адгезионный, диффузионный и окислительный процессы (рис. 1.16).

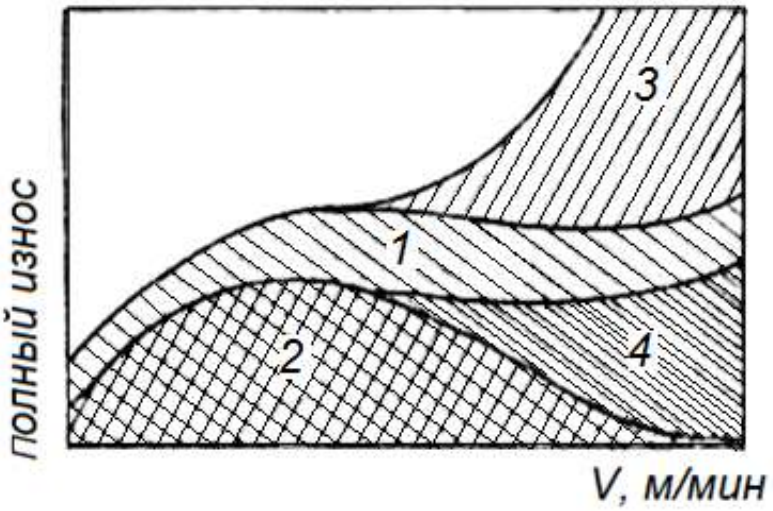



Рис. 1.16.Основные причины износа режущего клина их влияние на износ в зависимости от скорости резания

*Абразивное изнашивание* (1) – результат царапания и истирания отдельных участков поверхностей инструмента твердыми включениями, находящимися в обрабатываемом материале.

*Адгезионное изнашивание* (2) происходит в результате действия сил молекулярного сцепления – адгезии, выражающейся в схватывании поверхностных слоев режущего инструмента с обрабатываемым материалом.

*Диффузионное изнашивание* (3) происходит в результате растворения инструментального материала в обрабатываемом. Взаимному диффузионному растворению способствует высокая температура, большие пластические деформации и схватывание в контакте. При этом происходит диффузия не молекул химического соединения, а отдельных элементов этого соединения, например, углерода, кобальта, титана, вольфрама, входящих в состав инструментального материала. Наиболее подвержены диффузионному изнашиванию твердые сплавы, работающие при высоких скоростях резания, когда температура контактных слоев более 900 – 950 °С.

*Окислительное изнашивание* (4) происходит в связи с коррозией металлов в условиях активного охлаждения зоны резания и газонасыщения; происходит разрушение поверхностного слоя путем образования оксидов и растравливания зерен в сочетании с царапанием и истиранием.

При обработке резанием в условиях сухого и полусухого трения преобладающим является *абразивное* изнашивание. В результате изнашивания на передней поверхности появляется лунка длиной $l_л$ и глубиной $\delta_л$, а на задней поверхности – площадка высотой $h_з$ (рис. 1.17). В зависимости от условий обработки и свойств обрабатываемого материала может преобладать износ по той или иной поверхности.

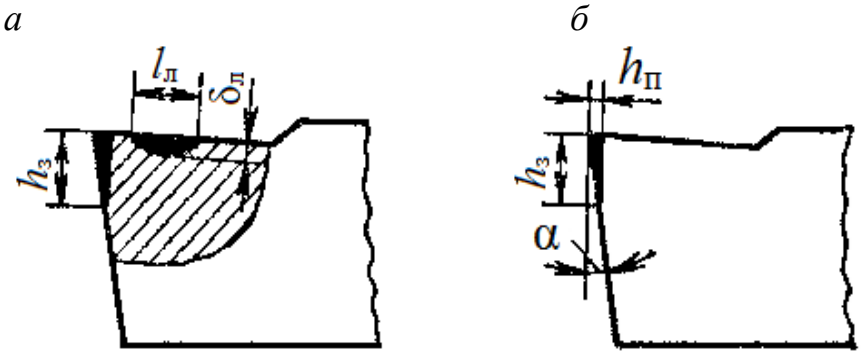



Рис. 1.17. Виды износа инструмента:
*а* – общий (по задней и передней поверхностям); *б* – по задней поверхности

Износ по задней поверхности преобладает при обработке твердых хрупких материалов, а также и пластичных материалов с малой глубиной резания ($t \leq 0{,}1$) и низких скоростях.

Износ по передней поверхности $h_п$ преобладает при обработке пластичных материалов с глубиной резания более 0,5 мм и высоких скоростях резания без охлаждения. По мере изнашивания резца длина лунки $l_л$ увеличивается, ширина перемычки уменьшается. Для восстановления геометрической формы инструмент затачивается.

Время резания новым или вновь заточенным инструментом от начала резания до отказа (затупления) называется ***периодом стойкости*** инструмента.

***Критерий отказа*** инструмента определяется в зависимости от требований к обработке при выполнении конкретной технологической операции. Например, при предварительной обработке с невысокими требованиями к шероховатости поверхности и точности размеров, за критерий отказа могут быть приняты значения износа инструмента по задней поверхности лезвия (высота площадки износа по

задней поверхности $h_з$). На рис. 1.18 показана зависимость $h_з$ от продолжительности работы инструмента. Кривую изнашивания можно разделить на три периода: ***I*** – период приработки, в который происходит истирание выступающих частиц поверхности инструмента; ***II*** – период нормального изнашивания; ***III*** – период катастрофического изнашивания. Величину $h_з$, соответствующую точке перегиба на кривой износа, называют *оптимальным износом.*

При чистовой обработке установлен так называемый *технологический критерий затупления*. Инструмент считается изношенным, когда шероховатость обработанной поверхности и точность ее размеров перестают отвечать заданным техническим условиям.

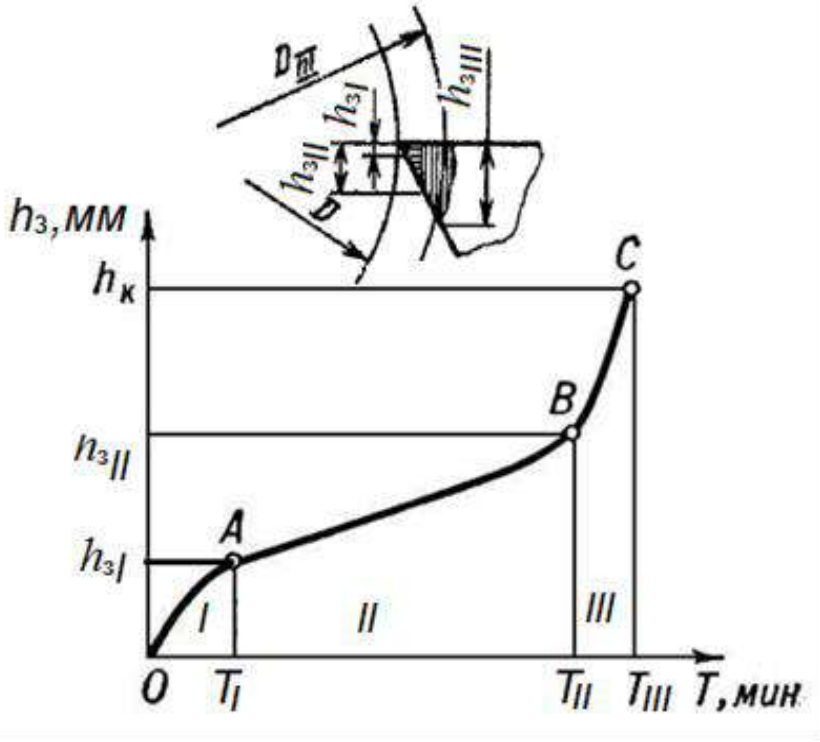



Рис. 1.18. Характер изнашивания задней поверхности режущего инструмента:
*OA* – период приработки; *AB* – период рабочего изнашивания;
*BC* – период катастрофического изнашивания

Наибольшее влияние на интенсивность изнашивания оказывает скорость резания. Чем выше скорость резания, тем быстрее начинается катастрофическое изнашивание (см. рис. 1.18), что вызвано возрастанием температуры в зоне резания. Чем выше скорость резания, тем меньше стойкость инструмента из инструментальных сталей.

Стойкость инструмента $T$ – время его работы между переточками при определенном режиме резания (т. е. время до достижения износом критерия затупления).

Стойкость инструмента зависит от материалов инструмента и заготовки, а также параметров режима резания. Наибольшее влияние на стойкость инструмента оказывает скорость резания, при этом для твердосплавного инструмента эта зависимость имеет более сложный характер (рис. 1.19), что объясняется преобладанием разных видов износа на разных скоростях резания. Зоной рационального использования твердого сплава является участок, расположенный вправо от максимальной стойкости.

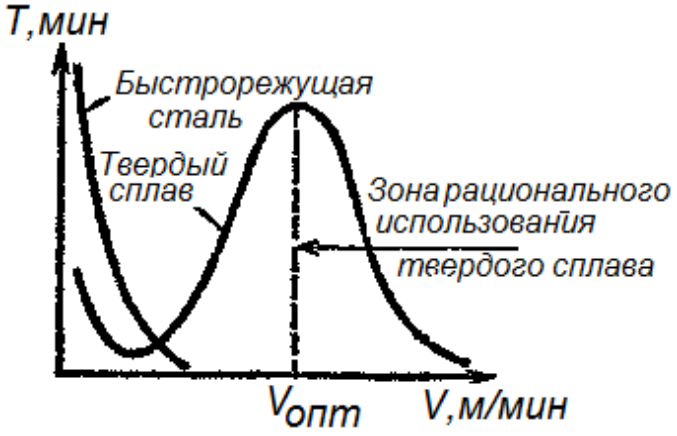



Рис. 1.19. Зависимость стойкости резца от скорости резания *V*

### *1.5.8. Охлаждение и смазывание при резании*

Смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС) при обработке резанием значительно уменьшают изнашивание режущего инструмента и силы резания, улучшают качество обработанной поверхности, повышают эксплуатационные характеристики деталей.

Применение СОТС является одним из основных способов улучшения резания труднообрабатываемых материалов. СОТС всех видов должны отвечать следующим требованиям: не вызывать коррозию материала заготовки и оборудования; не оказывать вредного физиологического влияния на рабочего (раздражение кожи и слизистых оболочек, запах); быть устойчивыми при эксплуатации и хранении; не воспламеняться при температурах, сопровождающих процесс резания.

В зависимости от технологического метода обработки, физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, режима резания **применяют различные смазочно-охлаждающие средства:** ***твердые, жидкие, пластичные и газообразные.***

***К твердым смазочно-охлаждающим средствам относятся:*** неорганические материалы со сложной структурой (тальк слюда, графит, бура, нитрид бора, дисульфиды молибдена вольфрама и титана, сульфат серебра и др.); *твердые органические соединения* (мыло,

воск, твердые жиры); *полимерные пленки и ткани* (нейлон, полиамид, полиэтилен и др.); *металлические пленочные покрытия* (медь, латунь, свинец, олово, барий, цинк); *лед и перешедшие при низких температурах в твердое состояние жидкости и газы.*

***К смазочно-охлаждающим жидкостям (СОЖ) относятся:*** водные растворы минеральных электролитов, эмульсии; минеральные, животные и растительные масла; минеральные масла с добавками фосфора, серы и хлора (сульфофрезолы); керосин и растворы поверхностно-активных веществ в керосине; масла и эмульсии с добавками твердых смазывающих веществ; расплавы металла и др.

***К пластичным смазочным веществам*** **относятся:** густые мазеобразные продукты, занимающие по консистенции промежуточное положение между твердыми и жидкими смазочными веществами. Их получают загущением минеральных и синтетических масел. Применяют в основном четыре вида загустителей: мыльные, углеводородные, неорганические и органические.

***К газообразным смазочным веществам*** **относятся:** воздух, азот, двуокись углерода, кислород, пары поверхностно-активных веществ, распыленные жидкости.

Выбор СОТС определяется физико-механическими свойствами обрабатываемого и инструментального материалов и технологического метода обработки. Для каждого конкретного случая подбирают определенное, наиболее эффективное, СОТС.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Дайте определение элементам режима резания.
2. Назовите основные элементы лезвия токарного резца и дайте им определение.
3. Дайте определение углам $\gamma$, $\alpha$, $\beta$, $\delta$, $\varphi$, $\varphi'$, $\lambda$ и укажите назначение каждого из них.
4. Как изменяются углы резца в зависимости от положения его вершины относительно оси вращения обрабатываемой заготовки?
5. Перечислите требования, предъявляемые к инструментальным материалам.
6. Перечислите основные группы материалов, применяемых для изготовления режущего инструмента.
7. Сравните теплостойкость быстрорежущих сталей и твердых сплавов.
8. При каких режимах резания целесообразно использовать режущий инструмент из керамического материала?

9. Назовите область применения инструментов из сверхтвердых материалов.
10. Назовите основные виды стружки.
11. Какие силы действуют на лезвие инструмента со стороны обрабатываемого материала?
12. Что называют наклепом обработанной поверхности?
13. Какое влияние оказывает нарост на процесс резания и качество обработанной поверхности?
14. Перечислите источники теплоты при резании.
15. Какое влияние оказывает теплообразование на процесс резания?
16. Какие процессы изнашивания инструмента имеют место при резании?
17. Какие факторы влияют на стойкость инструмента?
18. Каково назначение СОТС?

# 2. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

**В основу классификации металлорежущих станков (М. с.) положен технологический принцип**.

В зависимости от характера выполняемых работ и применяемого режущего инструмента ***в нашей стране была принята единая система классификации и условного обозначения М. с.*** (табл. 2.1), разработанная в ЭНИМС.

**Все М. с. делятся на группы, которые, в свою очередь, разбиваются на типы**.

По этой классификации каждому М. с. серийного производства присваивается шифр (индекс), который образуется, как правило, числом из 3 или 4 цифр; *первая цифра* указывает группу, *вторая* – тип, третья и *четвёртая* характеризуют основные размеры рабочего пространства М. с. или обрабатываемого на нём изделия.

*Например,* шифр 2150 обозначает вертикально-сверлильный станок с максимальным диаметром сверления 50 мм.

После модернизации М. с. в его шифр за первой цифрой добавляется какая-либо буква.

*Например,* шифр 1К62 обозначает модернизированный токарно-винторезный станок с высотой центров 200 мм. *Модификация* (видоизменение) *базовой модели обозначается введением какой-либо буквы в конце шифра.* Например, 6Н12К обозначает модификацию модернизированного консольного вертикально-фрезерного станка (см. табл. 2.1). Буква, стоящая в конце шифра, может означать точность станка.

**По точности различают 5 классов М. с**.: Н – нормальной точности (например, большинство универсальных М. с.), П – повышенной точности (на базе Н), В – высокой точности, А – особо высокой точности (прецизионные), С – особо точные, или мастер-станки.

**По универсальности и специализации станки делятся** *на универсальные, специализированные и специальные.*

*Универсальные станки* предназначены для изготовления широкой номенклатуры деталей малыми партиями, их используют в единичном и мелкосерийном производствах.

*Специализированные станки* используют для изготовления больших партий деталей одного типа (зубчатые колеса, коленчатые валы, кольца подшипников и т. п.)

*Специальные станки* применяют для обработки одной или нескольких мало различающихся заготовок в условиях крупносерийного и массового производства. Эти станки обеспечивают наивысшую производительность и имеют высокий уровень автоматизации.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Поясните принципы классификации и обозначения станков.
2. Какие движения в станках называют формообразующими?
3. Какое движение называют главным движением резания?
4. В чем преимущество геометрического ряда частот вращения?
5. Каким образом увеличить крутящий момент на шпинделе?

**К Л А С С И Ф И К А Ц И Я**

<table>
<tr><td rowspan="2">Группа</td><td rowspan="2">Наименование группы станков</td><td colspan="4">Т и п ы</td></tr>
<tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr>
<tr><td rowspan="2">1</td><td rowspan="2">Токарные</td><td colspan="2">Автоматы и полуавтоматы</td><td rowspan="2">Револьверные</td><td rowspan="2">Токарно-револьверные полуавтоматы</td></tr>
<tr><td>одношпиндельные</td><td>многошпиндельные</td></tr>
<tr><td rowspan="2">2</td><td rowspan="2">Сверлильные и расточные</td><td rowspan="2">Вертикально-сверлильные</td><td colspan="2">Полуавтоматы</td><td rowspan="2">Координатно-расточные</td></tr>
<tr><td>одношпиндельные</td><td>многошпиндельные</td></tr>
<tr><td>3</td><td>Шлифовальные и доводочные</td><td>Круглошлифовальные</td><td>Внутришлифовальные</td><td>Обдирочно-шлифовальные</td><td>Специализированные шлифовальные</td></tr>
<tr><td>4</td><td>Электрофизические и электрохимические</td><td>–</td><td>Светолучевые</td><td>–</td><td>Электрохимические</td></tr>
<tr><td>5</td><td>Зубо- и резьбообрабатывающие</td><td>Зубострогальные для цилиндрических колёс</td><td>Зуборезные для конических колёс</td><td>Для цилиндрических колёс и шлицевых валов</td><td>Для червячных колёс</td></tr>
<tr><td>6</td><td>Фрезерные</td><td>Вертикально-фрезерные консольные</td><td>Фрезерные непрерывного действия</td><td>–</td><td>Копировальные и гравировальные</td></tr>
<tr><td rowspan="2">7</td><td rowspan="2">Строгальные, долбёжные и протяжные</td><td colspan="2">Продольные</td><td rowspan="2">Поперечно-строгальные</td><td rowspan="2">Долбёжные</td></tr>
<tr><td>одностоечные</td><td>двухстоечные</td></tr>
<tr><td rowspan="2">8</td><td rowspan="2">Разрезные</td><td colspan="3">Отрезные работающие</td><td rowspan="2">правильно-отрезные</td></tr>
<tr><td>токарным резцом</td><td>абразивным кругом</td><td>гладким или насеченным диском</td></tr>
<tr><td>9</td><td>Разные</td><td>Муфто- и трубообрабатывающие</td><td>Пилонасекательные</td><td>Правильно- и бесцентрово-обдирочные</td><td></td></tr>
</table>

Таблица 2.1

**С Т А Н К О В**

| с т а н к о в | | | | | Группа |
|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Карусельные | Токарно-винторезные и лобовые | Многорезцовые | Специализированные для фасонных изделий | Разные токарные | 1 |
| Радиально-сверлильные | Расточные | Алмазно-расточные | Горизонтально-сверлильные | Разные сверлильные | 2 |
| Продольно-шлифовальные | Заточные | Плоскошлифовальные | Притирочные и полировальные | Разные станки, работающие абразивом | 3 |
| – | – | электроэрозионные, ультразвуковые, прошивочные | – | – | 4 |
| Для обработки торцов зубьев колёс | Резьбофрезерные | Зубоотделочные | Зубо- и резьбошлифовальные | Разные зубо- и резьбообрабатывающие | 5 |
| Вертикальные бесконсольные | Продольные | Широкоуниверсальные | Горизонтальные консольные | Разные фрезерные | 6 |
| Протяжные горизонтальные | Протяжные вертикальные для протягивания | | – | Разные строгальные | 7 |
| | внутреннего | наружного | | | |
| Ленточнопильные | Пилы отрезные | | – | – | 8 |
| | дисковые | ножовочные | | | |
| Для испытания инструмента | Делительные машины | Балансировочные | – | – | 9 |

# 3. ОБРАБОТКА НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ

## 3.1. Типы токарных резцов и их назначение

Большое количество различных видов работ, выполняемых на токарных станках, обуславливает многообразие конструкций резцов.

По назначению токарные резцы разделяются на проходные, расточные, подрезные, отрезные, фасонные, резьбовые и канавочные.

***Различают следующие виды точения:***

- *Обтачивание* – обработка наружных поверхностей (рис. 3.1 – 3.4);

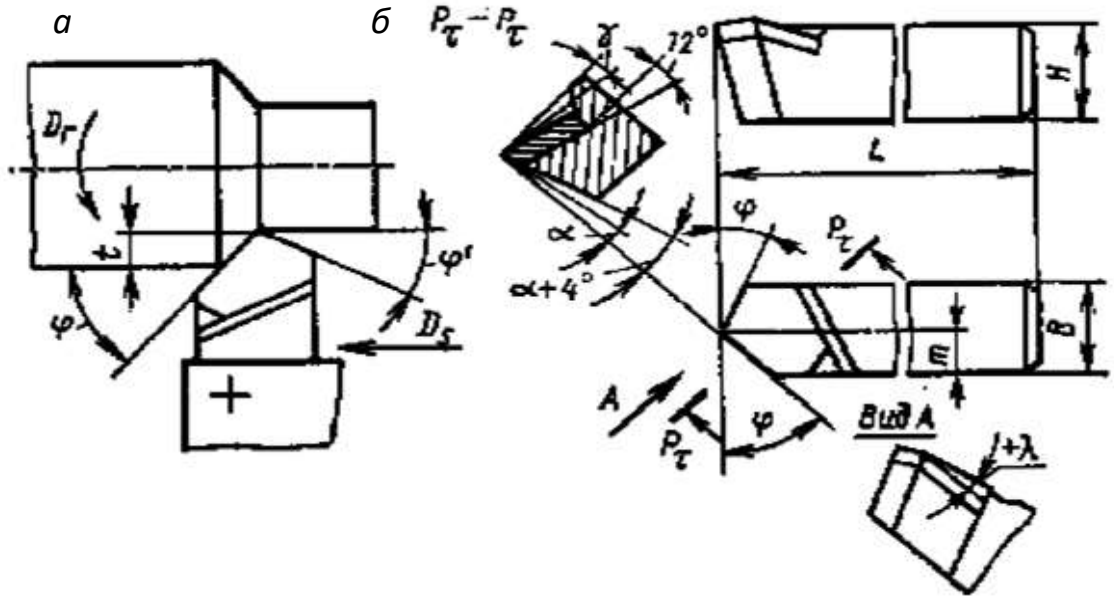



Рис. 3.1. Наружное точение прямым проходным резцом:
*а* – схема точения; *б* – прямой проходной резец, его геометрические параметры

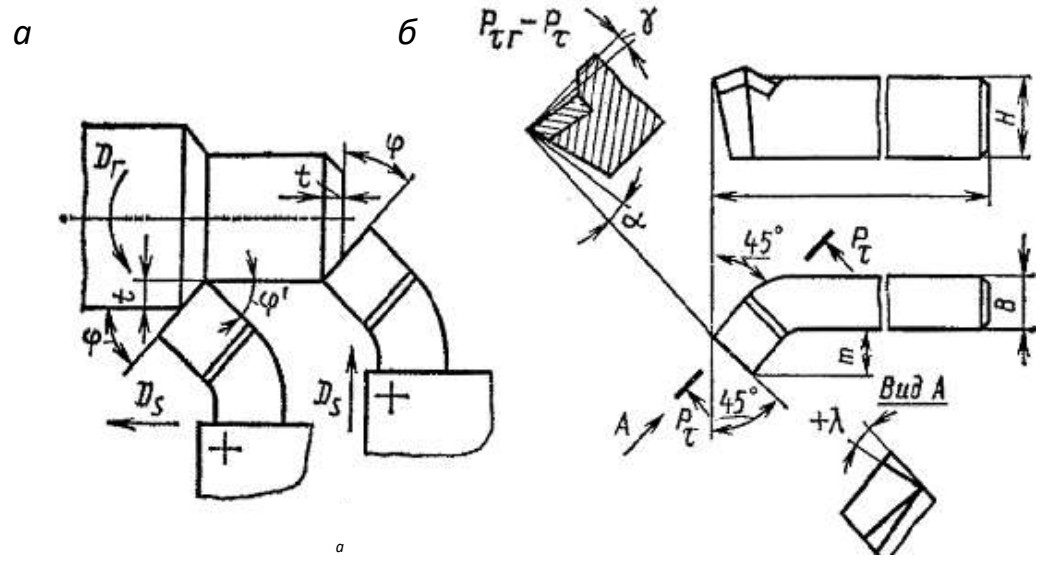



Рис. 3.2. Наружное точение проходным отогнутым резцом:
*а* – схема точения; *б* – проходной отогнутый резец, его геометрические параметры

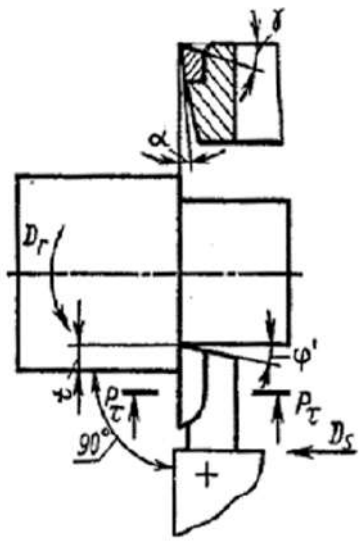


Рис. 3.3. Схема точения проходным упорным резцом

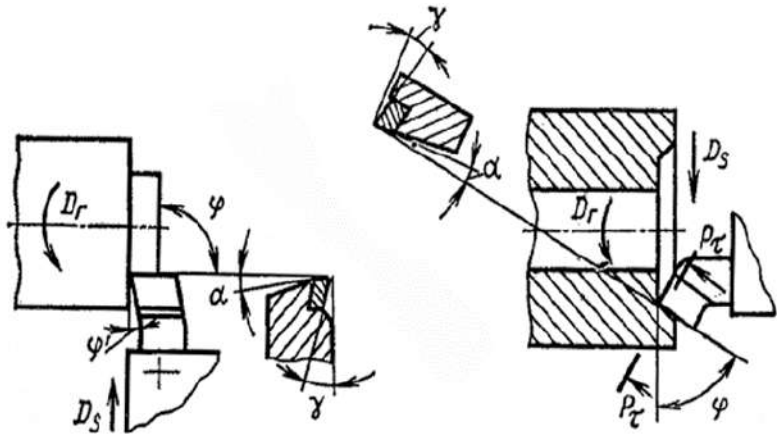


Рис. 3.4. Подрезные резцы

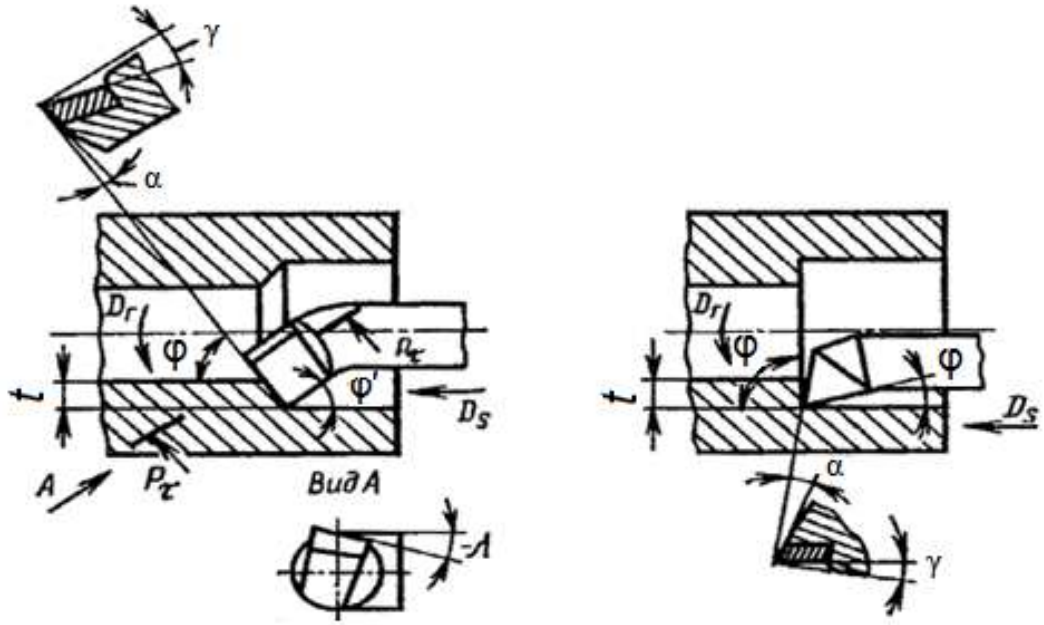


Рис. 3.5. Расточные токарные резцы:
*а* – проходной резец; *б* – упорный резец

*Растачивание* – обработка внутренних поверхностей (рис. 3.5);

- *Подрезание* – обработка плоских торцевых поверхностей (рис. 3.4);
- *Отрезка* – разделение заготовки на части, отделение готовой детали от заготовки (рис. 3.6);
- *Точение фасонных поверхностей* (рис. 3.7);
- *Нарезание наружных и внутренних резьб* (рис. 3.8).

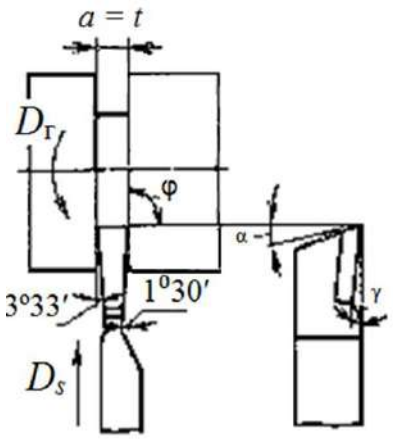



Рис. 3.6. Отрезной резец

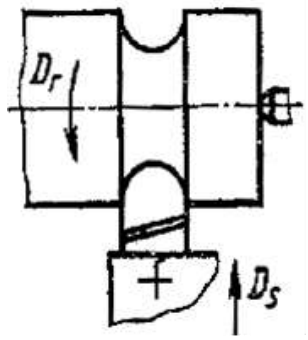



Рис. 3.7. Фасонный резец

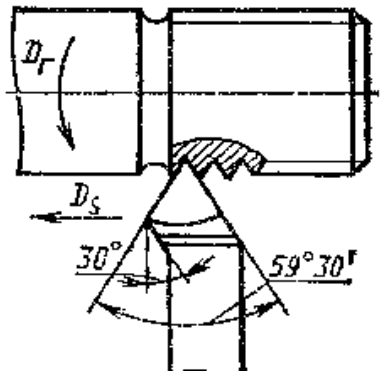



Рис. 3.8. Резьбовой резец

## 3.2. Станки токарной группы

На станках токарной группы выполняются различные операции по обработке поверхностей тел вращения. В состав этой группы входят токарные полуавтоматы и автоматы, токарноревольверные, токарно-карусельные, токарно-винторезные многорезцовые и специализированные токарные станки.

*Токарно-карусельные станки* применяются для обработки тяжёлых заготовок больших размеров, у которых соотношение высоты к диаметру составляет 0,3÷0,5. Особенностью таких станков является наличие кругового горизонтального стола с вертикальной осью вращения. Карусельные станки бывают одно- и двухстоечные. Диаметр карусели колеблется в пределах 0,5÷21 м.

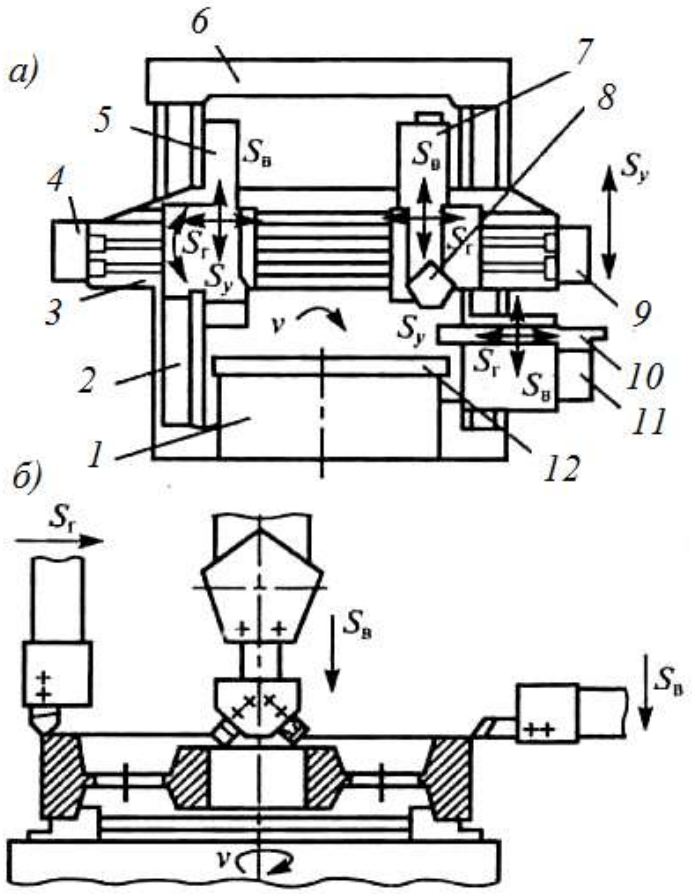



Рис. 3.9. Токарно-карусельный станок (*а*) и схема обработки заготовки (*б*):
*1* – станина; *2* – стойки; *3* – подвижная траверса; *4* – коробка подач на траверсе; *5* – верхний суппорт; *6* – поперечина; *7* – револьверный суппорт; *8* – револьверная головка; *9* – коробкой подач на траверсе; *10* – боковой суппорт; *11* – коробка подач на правой стойке; *12* – карусель

На рис. 3.9 показан двухстоечный карусельный станок, состоящий из карусели *12*, смонтированной на станине *1*, и стоек *2*, соединенных поперечиной *6*. По вертикальным направляющим стоек перемещается подвижная траверса *3*. На подвижной траверсе установлены верхний суппорт *5* с коробкой подач *4* и револьверный суппорт *7* с револьверной головкой *8* и коробкой подач *9*. На правой стойке установлен боковой суппорт *10* с коробкой подач *11*.

*Токарно-винторезные станки* из-за своих широких технологических возможностей получили наибольшее распространение. Узлы станка и его технологические возможности изучаются на лабораторных и практических занятиях.

*Токарно-револьверные станки* (рис. 3.10) используются для обработки сложных деталей, требующих применения большого числа режущих инструментов. У этих станков на направляющих станины вместо задней бабки установлен револьверный суппорт *4*, перемещающийся в продольном направлении. На суппорте размещена револь-

верная головка *3*, в радиальных или осевых отверстиях которой закрепляются инструменты (резцы, блоки резцов, осевые инструменты и т. п.).

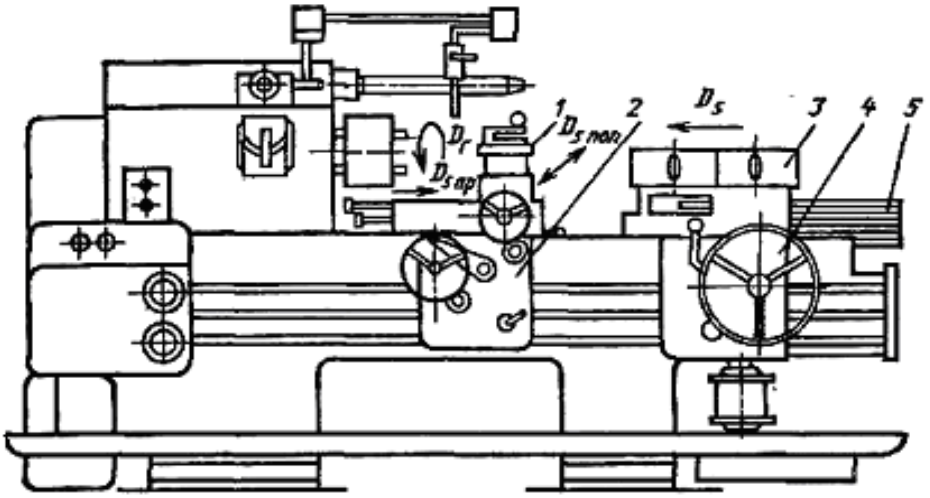



Рис. 3.10. Токарно-револьверный станок с вертикальной осью револьверной головки:
*1* – резцедержатель; *2* – суппорт; *3* – револьверная головка; *4* – револьверный суппорт; *5* – барабан упоров

Станки с вертикальной осью вращения револьверной головки имеют суппорт *2*, несущий резцедержатель *1*. Суппорт *2* совершает продольное $D_{S\text{поп}}$ и поперечное $D_{S\text{пр}}$ движения подачи. Особенностью токарно-револьверных станков является использование в их конструкции барабана упоров *5*, вращающегося синхронно с револьверной головкой. Длина упоров определяет длину обрабатываемой поверхности для каждой обрабатываемой поверхности. Наибольшее распространение этим станки получили в серийном производстве. Основные схемы обработки представлены на рис. 3.11.

Многорезцовые токарные полуавтоматы (рис. 3.12) применяются при обработке заготовок типа ступенчатых валов. Станки имеют два суппорта: верхний и нижний. Нижний суппорт имеет только продольную подачу, а верхний – только поперечную.

Заготовка устанавливается на станке в центрах, установленных в шпинделе коробки скоростей *2* передней бабки *3*, и в шпинделе задней бабки *5*. Крутящий момент передается на заготовку через кулачки зажимного патрона. На направляющих станины *1* смонтированы нижний и верхний суппорты. На многорезцовых токарных полуавтоматах обтачивают только наружные поверхности заготовок: цилиндрические, конические, фасонные, плоские торцевые, кольцевые канавки, фаски. Схема обработки представлена на рис. 3.13.

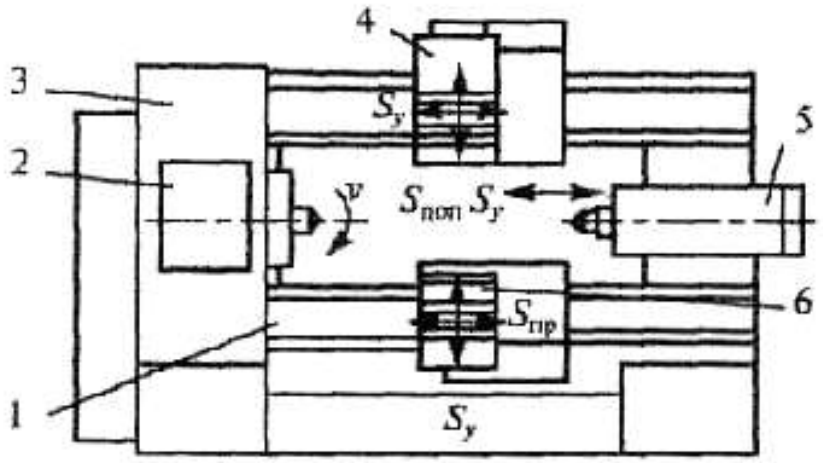



Рис. 3.12. Токарный многорезцовый полуавтомат:
*1* – направляющие станины; *2* – коробка скоростей; *3* – передняя бабка;
*4* – верхний суппорт; *5* – задняя бабка; *6* – верхний суппорт

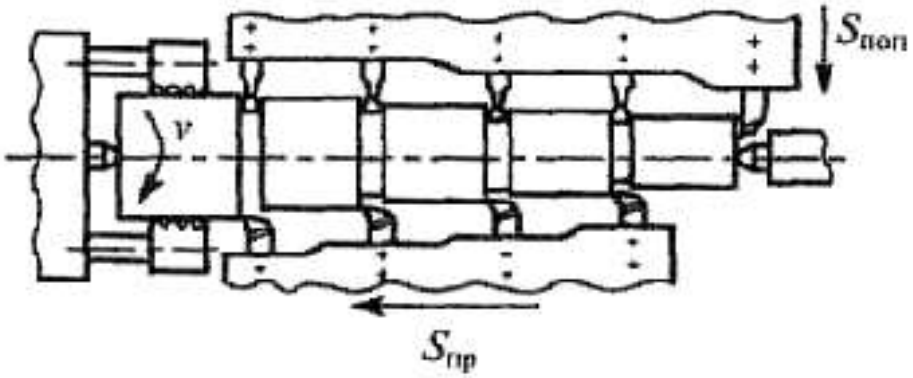



Рис. 3.13. Схема обработки заготовки на многорезцовом полуавтомате

### *3.2.1. Универсальные приспособления токарных станков*

**Кулачковые патроны**

На токарных станках применяют двух-, трех- и четырехкулачковые патроны. В двухкулачковых самоцентрирующих патронах закрепляют различные фасонные отливки и поковки, причем кулачки таких патронов часто предназначены для закрепления только одной детали. В трехкулачковых самоцентрирующих патронах закрепляют детали круглой и шестигранной формы или круглые прутки большего диаметра. В четырехкулачковых самоцентрирующих патронах закрепляются прутки квадратного сечения, а в патронах с индивидуальной регулировкой кулачков детали прямоугольной или несимметричной

формы. Кулачковые патроны выполняются с ручным и механизированным приводом зажимов. Наиболее распространен *самоцентрирующий трехкулачковый патрон* (рис. 3.14). Кулачки *1 – 3* перемещаются одновременно по спирали на диске *4*, в витки которой заходят кулачки ниж-

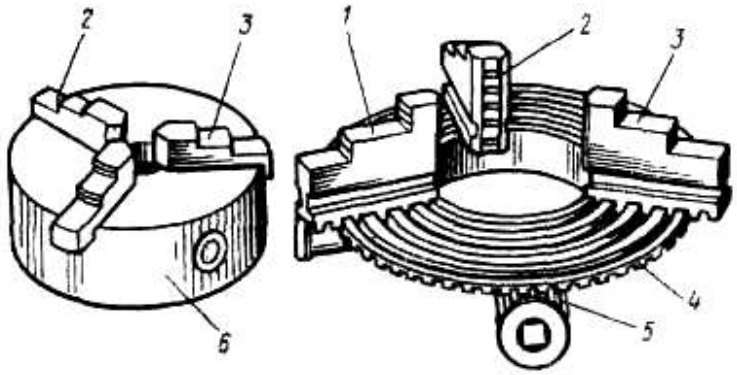



Рис. 3.14. Трехкулачковый самоцентрирующий патрон: *1–3* – кулачки; *4* – спираль на диске; *5* – конические зубчатые колеса;*6* – корпус патрона

ними выступами. На обратной стороне диска нарезано коническое колесо, сопряженное с тремя коническими зубчатыми колесами *5*. При повороте ключом одного из колес *5* поворачивается диск*4*, который с помощью спирали перемещает одновременно и равномерно все три кулачка по пазам корпуса *6* патрона. В зависимости от направления вращения колес *5* кулачки приближаются или удаляются от центра, соответственно, зажимая или освобождая деталь.

*Четырехкулачковый патрон* с независимым перемещением кулачков применяют преимущественно для закрепления и обработки деталей некруглой и несимметричной формы. Четырехкулачковый патрон с независимым перемещением кулачков (рис. 3.15) состоит из корпуса *1*, в

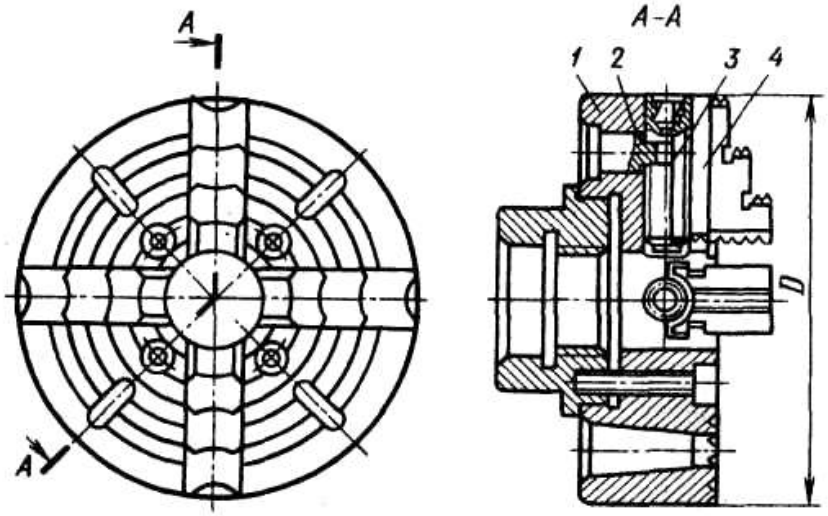



Рис. 3.15. Четырехкулачковый патрон с независимым перемещением кулачков: *1* – корпус патрона; *2* – сухарь; *3* – винт; *4* – кулачок

в котором выполнены четыре паза, в каждом пазу смонтирован кулачок *4* с винтом *3* для независимого перемещения кулачков по пазам в радиальном направлении. От осевого смещения винт *3* удерживается сухарем *2*. Кулачки могут быть повернуты на 180° для закрепления заготовок деталей по внутренней или наружной поверхности. На передней поверхности патрона нанесены концентричные риски (расстояние между ними 10 – 15 мм), которые позволяют выставить кулачки на одинаковом расстоянии от центра патрона.

**Центры. Хомутики**

**Центры**. В зависимости от формы и размеров обрабатываемых деталей применяют центры различных типов (рис. 3.16, *а* – *е*). Угол при вершине рабочей части центра обычно равен 60°. Конические поверх-

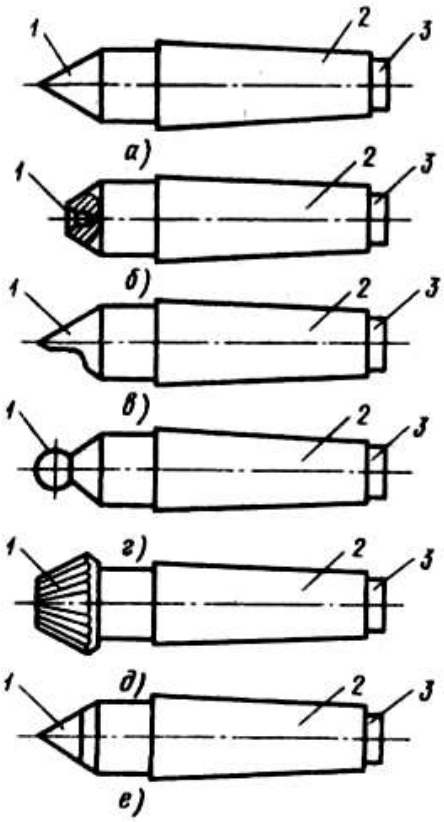



Рис. 3.16. Типы (*а* – *е*) центров:
*1*– рабочая часть; *2* – хвостовая часть;
*3* – опорная часть

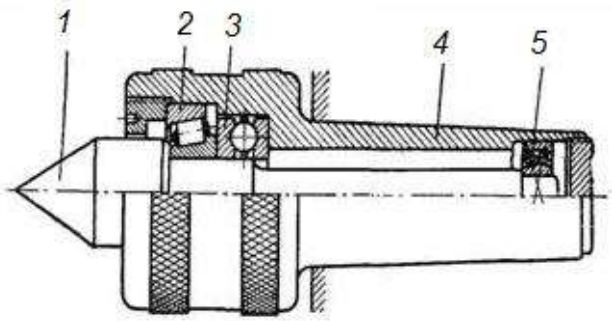



Рис. 3.17. Вращающийся центр:
*1* – центр; *2,3,5* – подшипники;
*4* – хвостовая часть

ности рабочей и хвостовой части центра не должны иметь забоин, так как это приводит к погрешностям при обработке деталей. Диаметр опорной части 3 меньше меньшего диаметра хвостовой части конуса.

Это позволяет выбирать центр из гнезда без повреждения конической поверхности хвостовой части. Центр, показанный на рис. 3.16, *б*, служит для установки заготовок диаметром до 4 мм. У таких заготовок вместо центровых отверстий имеются наружные конические поверхности с углом при вершине 60°, который входит во внутренний конус центра, названный обратным. Если необходимо подрезать торец заготовки, применяют срезанный центр (рис. 3.16, *в*), который устанавливают только в пиноль задней бабки.

Центр со сферической рабочей частью (рис. 3.16, *г*) применяют в тех случаях, когда требуется обработать заготовку, ось которой не совпадает с осью вращения шпинделя станка.

Центр с рифленой рабочей поверхностью рабочей части (рис. 3.16, *д*) используют при обработке заготовки с большим центровым отверстием без поводкового патрона.

В процессе обработки детали в центрах передний центр вращается вместе с ней и служит только опорой, а задний центр при этом неподвижен. Задний центр изготовляют из углеродистой стали с твердосплавной рабочей частью (рис. 3.16, *г*). При обработке с большими скоростями и нагрузками применяют задние вращающиеся центры (рис. 3.17).

**Хомутики**. Они предназначены для передачи вращения обрабатываемой детали, установленной в центрах станка. Хомутик надевают на обрабатываемую деталь и закрепляют винтом *1*. Хвостовиком *2* хомутик упирается в палец поводкового патрона (рис. 3.18, *а*).

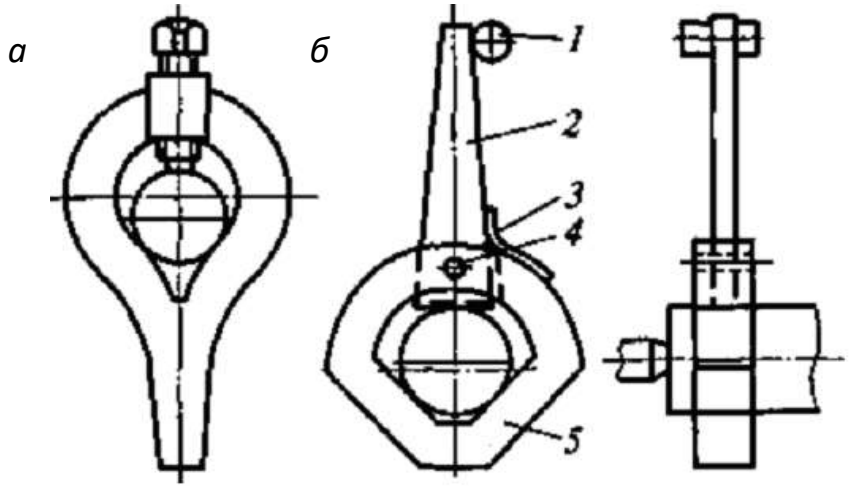



Рис. 3.18. Токарные хомутики:
*а* – обычный; *б* – самозатягивающийся;
*1* – палец-поводок; *2* – хвостовик; *3* – пружина; *4* – ось; *5* – корпус

**Поводковые патроны** применяют при обработке деталей в центрах *4* и *6* станка (рис. 3.19). Передача вращения осуществляется поводковым патроном *1* через палец-поводок *2* хвостовику *3* хомутика, который крепится на детали *5* винтом.

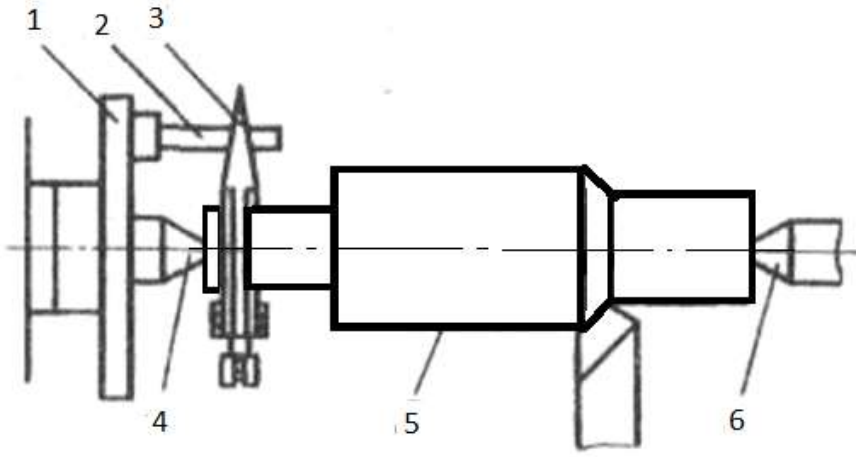



Рис. 3.19. Обработка заготовки в центрах с приводом от поводкового патрона:
*1* – поводковый патрон; *2* – палец-поводок; *3* – хомутик; *4* – передний центр;
*5* – обрабатываемая заготовка; *6* – задний центр

**Люнеты**

Для обработки длинных нежестких деталей типа валов используют дополнительные опоры – люнеты.

*Неподвижный люнет* (рис. 3.20) устанавливают на направляющих станины станка и крепят планкой *5* с помощью болта и гайки *6*. Верхняя часть *1* неподвижного люнета откидная, что позволяет снимать

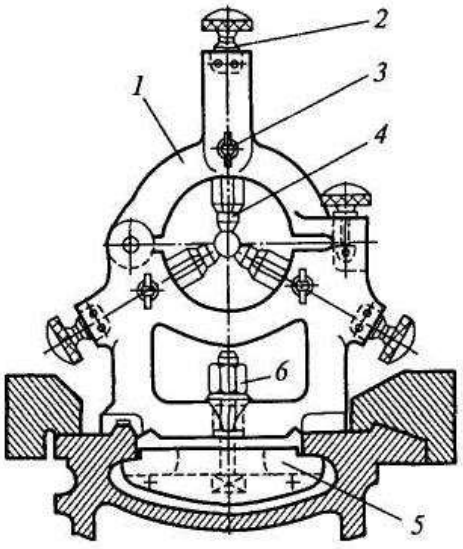



Рис. 3.20. Неподвижный люнет:
*1* – откидная часть; *2* – винты;
*3* – фиксирующие болты; *4* – кулачки

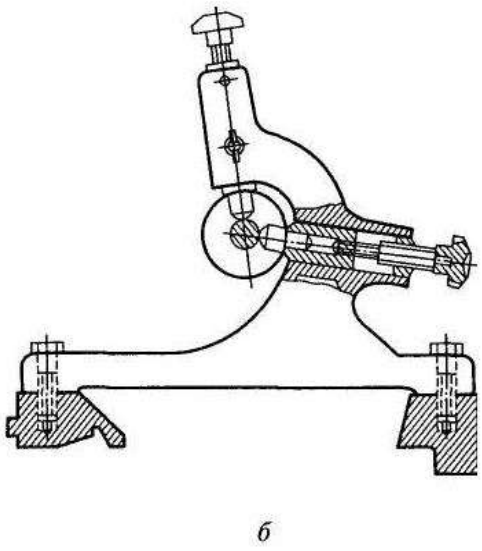



Рис. 3.21. Подвижный люнет

люнета; *5* – планка; *6* – болт с гайкой

и устанавливать заготовки на кулачки или ролики *4* люнета, которые служат опорой для обрабатываемой заготовки и поджимаются к детали винтами *2*. После установки заготовки винты *2* фиксируют болтами *3*.

На заготовке, в местах установки роликов люнета, протачивают канавку. Проточку обычно выполняют посередине заготовки. *Подвижный люнет* (рис. 3.21) крепится на каретке суппорта и перемещается при обработке вдоль детали. Подвижный люнет имеет два кулачка, которые служат опорами для заготовки. Третьей опорой является резец.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. По каким принципам классифицируют резцы?
2. Какие виды креплений режущих элементов используют?
3. Каковы преимущества у резцов с механическим креплением пластин?
4. В каком порядке проводится заточка поверхности лезвий резца?
5. Каково назначение ходового винта и ходового вала токарно-винторезного станка?
6. Где закрепляются инструменты на карусельных станках?
7. В чем различия токарно-револьверных станков основных типов?
8. Чем конструктивно различаются суппорты токарно-револьверного автомата?
9. Зачем и как изменяют частоту вращения распределительного вала за цикл обработки на автомате 1Б265-6К?
10. Какие типы устройств используют для управления работой в токарных автоматах и полуавтоматах?

# 4. ОБРАБОТКА НА СВЕРЛИЛЬНЫХ СТАНКАХ

Сверление, зенкерование и развертывание – широко распространенные в машиностроении процессы обработки глухих и сквозных отверстий в широком диапазоне диаметров (рис. 4.1).

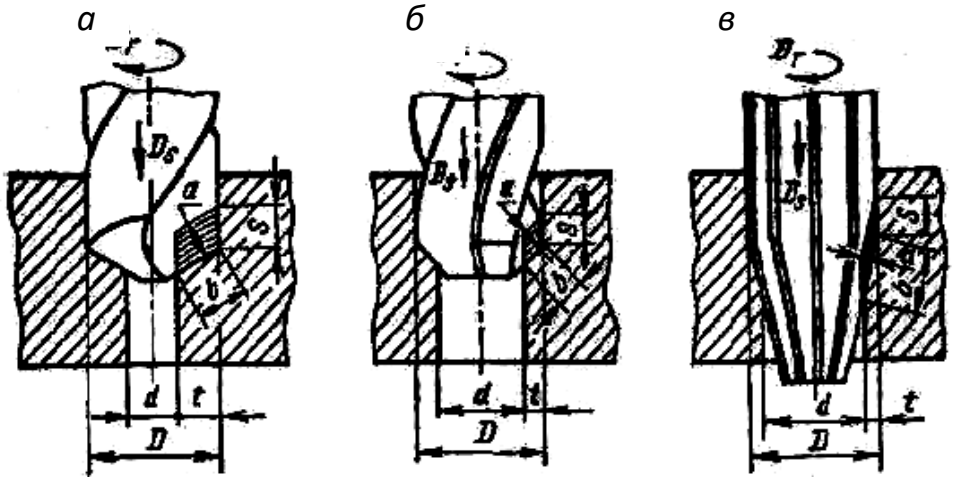



Рис. 4.1. Схемы обработки:
*а* – при рассверливании; *б* – зенкеровании; *в* – развертывании

Эти процессы осуществляются при сочетании вращательного движения инструмента вокруг своей оси – движения резания, и поступательного движения вдоль оси – движения подачи. Инструменты для этих процессов называют осевыми.

## 4.1. Характеристика методов обработки осевым инструментом

***Сверление*** **–** черновая обработка отверстий в сплошном материале. Сверлением получают сквозные и несквозные (глухие) отверстия и обрабатывают предварительно полученные отверстия в целях увеличения размеров, повышения точности, снижения шероховатости. Обработанные сверлением отверстия имеют параметр шероховатости $Ra$ = 12,5 мкм.

Процесс резания при сверлении протекает в более сложных условиях, чем при точении. Затруднен отвод стружки и подвод охлаждающей жидкости к режущим кромкам инструмента. При выходе стружки

происходит трение ее о поверхность канавок сверла и сверла о поверхность отверстия. В результате увеличивается тепловыделение.

***Зенкерование*** **–** получистовая обработка отверстий, обеспечивающая более высокую точность и шероховатость *Ra* = 3,2÷6,4 мкм.

Зенкерование применяют при обработке глухих и сквозных отверстий, предварительно обработанных сверлением, либо полученных литьем или ковкой. Увеличенное по сравнению со сверлом число режущих кромок зенкера позволяет получить более точное по размеру и форме отверстие.

Для обработки бобышек и углублений вокруг отверстий применяют специальные зенкеры (рис. 4.2).

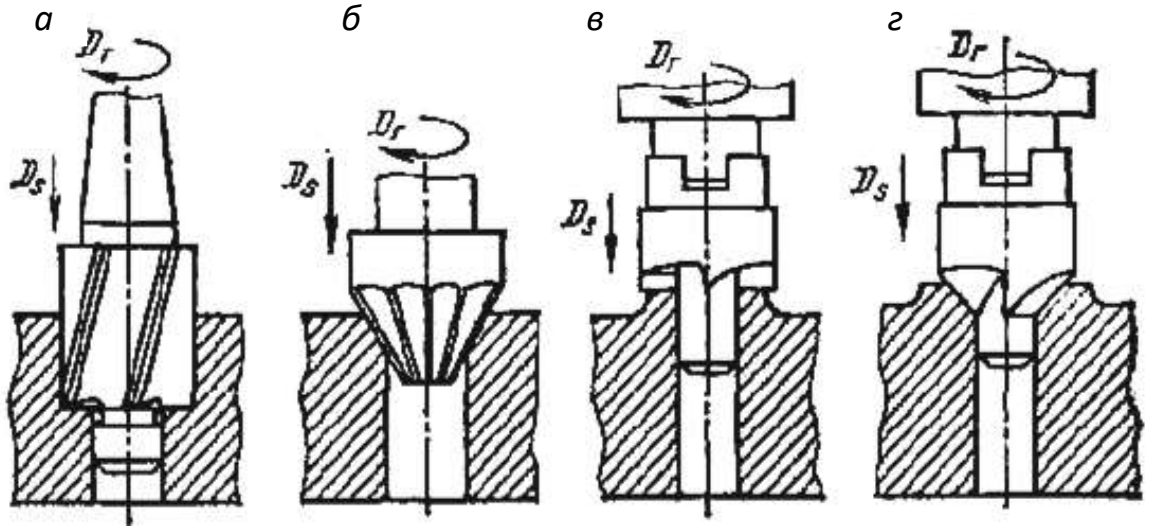



Рис. 4.2. Схемы обработки углублений и бобышек зенкерами:
*а, б, г* – зенкование; *в* – цекование

***Развертывание*** – чистовая обработка, повышающая точность после зенкерования и обеспечивающая шероховатость *Ra* = 0,5÷1,6 мкм.

## 4.2. Конструктивные особенности инструментов основных типов

Наиболее распространенными инструментами для обработки отверстий являются сверла. Они используются для сверления отверстий диаметром от десятых долей до десятков миллиметров (мм) различной глубины. По конструктивным признакам сверла можно разделить на спиральные, перовые, для глубоких отверстий, комбинированные центровочные (рис. 4.3).

Наиболее простыми в изготовлении являются перовые сверла, представляющие собой заостренную пластину с весьма несовершенной формой рабочей части. Эти сверла применяют для обработки от-

верстий малого (0,2 – 1 мм) и большого (более 80 мм) диаметра, а также при ремонте. Нашли применение составные перовые сверла в виде пластины, закрепленной в державке (рис. 4.3, *в*). Обработку отверстий в сталях, чугунах, легких сплавах и дереве при глубине более 10 диаметров без периодического вывода сверла проводят шнековыми сверлами (рис. 4.3, *г*).

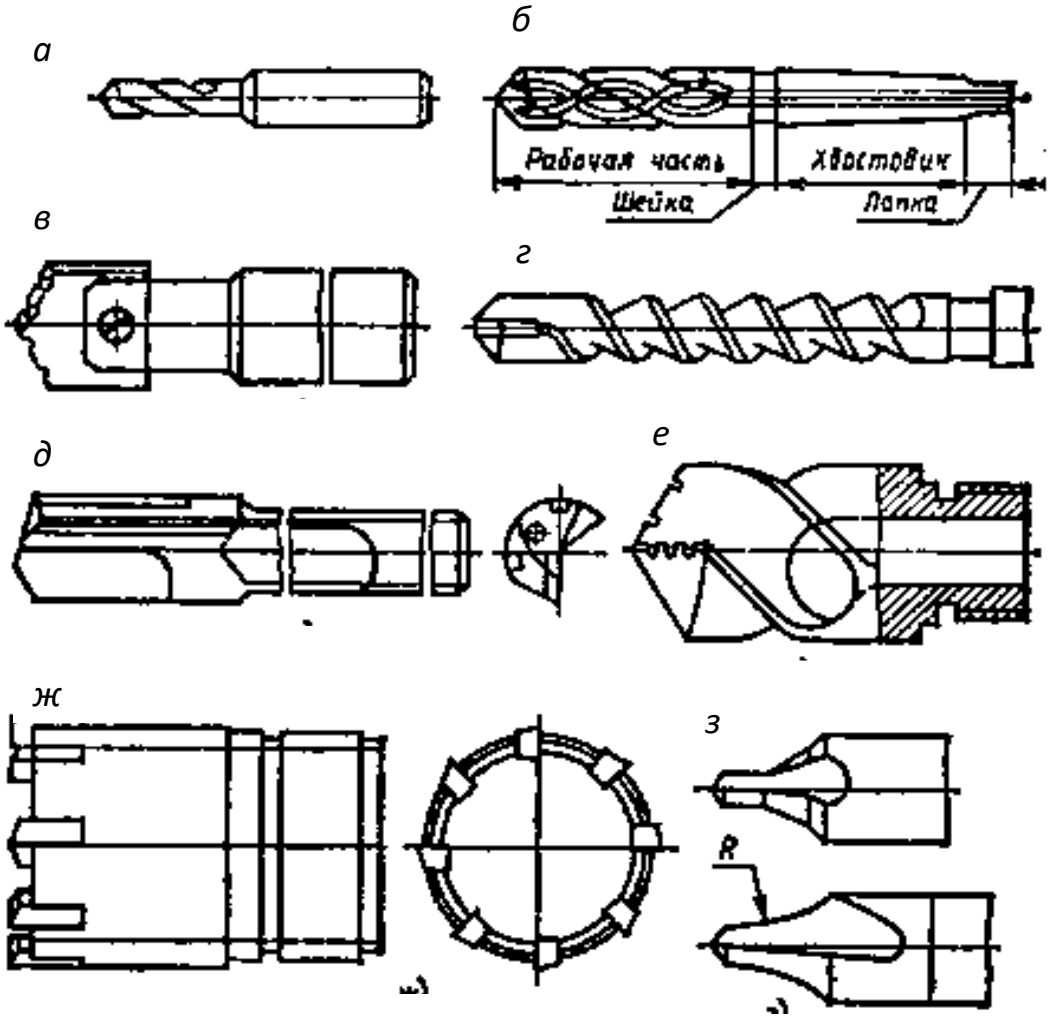



Рис. 4.3. Конструкции сверл:
*а – б* – спиральные; *в* – перовое; *г* – шнековое; *д, е* – сверла для глубокого сверления; *ж* – кольцевое; *з* – центровочное

Глубокие отверстия с осью, имеющей малое отклонение от прямолинейности, получают сверлами однокромочного резания с вершиной, смещенной относительно оси (рис. 4.3, *д*). Это, а также то, что сверло опирается направляющими пластинами на боковую поверхность отверстия, обеспечивает малое отклонение от прямолинейности его оси.

Сквозные отверстия диаметром 80 – 200 мм и более получают сверлами кольцевого сверления (рис. 4.3, *ж*).

Обработку центровых отверстий проводят центровочными комбинированными сверлами (ГОСТ 14952 – 75) двух типов: без предохранительной фаски и с предохранительной фаской 120°. Сверла этих типов изготовляют из быстрорежущей стали.

Наиболее многочисленной является группа спиральных сверл (рис. 4.4). Размерный ряд спиральных сверл начинается с малоразмерных сверл диаметром 0,1 – 1,5 мм по ГОСТ 8034–76 с утолщенным цилиндрическим хвостовиком.

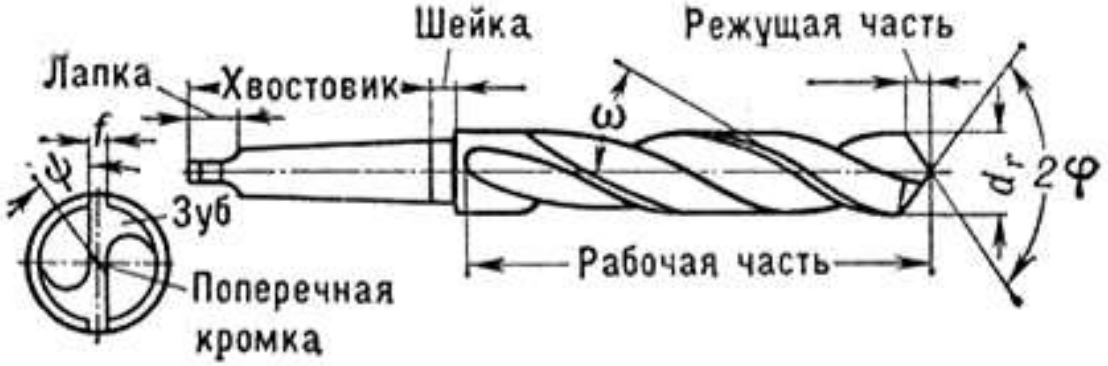



Рис. 4.4. Винтовое сверло по металлу

Спиральные сверла диаметром более 8 мм в целях экономии изготовляют сварными с рабочей частью из быстрорежущей стали и хвостовиком из конструкционной стали. Сверла с пластинами из твердого сплава ВК и сверла с внутренним подводом охлаждающей жидкости (ГОСТ 6647–64) предназначены для сверления труднообрабатываемых материалов.

В отличие от резца передние поверхности сверла винтовые, главные задние поверхности обычно конические, а вспомогательные задние – винтовые ленточки, обеспечивающие направление сверла в процессе резания.

Геометрия сверла характеризуется углами наклона винтовых канавок ω, углом при вершине 2φ; углом наклона поперечной кромки ψ ($\psi = 50 \div 55^{o}$); углы **γ** и α вдоль режущих кромок сверла переменные (рис. 4.5).

У стандартных сверл угол $2\varphi = 116 \div 118^{o}$, $\omega = 20 – 25^{o}$. Для малопрочных обрабатываемых материалов он уменьшается до $90^{o}$, а для высокопрочных увеличивают до $140^{o}$.

Зенкеры, применяемые в машиностроении для обработки отверстий диаметром до 20÷40 мм, изготовляют цельными (рис. 4.6, *а*).

Обработку отверстий больших диаметров ($D$ > 30 мм) проводят насадными зенкерами (рис. 4.6, *б*), установленными на оправку.

Их изготовляют из быстрорежущей стали либо оснащают твердым сплавом (ГОСТ 12509–75). Для экономии инструментального материала, начиная с диаметра 50 мм и выше насадные зенкеры (ГОСТ 255–71) оснащаются вставными ножами из быстрорежущей стали.

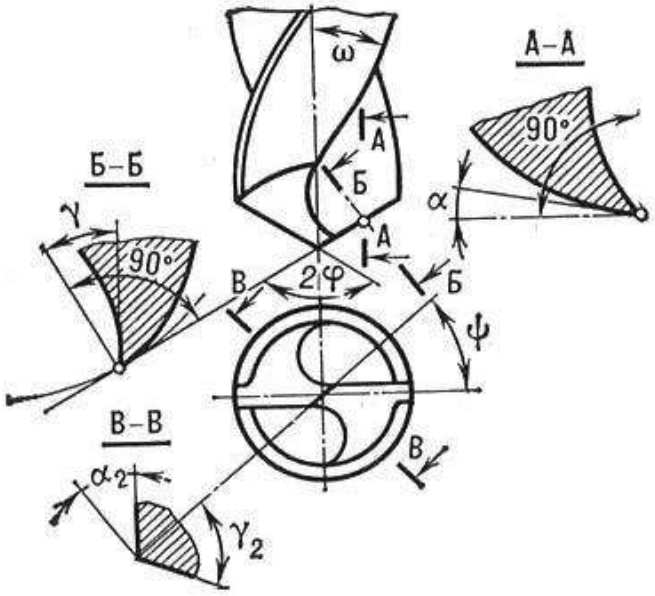



Рис. 4.5. Углы винтового сверла по металлу

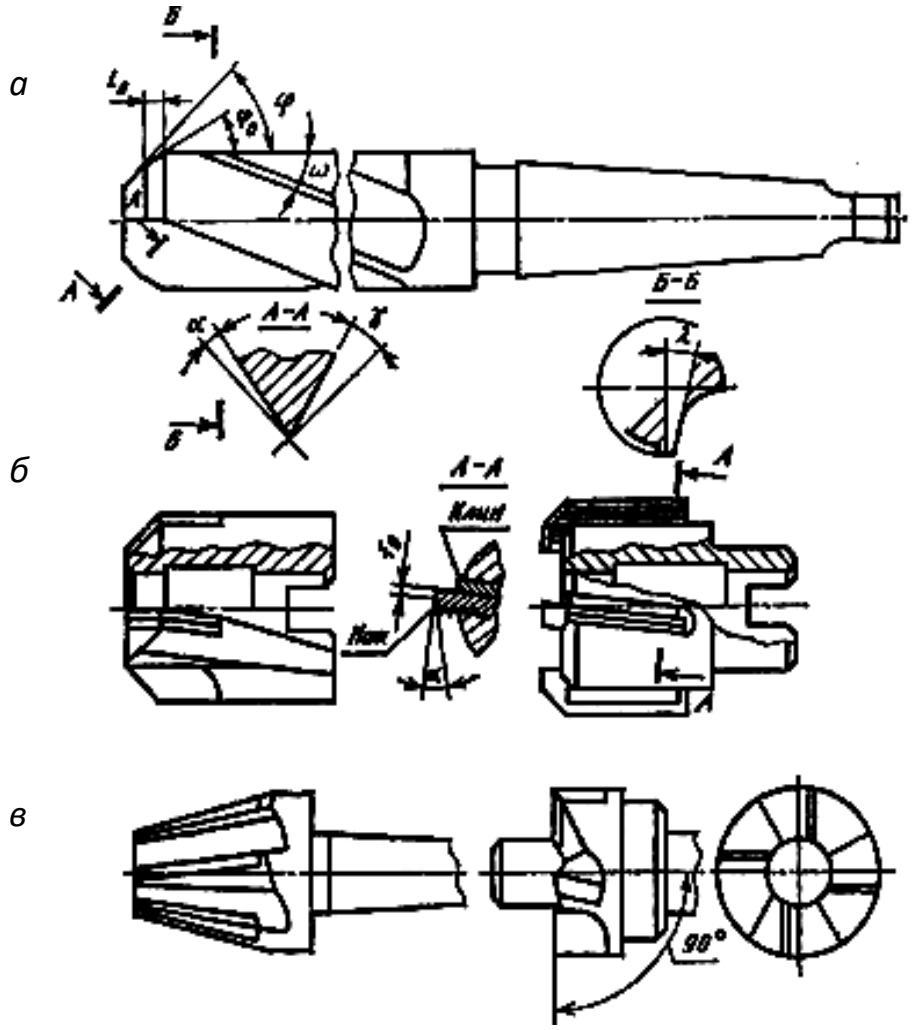



Рис. 4.6. Конструкции зенкеров:
*а* – цельный цилиндрический зенкер с коническим хвостовиком;
*б* – цилиндрические насадные зенкеры; *в* – конический и торцевой зенкеры

Обработку прилегающих к отверстиям поверхностей проводят зенковками коническими, цилиндрическими цековками (рис. 4.6, *в*) из инструментальных сталей либо этими инструментами, оснащенными твердым сплавом. Глубина резания при зенкеровании увеличивается с возрастанием диаметра отверстия, и обычно составляет (0,05÷0,1) $d_з$, где $d_з$ – диаметр обрабатываемого отверстия. Геометрические параметры цилиндрического зенкера показаны на рис.4.6, *а*. Зенкер имеет режущую часть, режущие кромки которой расположены под углом $\varphi_o = 45 – 60^o$.

*Передний угол* **γ,** в зависимости от механических свойств обрабатываемого материала и материала зенкера назначается $0÷15^o$.

*Задний угол* α принимается в пределах $8÷10^o$. *Угол наклона винтовой канавки* $\omega = 10÷30^o$.

В зависимости от формы обрабатываемых отверстий развертки разделяют на цилиндрические (ГОСТ 1523–81Е) и конические

(ГОСТ 11177–84) (рис. 4.7, *а, б*). Они могут быть машинными или ручными. Для ремонтных работ выпускают ручные разжимные развертки (ГОСТ 3509–71) с пределами регулирования диаметра 0,5÷3 мм (рис. 4.7, *г*). Развертки целиком изготовляют из быстрорежущей стали с цилиндрическими (для $D$ <10 мм) либо коническими хвостовиками (для $D$> 10 мм). Как и зенкеры, развертки для диаметров отверстий более 30 мм делают насадными с ножами из быстрорежущих сталей либо твердых сплавов (рис. 4.7, *е*). Вставные ножи имеют рифления, идентичные рифлениям в пазах корпуса. Это позволяет перестановкой ножей и закреплением их клиньями настраивать развертку на нужный диаметр.

### 4.3. Режим резания при сверлении

***За глубину резания*** при сверлении отверстий в сплошном материале принимают половину диаметра сверла:

$$t = D/2,$$

а при рассверливании $t = (D - d)/2$, где $d$ – диаметр обрабатываемого отверстия, мм.

***За глубину резания*** при зенкеровании и развертывании отверстий принимают $t = (D - d)/2$.

***Подача S*** (мм /об) равна осевому перемещению сверла за один оборот. Величину подачи при сверлении подсчитывают по формуле

$$S = CD^{0,6},$$

где $C$ – коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала и иных технологических факторов (чистота поверхности, наличие дальнейшей обработки и т. д); $k_{ls}$ – коэффициент на подачу, зависящий от условия выхода стружки.

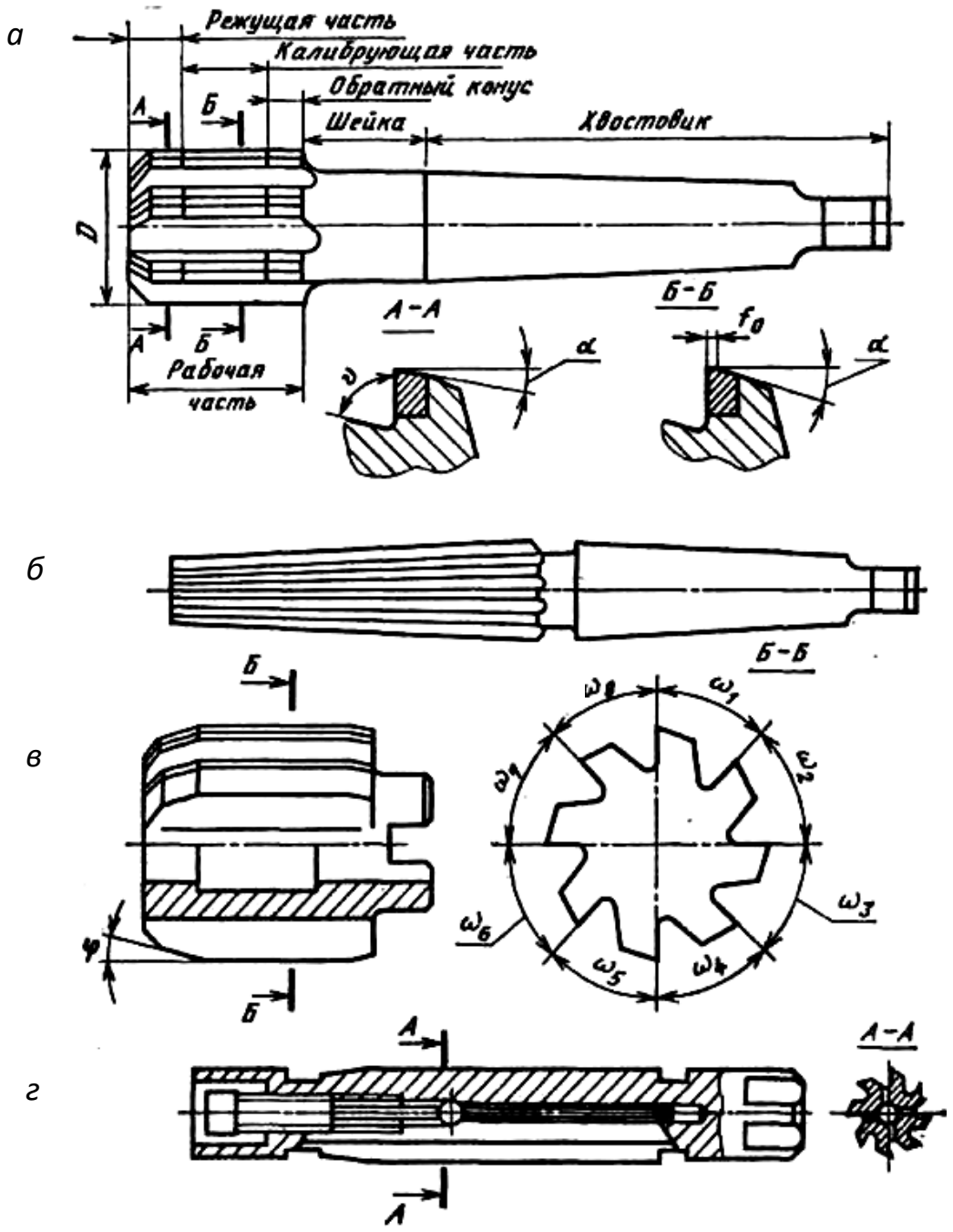



Рис. 4.7. Конструкции разверток:
*а* – цельная цилиндрическая; *б* – коническая; в – насадная; *г* – регулируемая

Величину подачи за один оборот шпинделя при сверлении принимают равной 0,02÷0,03 от диаметра сверла. Подачу при зенкеровании и развертывании принимают в 2÷2,5 раза больше, чем при сверлении.

***За скорость резания*** при сверлении принимают окружную скорость точки режущей кромки, наиболее удаленной от оси сверла:

$$V = \pi D n /1000,$$

где $D$ – диаметр сверла в мм; $n$ – частота вращения инструмента, об/мин.

При сверлении отверстий глубиной свыше трех диаметров условия сверления ухудшаются, и поэтому необходимо снижать скорость резания, вводя поправочный коэффициент 0,9 при $L \leq 5D$ и 0,5 при $L \leq 10D$.

**Стойкость.** Наиболее целесообразные величины стойкости сверл, зенкеров и разверток, применяемых в производственных условиях, различны и зависят от их диаметра. Подробные данные по выбору стойкости этих инструментов содержатся в справочниках технолога-машиностроителя.

***Основное технологическое время*** при сверлении, рассверливании, зенкеровании и развертывании определяют по формуле мин.

$$T_O = L / S \cdot n,$$

где $L$ – расчетная длина хода режущего инструмента, мм; $S$ – подача, мм /об; $n$ – число оборотов в минуту. Расчетная длина хода режущего инструмента (рис. 4.8)

$$L = l + l_1 + l_2,$$

где $l$ – длина обрабатываемого отверстия, мм; $l_1$ – длина перебега инструмента (обычно 1 – 3 мм); $l_2$ – длина врезания инструмента, мм.

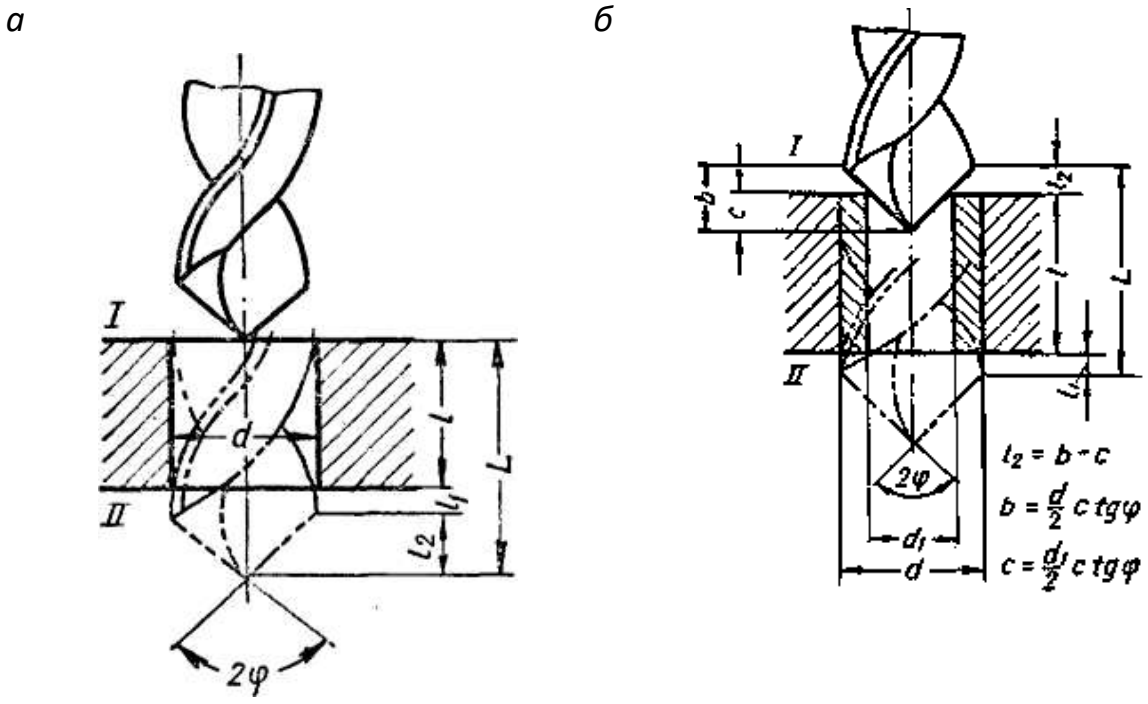



Рис. 4.8. Расчетная длина хода сверла:
*а* – при сверлении; *б* – при рассверливании

## 4.4. Силы резания при сверлении

В процессе резания сверло испытывает сопротивление со стороны обрабатываемого материала. Равнодействующую сил сопротивления, приложенную в некоторой точке $A$ режущей кромки, можно разложить на три составляющие силы $P_x$, $P_y$и $P_z$ (рис. 4.9).

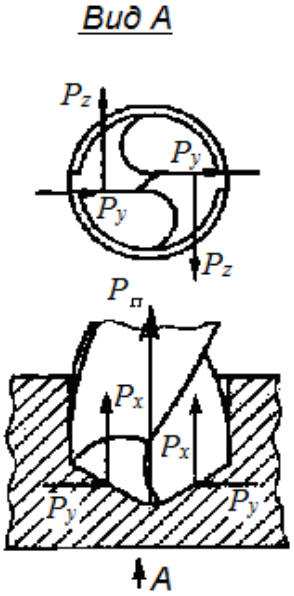



Рис. 4.9. Силы сопротивления резанию при сверлении

Составляющая $P_x$ направлена вдоль оси сверла. В этом же направлении действует сила $P_п$ на поперечную режущую кромку. Суммарная всех указанных сил, действующих на сверло вдоль оси $x$, называется *осевой силой* $P_о$. Радиальные силы $P_y$, действующие на каждую режущую кромку сверла, взаимно уравновешиваются.

В расчетах для определения осевой силы $P_о$ (Н) и крутящего момента $M_к$ (Н·м) используют эмпирические формулы:

$$P_о = C_р D^x S^y K_р,$$

$$M_к = C_м D^x S^y K_м,$$

где $C_р$ и $C_м$ – постоянные коэффициенты, характеризующие обрабатываемый материал и условия; $x_р$, $y_п$, $x_м$, $y_м$ – показатели степеней; $K_р$ и $K_м$ – поправочные коэффициенты на измененные условия резания.

Коэффициенты и показатели степеней приведены в справочниках технолога-машиностроителя.

Осевая сила и крутящий момент являются исходными для расчета сверла и узлов станка на прочность, а также для определения эффективной мощности, кВт

$$N_е = M_{кр} \cdot n / (9750),$$

где $M_{кр}$ – крутящий момент, Н·м; $n$ – число оборотов режущего инструмента в минуту.

## 4.5. Станки для обработки отверстий

Для обработки отверстий осевым инструментом **используются станки сверлильной и расточной группы.**

*В состав этой группы входят:*

а) вертикально-сверлильные станки;

б) радиально сверлильные;

в) горизонтально-расточные;

г) горизонтально-сверлильные станки предназначены для глубокого сверления таких деталей, как стволы винтовок, пушек и т. п.;

д) многошпиндельные сверлильные станки имеют несколько шпинделей, расположенных в ряд или по кругу;

н) центровочные станки предназначаются для центрования заготовок.

Вертикально-сверлильные станки (рис. 4.10) предназначены для сверления сквозных и глухих отверстий, рассверливания, зенкерования, развертывания, цекования, зенкования и нарезания резьбы.

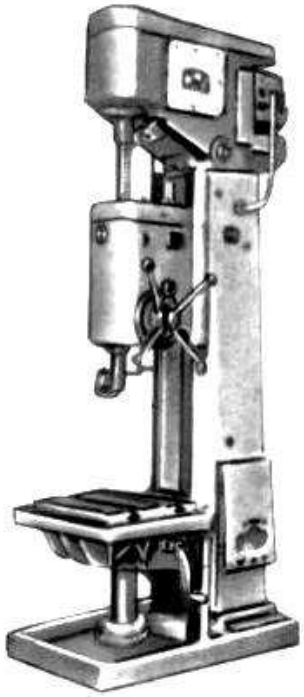


Рис. 4.10. Общий вид вертикально-сверлильного станка

Радиально-сверлильные станки предназначены для выполнения тех же операций, что и вертикально-сверлильные станки, но для изготовления деталей большего размеров. Общий вид радиально-сверлильного станка представлен на рис. 4.11. На станине смонтиро-

вана круглая вертикальная колонна и стол. Траверса перемещается по колонне на нужную высоту. По траверсе перемещается шпиндельная бабка. В результате такого перемещения шпинделя и поворота траверсы вокруг колонны обеспечивается совмещение центров инструмента и обрабатываемого отверстия.

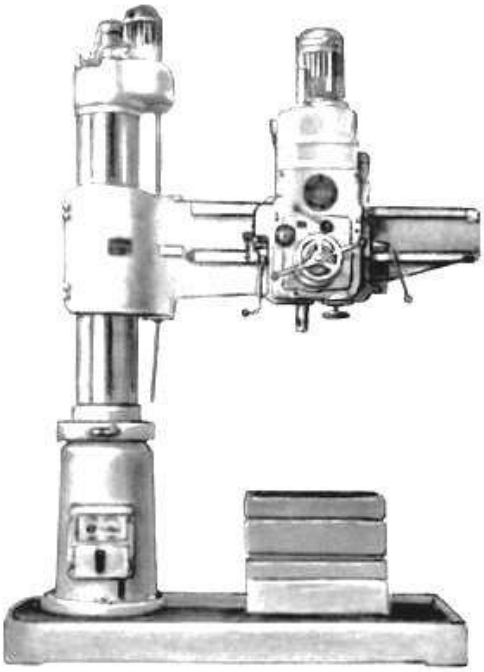


Рис. 4.11. Общий вид радиально-сверлильного станка

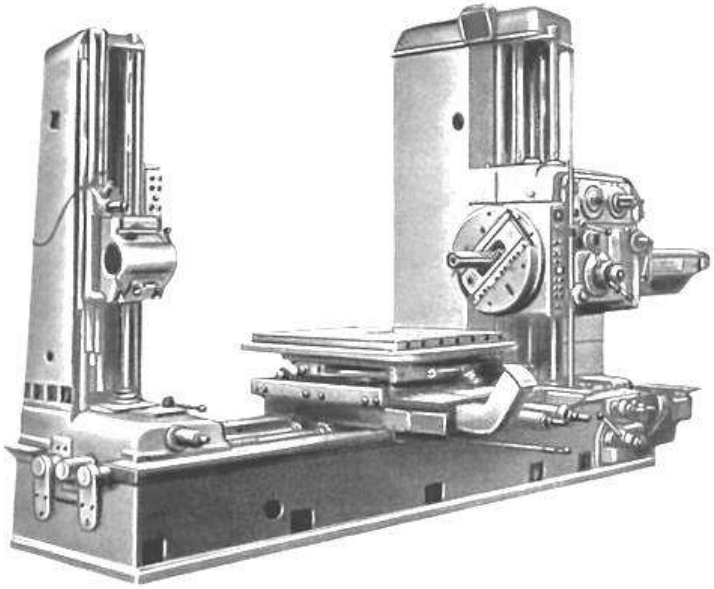


Рис. 4.12. Общий вид горизонтально-расточного станка

Горизонтально расточные станки (рис. 4.12) предназначены для черновой и чистовой обработки отверстий (сверление, зенкерования, развертывание, растачивание и др.), обтачивания цилиндрических наружных поверхностей, подрезки торцов, выточки канавок, нарезания резьб и др. На этих станках в основном обрабатывают крупные детали (корпусные). Возможные схемы обработки приведены на рис. 4.13.

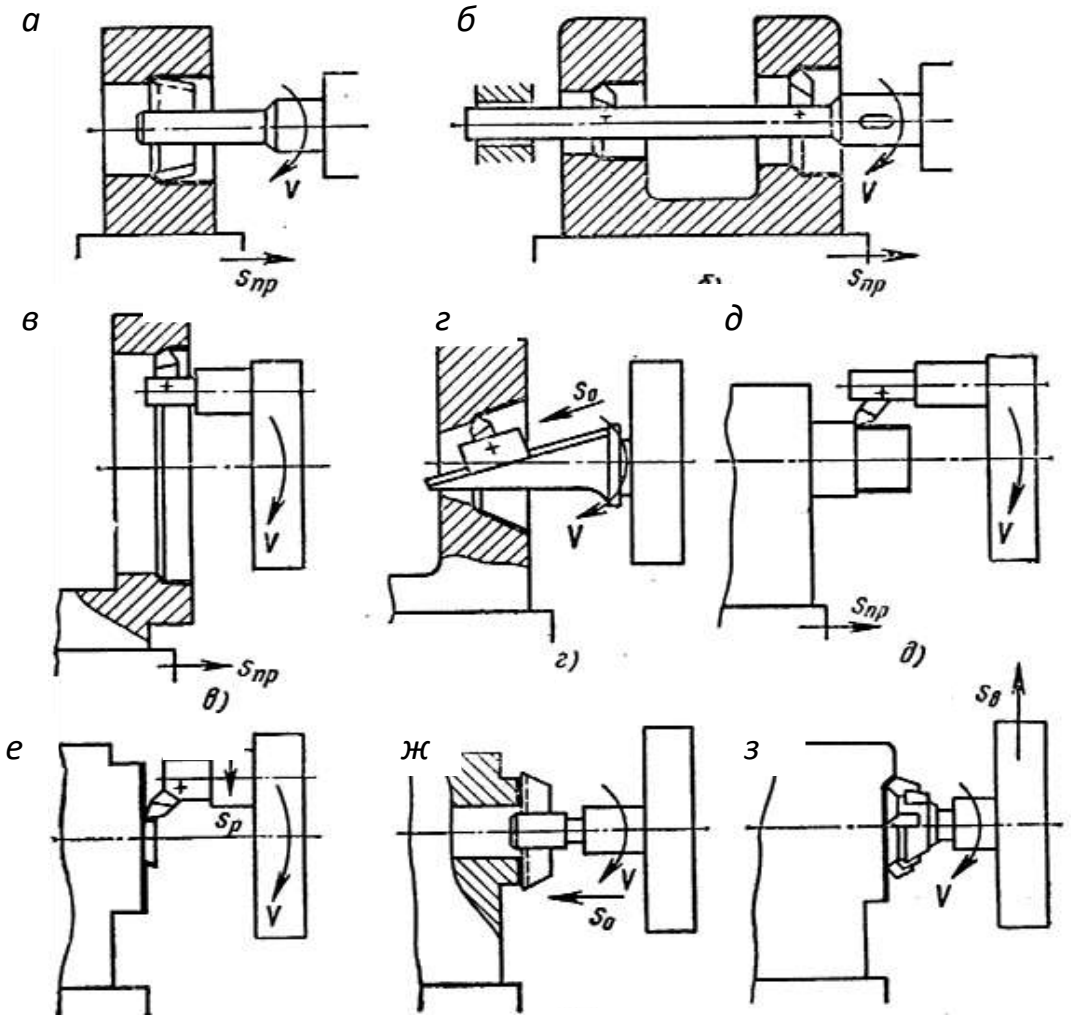



Рис. 4.13. Схемы обработки поверхностей
на горизонтально-расточных станках

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как условия работы влияют на конструкцию инструментов для обработки отверстий?
2. Назовите основные геометрические параметры режущей части сверл.
3. Чем различаются комбинированные инструменты основных типов?
4. По каким поверхностям затачивают сверла и развертки?
5. Как влияет масса обрабатываемой заготовки на конструкцию сверлильного станка?
6. Какая оснастка позволяет повысить точность и производительность обработки на сверлильных станках?
7. Назовите достигаемую точность и параметры шероховатости при обработке на горизонтально-расточных станках.
8. Чем принципиально отличаются координатно-расточные станки от горизонтально-расточных станков?

# 5. ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК НА СТАНКАХ ФРЕЗЕРНОЙ ГРУППЫ

***Фрезерование*** – широко распространенный технологический процесс обработки плоских и фасонных поверхностей многозубыми инструментами – фрезами.

При фрезеровании (рис. 5.1, *а*) фрезе сообщается вращение (главное движение *V*), а обрабатываемая деталь получает поступательное движение (движение подачи *S*).

*Различают два метода фрезерования:*

- *встречное фрезерование* (рис. 5.1, *б*), когда направления вращения фрезы и подачи детали в точке их контакта противоположны;
- *попутное фрезерование* (рис. 5.1, *а*), когда направления вращения фрезы и подачи совпадают.

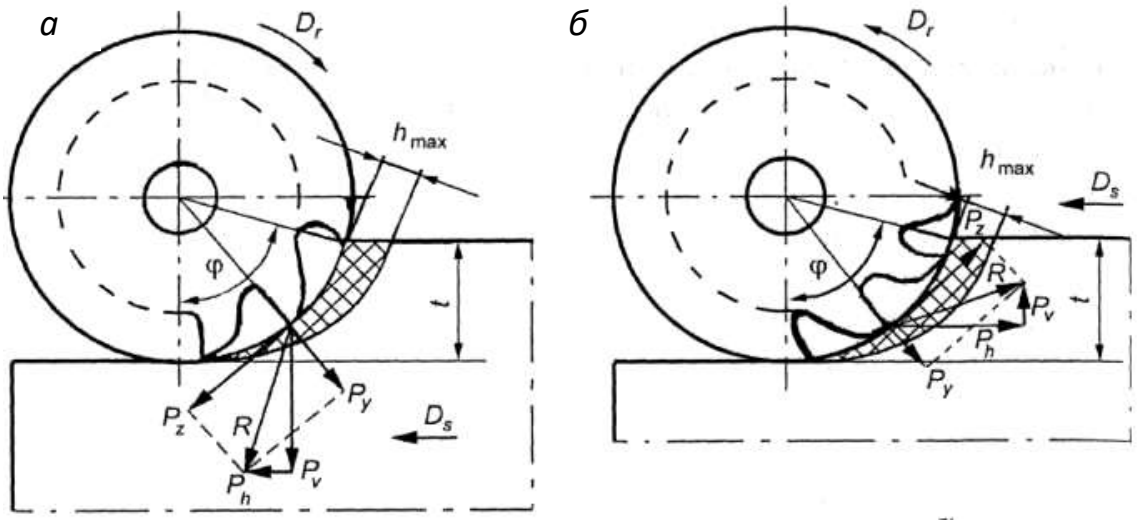



Рис. 5.1 Схемы фрезерования (цилиндрическое фрезерование):
*а* – попутное фрезерование; *б* – встречное фрезерование

Сравнивая встречное и попутное фрезерование, можно отметить следующее. При встречном фрезеровании происходит постепенное возрастание нагрузки на зуб по мере врезания фрезы в обрабатываемый материал, что обеспечивает более плавную работу, чем при попутном фрезеровании, когда зуб фрезы должен снимать сразу толстую стружку ($h_{max}$).

При встречном фрезеровании, если обрабатывается поверхность детали с коркой (литье) или окалиной (поковка), наблюдается меньший износ зубьев, так как при этом зуб врезается в металл под корку.

При попутном фрезеровании зуб встречает корку и сильнее изнашивается. При попутном фрезеровании обеспечивается более чистая обработанная поверхность, чем при встречном.

Условия резания при фрезеровании существенно отличаются от условий работы другими инструментами, например, при точении и сверлении. В процессе точения и сверления режущие кромки инструмента находятся все время в контакте с обрабатываемой деталью и стружкой, т. е. режут непрерывно до окончания обработки поверхности, при фрезеровании же каждый зуб фрезы участвует в резании периодически, выполняя работу резания лишь в течение незначительной части своего оборота, определяемой углом контакта фрезы с обрабатываемой деталью. За остальную часть оборота зуб фрезы не режет и успевает несколько охладиться. Кроме того, поскольку фреза является многолезвийным инструментом, вся работа резания выполняется большим количеством зубьев (8 – 12 и больше).

## 5.1. Фреза и ее элементы

Фреза состоит из корпуса (тела) и режущих зубьев. Зубья можно изготовлять за одно целое с корпусом (цельные фрезы) или делать вставными и закреплять в корпусе (фрезы со вставными зубьями).

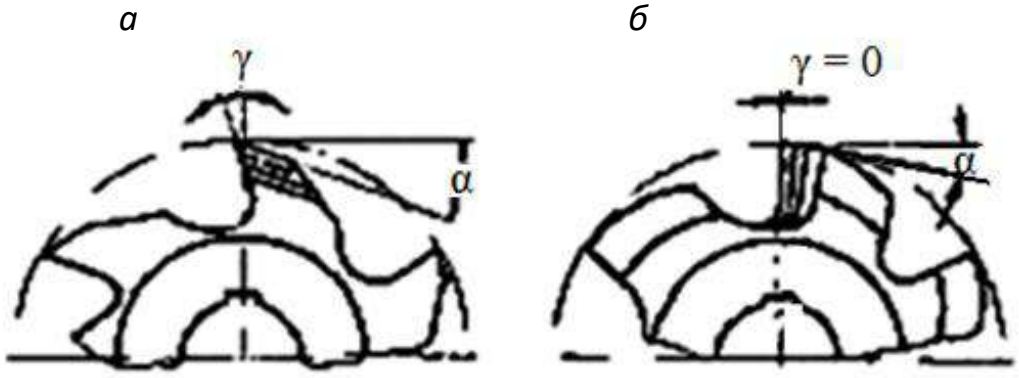



Рис. 5.2. Форма зубьев фрез:
*а* – остроконечная; *б* – затылованная

В зависимости от конструкции зуба, фрезы бывают с остроконечными (рис. 5.*2, а*) и с затылованными (рис. 5.2, *б*) зубьями.

Фасонные, модульные и резьбовые фрезы изготовляют с затылованными зубьями, остальные – с остроконечными зубьями.

Заднюю поверхность затылованного зуба фрезы обрабатывают по архимедовой спирали (на токарно-затыловочных станках). Особен-

ность фрез с затылованным зубом состоит в том, что их перетачивают только по передней поверхности; наличие зуба с затылком, очерченным по архимедовой спирали, обеспечивает сохранение неизменного фасонного профиля зубьев при переточке и постоянство заднего угла. Передний угол зубьев затылованной фрезы обычно берут, равным нулю.

В отличие от затылованных фрез, переточку фрез с остроконечным зубом производят по задней поверхности.

*Фрезы с остроконечным зубом,* по сравнению с фрезами с затылованным зубом, *имеют следующие преимущества:*

- простоту изготовления и переточки;
- лучшие условия резания вследствие наличия положительного переднего угла;
- увеличение прочности зуба по мере переточки, в то время как прочность затылованного зуба по мере переточки уменьшается.

*К недостаткам фрез с остроконечным зубом относятся:*

- невозможность использования для обработки фасонных поверхностей вследствие изменения профиля зубьев при переточке;
- уменьшение пространства между зубьями для размещения стружки по мере переточки.

Фрезы с остроконечным зубом применяют для обработки плоскостей, а с затылованным зубом – для обработки фасонных поверхностей.

## 5.2. Основные типы фрез

***Фрезы для обработки плоскостей.*** Для обработки плоскостей применяют фрезы цилиндрические цельные (рис. 5.3) и торцевые цельные со вставными ножами, оснащенными пластинками быстрорежущей стали или твердого сплава (рис. 5.4).

Цилиндрические фрезы применяют обычно на горизонтально-фрезерных станках, торцевые – на вертикально-фрезерных, продольно-фрезерных и агрегатных станках.

***Фрезы для обработки канавок и пазов.*** Для обработки канавок и пазов различной формы применяют дисковые фрезы с прямыми или

разнонаправленными зубьями, а также пальцевые или концевые фрезы формы, соответствующей профилю паза (рис. 5.5).

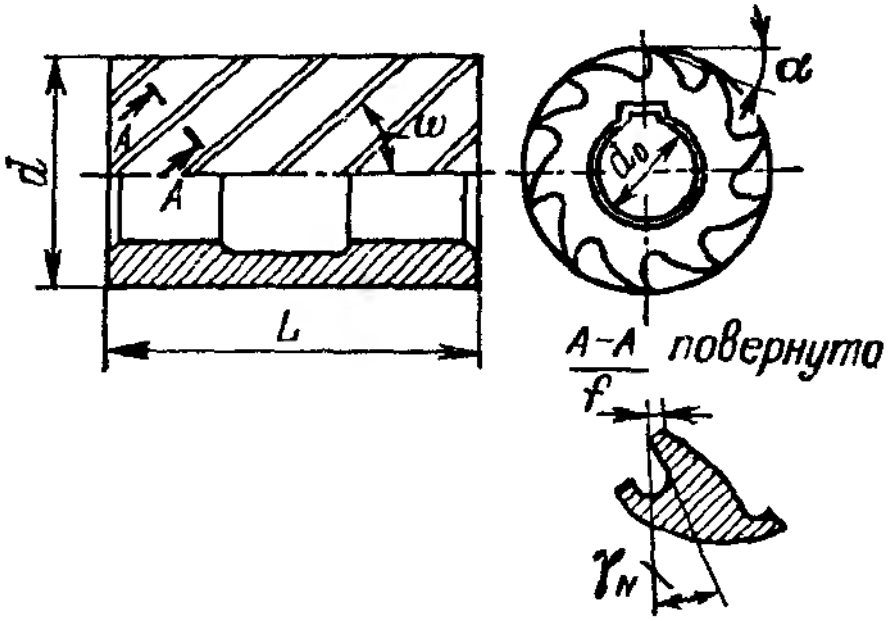



Рис. 5.3. Цилиндрическая фреза

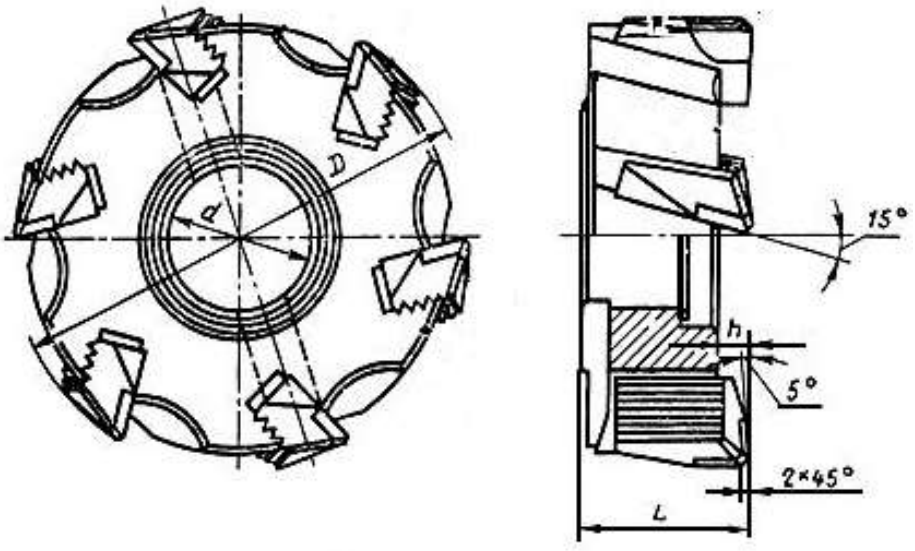



Рис. 5.4. Фреза торцевая со вставными ножами

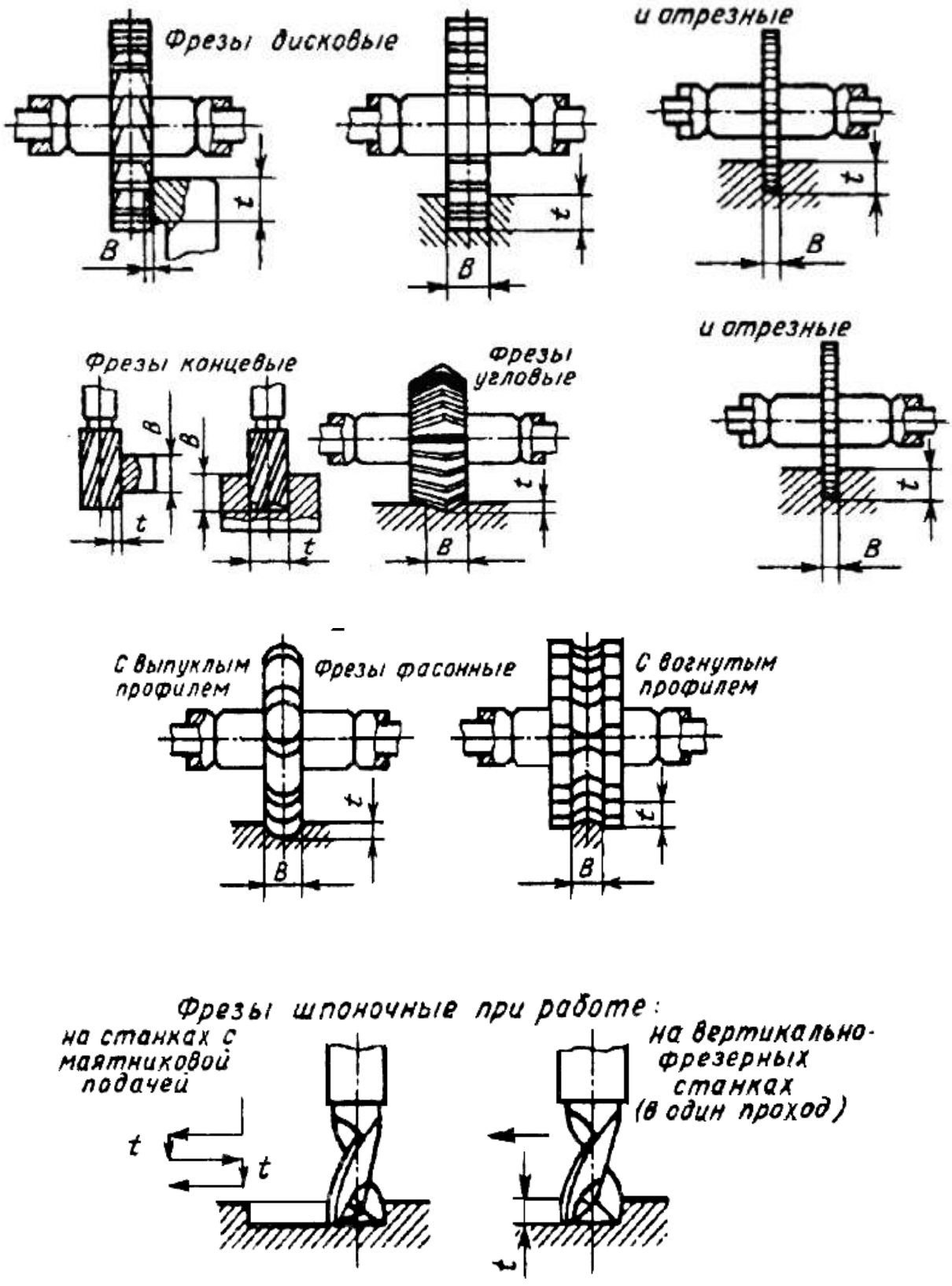



Рис. 5.5. Основные типы фрез

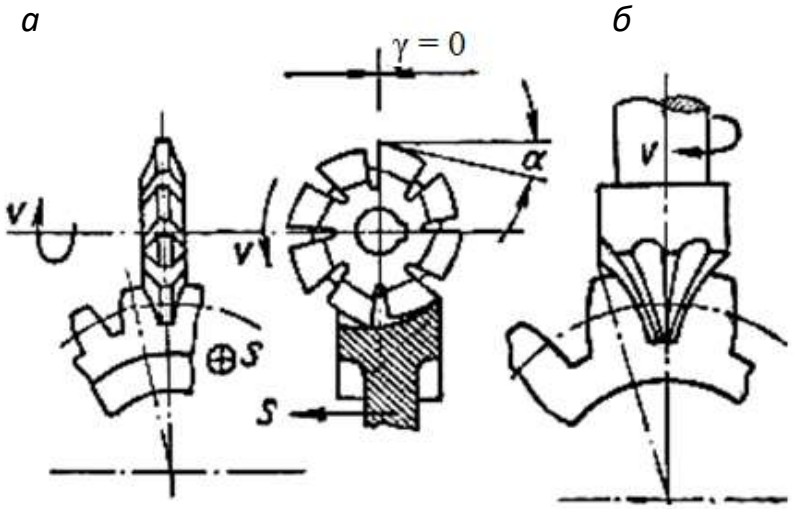



Рис. 5.6. Модульные фрезы для фрезерования зубьев зубчатых колес по методу копирования:
*а* – дисковая; *б* – пальцевая

***Фрезы для обработки зубьев зубчатых колес.*** Для фрезерования зубьев колес по методу копирования на универсально-фрезерных станках применяют модульные дисковые фрезы (рис. 5.7, *а*) и пальцевые фрезы (рис. 5.7, *б*). При работе на зубофрезерных станках применяют червячные фрезы.

***Фрезы для фрезерования резьбы*** могут быть дисковыми и гребенчатыми. Дисковые фрезы (см. рис. 5.7, *а*) применяют для нарезания трапецеидальной и треугольной резьб. Для фрезерования коротких треугольных резьб употребляют гребенчатые резьбовые фрезы (см. рис. 5.7, *б*).

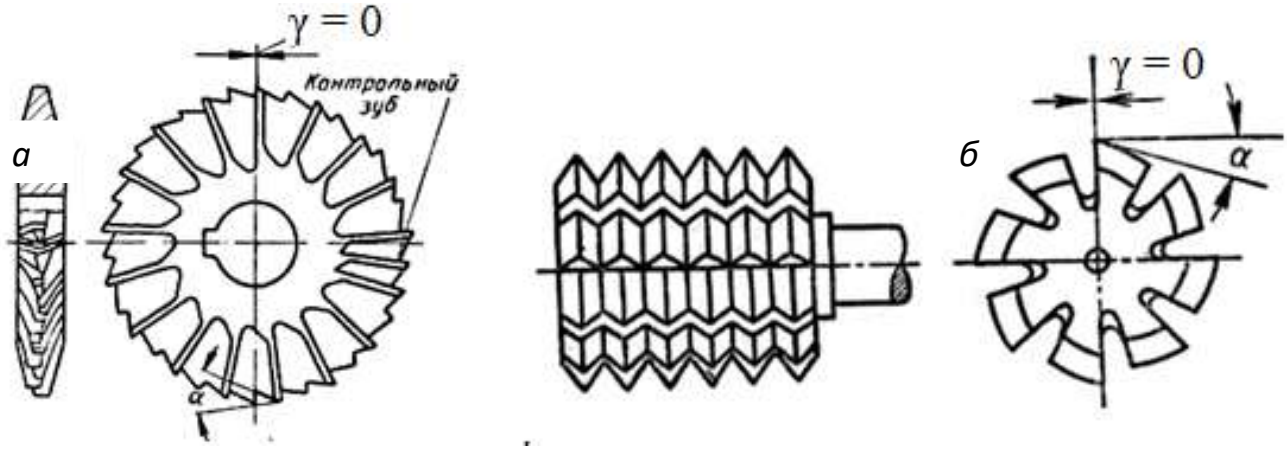



Рис. 5.7. Резьбовые фрезы:
*а* – дисковая; *б* – гребенчатая

### 5.3. Режим резания при фрезеровании

*Скоростью резания V* при фрезеровании называется окружная скорость режущей кромки зубьев фрезы на ее наружном диаметре.

*Глубиной резанията* называется толщина слоя обрабатываемого материала, снимаемого фрезой за один проход (рис. 5.8, *а, б*).

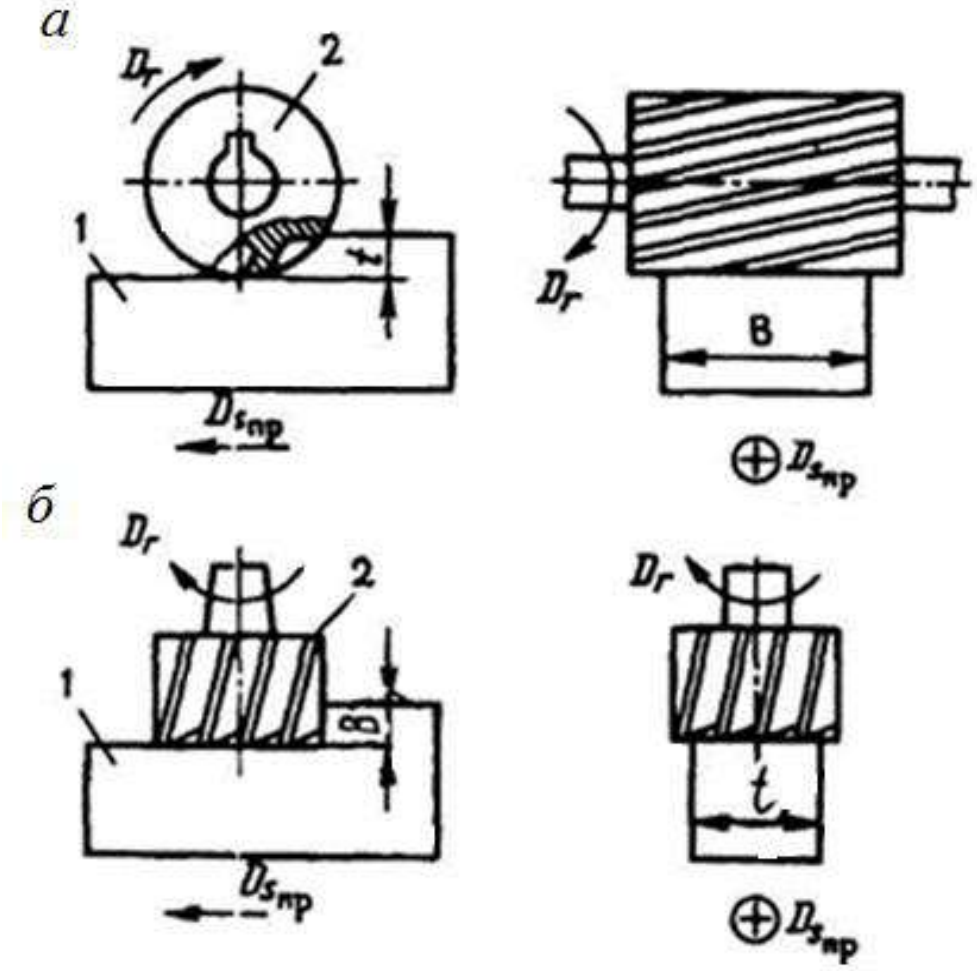



Рис. 5.8. Схемы фрезерования:
*а* – цилиндрической фрезой; *б* – торцевой фрезой

При симметричном торцевом фрезеровании (рис. 5.8, *б*) глубина резания равна ширине фрезеруемой заготовки, а ширина фрезерования равна толщине срезаемого слоя.

*Шириной фрезерования B* называется длина поверхности контакта фрезы с обрабатываемой деталью, измеренная в направлении, перпендикулярном к направлению подачи.

*Подачей S* называется величина перемещения обрабатываемой детали относительно оси фрезы. При фрезеровании различают: подачу на один зуб фрезы $S_z$, подачу на один оборот фрезы $S_o$, подачу в

минуту $S_м$. При этом $S_м = S_o \cdot n = S_z \cdot n$, мм/мин, где $z$ – число зубьев фрезы; $n = 1000 \cdot V/(\pi \cdot D)$ – число оборотов фрезы в минуту.

Величину подачи на один зуб фрезы при фрезеровании стали цилиндрическими фрезами принимают в пределах 0,03÷0,08 мм.

При фрезеровании стали торцевыми фрезами подачи на зуб принимают в пределах 0,04÷0,15 мм.

При обработке чугуна и бронзы значения подачи увеличивают в 1,5 – 2 раза по сравнению с приведенными выше данными для стали.

При фрезеровании деталей тонкостенных, а также имеющих малые опорные поверхности, не обеспечивающие надежного закрепления, подачу следует снижать с целью уменьшения усилий резания.

*Основное технологическое время* $T_o$ при фрезеровании определяется по формуле, мин.

$$T_o = \frac{L \cdot i}{S_м},$$

где $L = l + l_1 + l_2$ – длина фрезеруемой поверхности, мм; $l_1$ – путь врезания фрезы, мм; $l_2$ – величина перебега фрезы, мм (рис. 5.9).

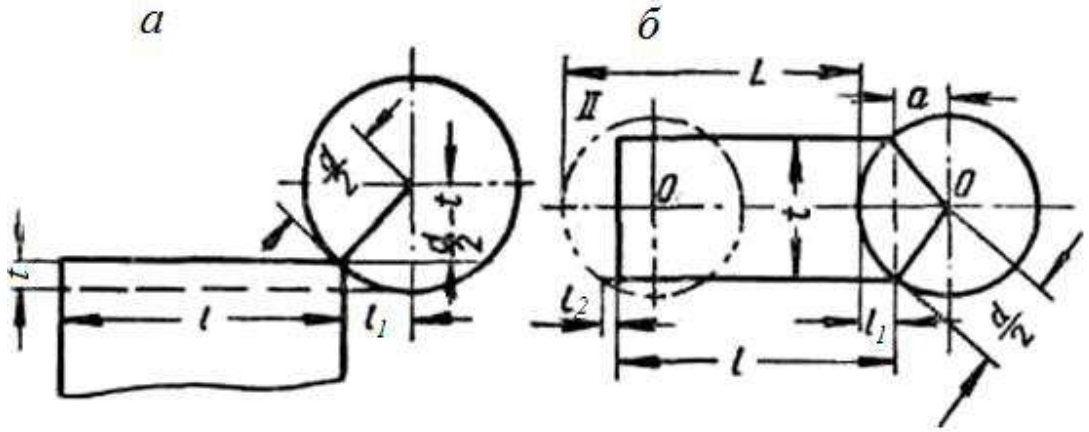



Рис. 5.9. Величины врезания при фрезеровании:
*а* – цилиндрической фрезой; *б* – торцевой фрезой

При фрезеровании цилиндрическими фасонными фрезами, а также концевыми и дисковыми фрезами (рис. 5.9, *а*) величины врезания и перебега определяются, мм

$$l_1 = \sqrt{t(D - t)} + (0{,}5 \div 3); \quad l_2 = (1 \div 5).$$

При симметричном фрезеровании торцевыми и концевыми фрезами (см. рис. 5.9, *б*), мм:

$$l_1 = 0{,}5\,(D_ф - \sqrt{t\left(D_ф - B\right)} + (0{,}5 \div 3{,}5); \; l_2 = (1 \div 6).$$

Величины врезания и перебега, а также рекомендуемые скорости резания и подачи приведены в справочной литературе.

## 5.4. Силы резания при фрезеровании

Для осуществления процесса фрезерования необходима мощность $N_v$,

$$N_v = \frac{Mn}{975},$$

где $M$ – крутящий момент на шпинделе станка от сил сопротивлению резания; $n$ – частота вращения фрезы.

В процессе фрезерования на фрезу действуют сила сопротивления резанию, которую можно разложить на три составляющие: радиальную $P_y$, окружную $P_z$ и осевую $P_x$ (рис. 5.10).

Крутящий момент относительно оси фрезы составляет только сила $P_z$, следовательно

$$M = \frac{P_z D_\Phi}{2},$$

где $D$ – диаметр фрезы.

Векторная сумма $P_y$ и $P_z$ составляющих лежит в торцевой плоскости фрезы и может быть разложена на вертикальную $P_v$ и горизонтальную $P_s$ составляющие. $P_v$ стремится оторвать заготовку (прижать) от стола, а сила $P_s$ определяет мощность, необходимую на перемещение стола.

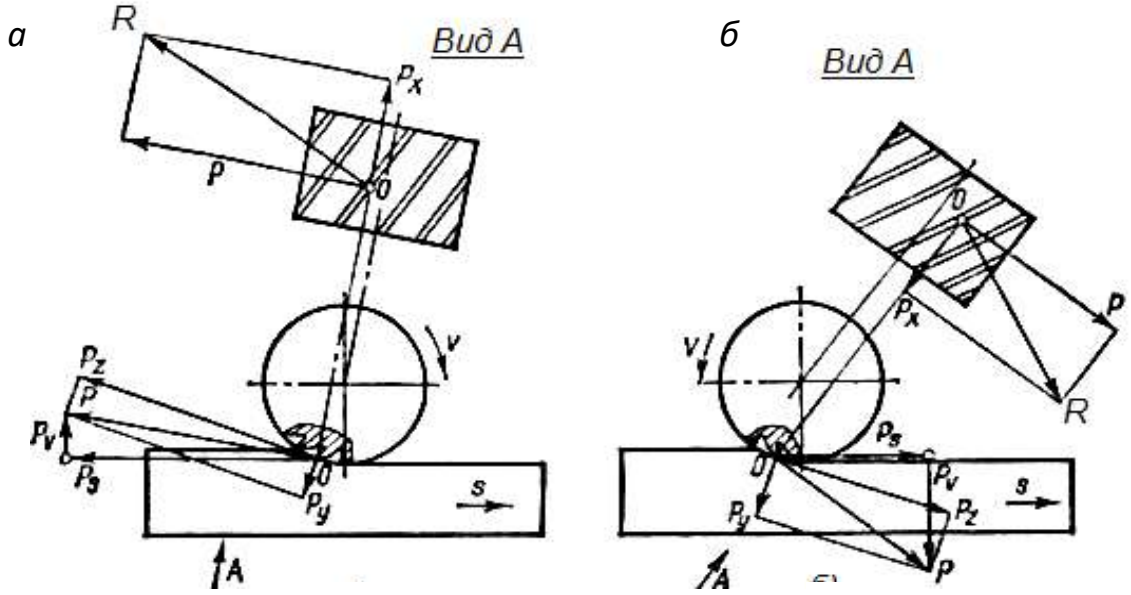



Рис. 5.10. Силы резания:
*а* – при встречном фрезеровании; *б* – попутном фрезеровании

Сила $P_s$ совпадает с направлением подачи $S$ и называется ***усилием подачи***. Сила $P_v$ называется ***вертикальной силой.***

Для определения составляющей силы резания$R$ используют окружную силу $P_z$, а другие составляющие определяют в ее долях. Силу $P_z$ находят по эмпирической формуле

$$P_z = \frac{9{,}85 C_p t^x s^y B^u z^r}{D^q n^w} k_\rho,$$

где $t$ – глубина резания, мм; $s$ – подача на зуб, мм/зуб; $B$ – ширина фрезерования, мм; $z$ – число зубьев фрезы; $D$ – диаметр фрезы, мм; $n$ – частота вращения фрезы, об/мин; $x$, $y$, $u$, $r$, $q$. $w$ – показатели степени, приведенные в справочниках; $C_p$ – постоянная, учитывающая условия эксперимента, не вошедшие в формулу в явном виде (находится в справочниках); $k_p$ – коэффициент, учитывающий отличие конкретных условий работы от экспериментальных при выводе данной формулы

$$P_y = (0{,}3 – 0{,}4)\ P_z;\ P_S = (1 – 1{,}2)\ P_z;\ P_v = (0 – 0{,}2)\ P_z.$$

Чтобы нейтрализовать действие осевого усилия при работе фрезой с винтовыми зубьями, применяют сдвоенные фрезы с правым и левым наклоном зубьев.

## 5.5. Фрезерные станки

На станках фрезерной группы выполняются различные операции по обработке плоскостей, пазов и фасонных поверхностей с линейной образующей.

***Горизонтально-фрезерные*** станки предназначаются для выполнения разнообразных фрезерных работ. Шпиндель этих станков расположен горизонтально и сообщает вращение фрезе. Обрабатываемая деталь, закрепленная на столе, совершает подачу в продольном направлении.

***Универсально-фрезерные*** станки отличаются от горизонтальных тем, что у них стол может поворачиваться вокруг вертикальной оси (в ограниченных пределах).

***Вертикально-фрезерные*** станки имеют шпиндель, расположенный вертикально; в некоторых моделях этих станков шпиндель может устанавливаться наклонно путем поворота вокруг горизонтальной оси. Общий вид станка представлен на рис. 5.11. На фундаментной плите *1* установлена станина *2*. Вертикальный шпиндель *3* получает вращение от электродвигателя *4* через коробку скоростей *5*.

Станок имеет кронштейн *6*, нижний (поперечный) стол *7*, верхний (продольный) стол *8*. Электродвигатель *9* и коробка подач раз-

мещены в кронштейне станка. Рукоятки $P_7$ и $P_8$ переключают зубчатые колеса в коробке скоростей, маховичок $P_3$ служит для настройки коробки подач. Движениями стола управляют при помощи рукояток от $P_5$ до $P_9$.

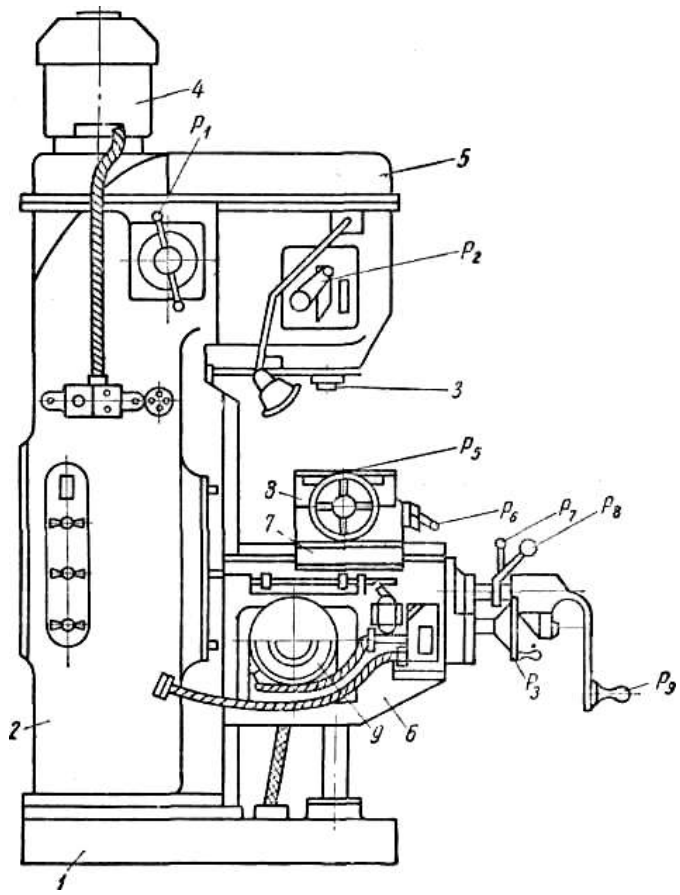



Рис. 5.11. Общий вид вертикально-фрезерного станка:
*1* – фундаментная плита; *2* – станина; *3* – шпиндель; *4* – электродвигатель; 5 – коробка скоростей; *6* – кронштейн; *7* – нижний (поперечный) стол; *8* – верхний (продольный) стол; *9* – электродвигатель и коробка подач

***Продольно-фрезерные*** станки бывают одно- двух-, трех- и четырехшпиндельные; в последних двух случаях один или два шпинделя вертикальные, два других – горизонтальные

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Особенности процесса резания при фрезеровании.
2. Что относится к элементам режима резания при фрезеровании?
3. Для чего необходимо знание составляющих силы резания при фрезеровании?
4. Встречное и попутное фрезерование, достоинства и недостатки этих методов.
5. Типы фрез (не менее пяти) и область их применения.
6. Конструктивные особенности режущих элементов фрез.
7. Назовите типы фрезерных станков общего назначения.

8. В чем различие методов простого деления, комбинированного и дифференциального деления на различных делительных операциях при фрезеровании.

9. Какие приспособления используют для закрепления заготовки и инструмента на фрезерных станках? Расскажите, по каким поверхностям затачивают фрезы.

# 6. ОБРАБОТКА СТРОГАНИЕМ, ДОЛБЛЕНИЕМ И ПРОТЯГИВАНИЕМ

Строганием и долблением производят обработку, главным образом, плоских поверхностей, а также различных пазов и канавок в основном в индивидуальном и мелкосерийном производстве.

Движение резания поступательно-возвратное состоит из рабочего и холостого хода, движение подачи прерывистое, совершается в конце холостого хода.

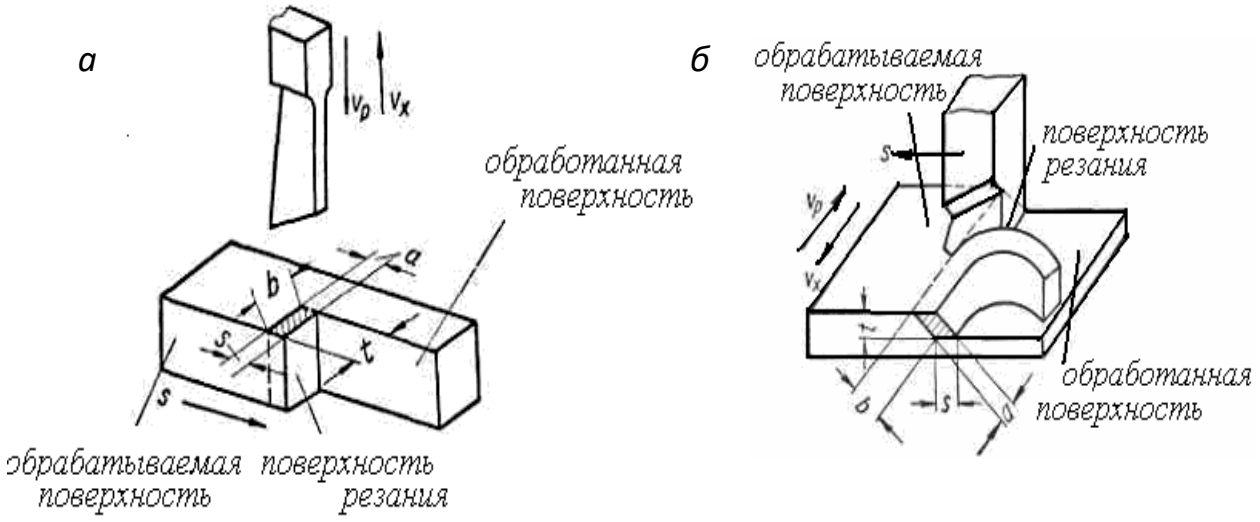



Рис. 6.1. Схемы процесса резания:
*а* – схема процесса долбления; *б* – схема процесса строгания на продольно-строгальном станке

Строгание производят на продольно-строгальных и поперечно-строгальных станках.

При работе на продольно-строгальных станках поступательно-возвратное движение совершает обрабатываемая деталь, а резец получает периодическую подачу в поперечном направлении (рис. 6.1, *б*).

При работе на поперечно-строгальных станках поступательно-возвратное движение совершает резец, а обрабатываемая деталь получает движение периодической поперечной подачи.

При долблении (рис. 6.1, *а*) резец получает поступательно-возвратное движение в вертикальном направлении, а обрабатываемая деталь – периодическую подачу в одном из трех направлений: продольном, поперечном или круговом.

***Особенности процесса резания при строгании и долблении***

Работа строгального и долбежного резцов имеет характер прерывистого резания. Врезание в заготовку в начале каждого рабочего хода сопровождается ударами. Во время холостого хода резец остывает. Нестабильный тепловой режим, при котором инструмент претерпевает циклический нагрев и охлаждение, существенно ухудшает условия его работы, приводит к усталостным явлениям, снижает его стойкость по сравнению с токарными резцами. Циклические ударные нагрузки накладывают определенные ограничения на выбор скорости резания. Наличие возвратно-поступательного движения, а также большие перемещающиеся массы и большие инерционные усилия при реверсировании движения ограничивают возможности применения больших скоростей резания.

## 6.1. Строгальные и долбежные резцы. Элементы резания при строгании и долблении

Элементы строгальных и долбежных резцов представлены на рис. 6.2, *а* и *б*. Геометрия строгальных и долбежных резцов аналогична геометрии токарных.

Строгальные резцы для обработки поверхностей твердых отливок, как правило, делают с изогнутым стержнем, чтобы при встрече с твердыми шлаковыми включениями в корке детали резец отгибался и, описывая дугу окружности вокруг точки *а* (рис. 6.2, *в* и *г*), мог бы приподняться над обработанной поверхностью. Вследствие этого предотвращается порча обработанной поверхности и в то же время режущая кромка предохраняется от повреждения. В случае прямого резца (рис. 6.2, *в*) возможно повреждение обработанной поверхности.

***Элементы резания*** (рис. 6.3). В процессе строгания и долбления поступательно-возвратное перемещение детали или резца является главным движением, а прерывистые (периодические) перемещения резца или детали в направлении, перпендикулярном к направлению движения, представляют собой подачу.

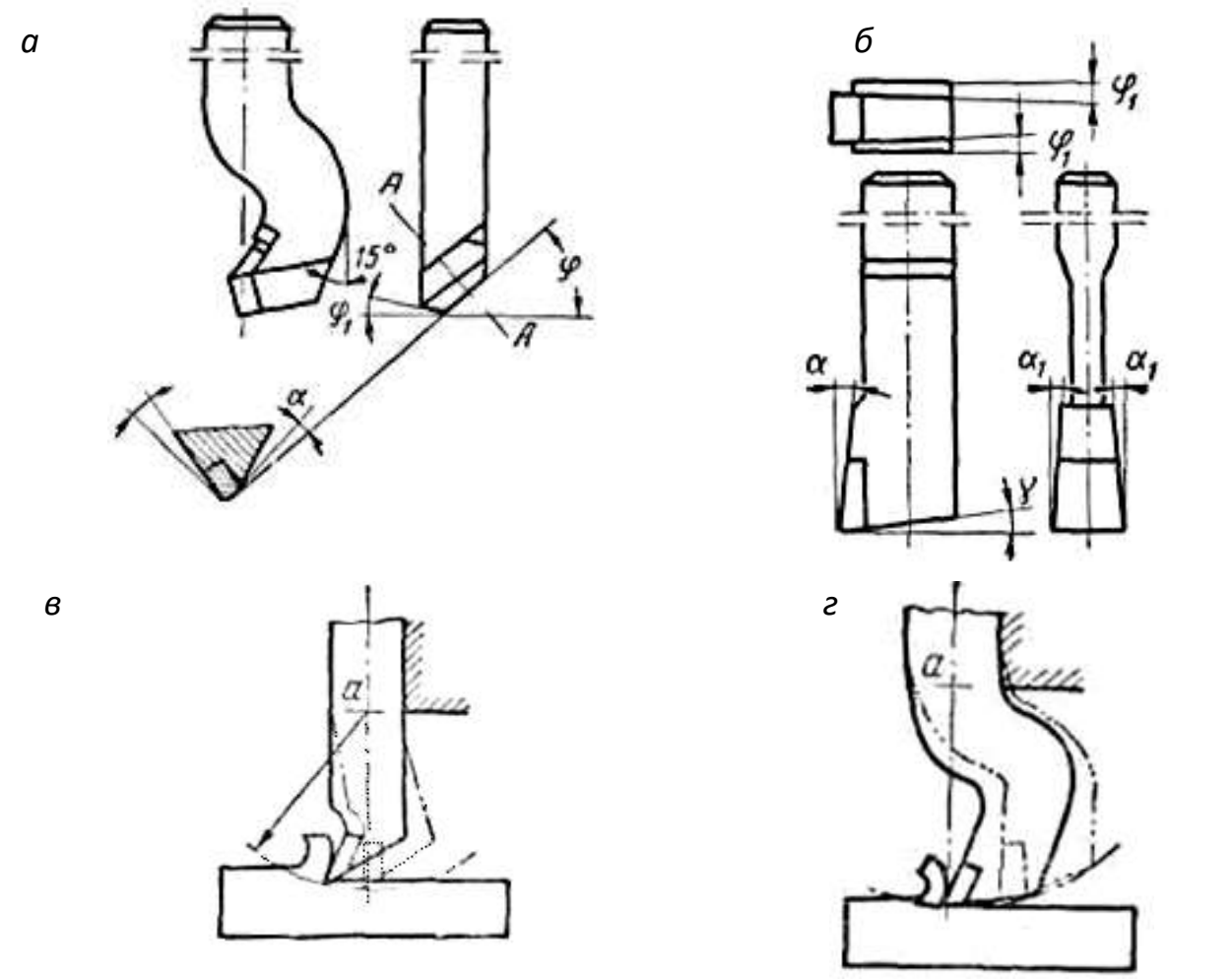



Рис. 6.2. Геометрические параметры резцов:
*а* и *б* – углы заточки строгального и долбежного резцов; *в* и *г* – схемы деформации строгальных резцов в процессе резания

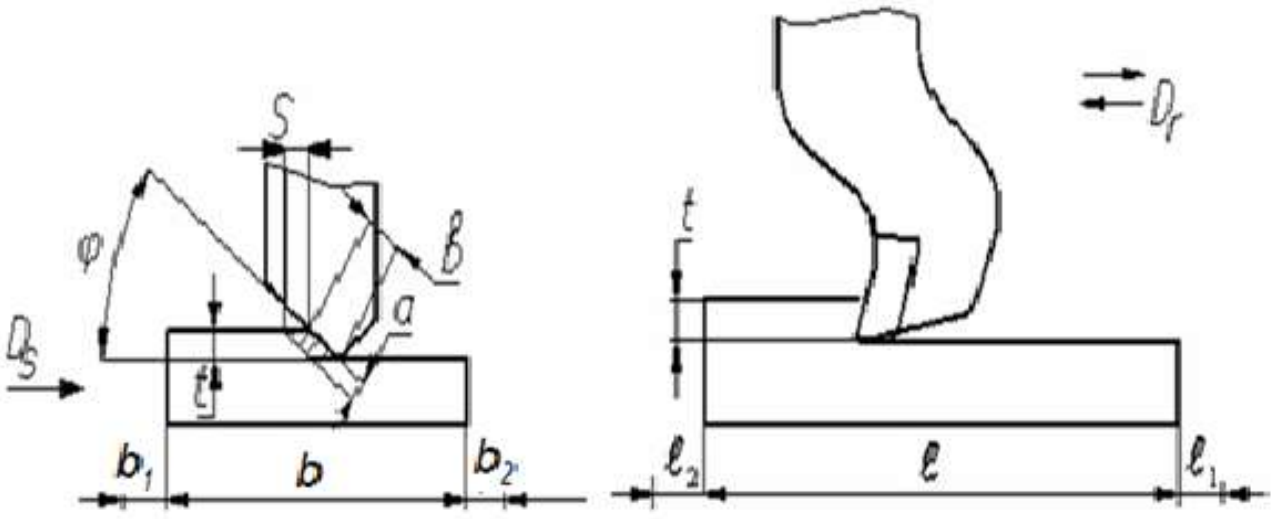



Рис. 6.3. Элементы режима резания при строгании

При работе на строгальных и долбежных станках резание осуществляется только во время рабочего хода. Во время обратного хода

резец не режет и успевает несколько остыть. В связи с этим принудительное охлаждение при строгальных и долбежных работах обычно не применяют.

В начале каждого рабочего хода врезание резца в обрабатываемый материал сопровождается ударом. Эти удары могут явиться причиной поломки резцов, поэтому строгальные резцы делают обычно большего сечения, чем токарные.

В общем случае скорость резания при строгании определяется по формуле

$$V_{\text{р.х.}} = \frac{nL}{1000}(1+m),$$

где $L = l + l_1 + l_2$ – длина хода резца, мм; $l$ – длина поверхности строгания, мм; $l_1$ – перебег резца при холостом обратном ходе, мм; $l_2$ – перебег резца при рабочем ходе, мм; $n$ – число двойных ходов резца или стола в минуту; $m$ – отношение скорости рабочего хода $V_{\text{р.х}}$ к скорости холостого хода $V_{\text{х.х.}}$. При работе на поперечно-строгальных станках $(l_1 + l_2)$ – принимается равным 35÷75 мм.

При одинаковых скоростях рабочего и холостого ходов

$$V_{\text{р.х}} = V_{\text{х.х}} = \frac{2nL}{1000}, \quad \text{откуда} \quad n = \frac{500V}{L}.$$

Основное технологическое время при строгании и долблении определяется по формуле, мин.,

$$T = B/n\,S,$$

где $B$ – расчетная ширина прохода резца, мм; $S$ – подача за двойной ход, мм; $n$ – число двойных ходов резца или стола, мин.;

$$B = b + b_1 + b_2,$$

где $b$ – ширина детали, мм; $b_1$ – путь врезания; $b_2$ – путь перебега резца

$$b_1 = t \cdot \text{ctg}\varphi,\ b_2 = (2 – 10) \text{ мм}.$$

## 6.2. Станки строгальной группы

Станки строгальной группы подразделяются на следующие типы.

***Поперечно-строгальные*** станки, служащие для обработки деталей с длиной строгания, обычно не превышающей 600 – 700 мм.

***Продольно-строгальные*** станки, применяемые для обработки крупных деталей. Они бывают двух- и одностоечными; к их числу относятся также кромкострогальные станки для обработки кромок стальных листов и плит.

***Долбежные станки***, применяемые главным образом для изготовления шпоночных пазов в отверстиях, а также вообще для обработки внутренних и наружных поверхностей деталей.

***Поперечно-строгальный станок.*** Общий вид поперечно-строгального станка (с наибольшей длиной хода ползуна 650 мм) показан на рис. 6.4. От электродвигателя движение через коробку скоростей и механизма качающейся кулисы, размещенные внутри станины *1*, передается ползуну *6* и столу *2*. На ползуне *6* закреплен суппорт *4* с откидным резцедержателем. Стол *2* по направляющим траверсы совершает движение периодической подачи при помощи храпового механизма.

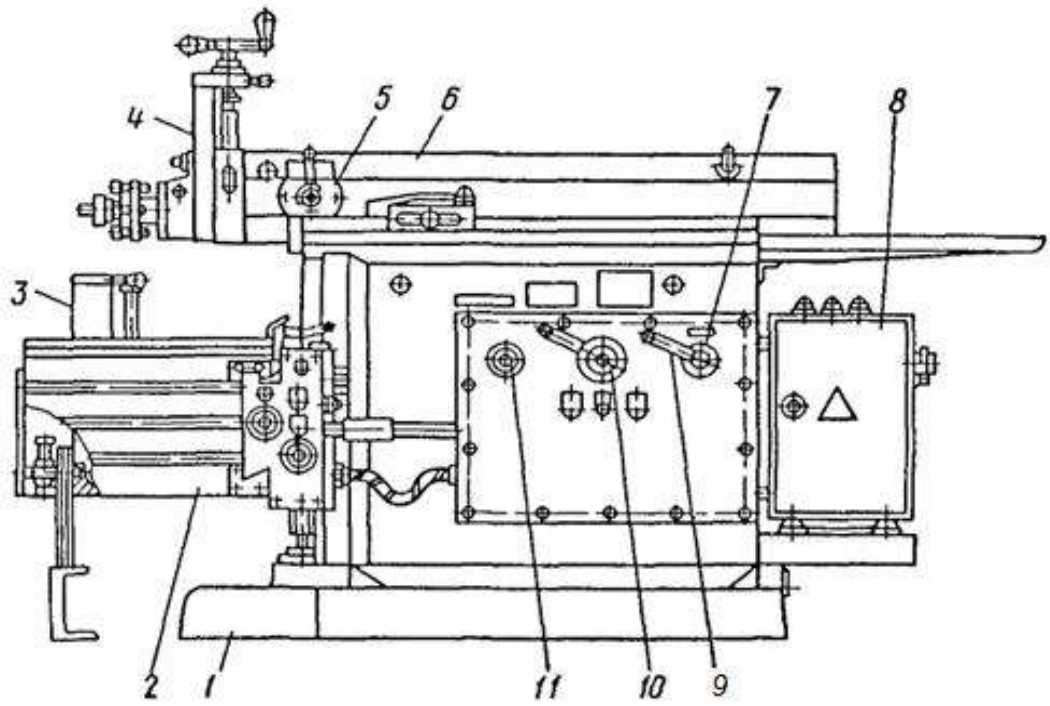



Рис. 6.4. Общий вид поперечно-строгального станка:
*1* – станина; *2* – поперечина со столом; *3* – стружкосборник; *4* – суппорт;
*5* – механизм вертикальной подачи; *6* – ползун; *7* – коробка скоростей;
*8* – электрооборудование; *9* –механизм переключения скоростей;
*10* – коробка подач; *11* – механизм кулисный

Подъем и опускание траверсы вместе со столом производятся путем вращения винта *3* (вручную). Суппорт *4* может перемещаться в вертикальном или наклонном направлении вручную $P_t$ или автоматически.

***Долбежный станок***. Общий вид станка представлен на рис. 6.5. Обрабатываемая деталь может получать продольную, поперечную и круговую подачи. Для этого на основном столе станка, расположенном на горизонтальных направляющих станины, помещен другой вращающийся круглый стол с делительным механизмом. Резец за-

креплен в ползуне, установленном на вертикальных направляющих станины, и ему сообщается возвратно-поступательное движение в вертикальном направлении.

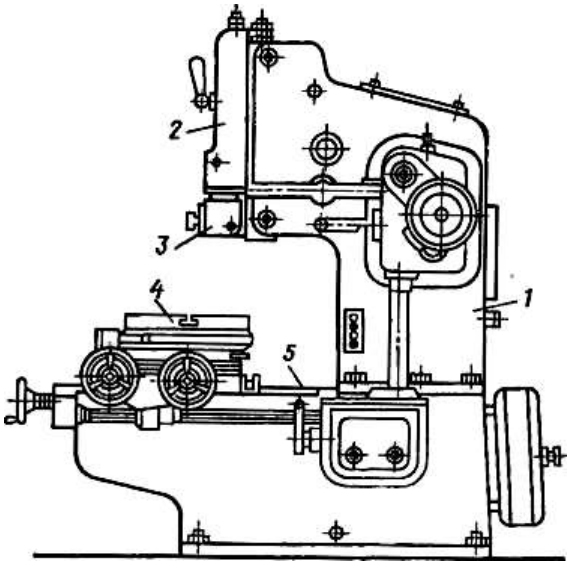



Рис. 6.5. Общий вид долбёжного станка:
*1* – станина; *2* – ползун(долбяк);
*3* – резцедержатель;*4* – круглый верхний стол; 5 – направляющие станины

В станине *1* расположены все механизмы станка. В ее вертикальных направляющих движется ползун *2*, совершающий вниз рабочий ход и вверх вспомогательный ход. В резцедержателе *3* крепят резец. Деталь устанавливают на столе *4*, перемещающемся по направляющим 5. Стол, кроме того, может вращаться.

**ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ**

1. От каких параметров зависит скорость рабочего хода ползуна?
2. Почему скорость холостого хода ползуна выше скорости рабочего хода?
3. Какие недостатки присущи поперечно-строгальному станку с кривошипно-кулисным приводом ползуна?
4. Почему строгальный резец имеет изогнутую форму? Пояснить эскизом.
5. От чего зависит длина хода ползуна и как она регулируется?

## 6.3. Обработка на протяжных станках

### *6.3.1. Протягивание и схемы резания при протягивании внутренних наружных поверхностей*

***Протягивание*** – механическая обработка внутренних и наружных поверхностей с прямолинейной образующей с помощью многолезвийного режущего инструмента – протяжки. Главное движение

при протягивании – поступательное движение протяжки. Заготовка при прямолинейном протягивании неподвижна.

*Протягивание* – высокопроизводительный метод обработки поверхностей различной степени сложности. Особенно эффективно протягивание сложных и фасонных профилей заготовок. Протягивание заготовок находит широкое применение.

Протягиванием обрабатывают различные внутренние и наружные, а также полуоткрытые поверхности (рис. 6.6).

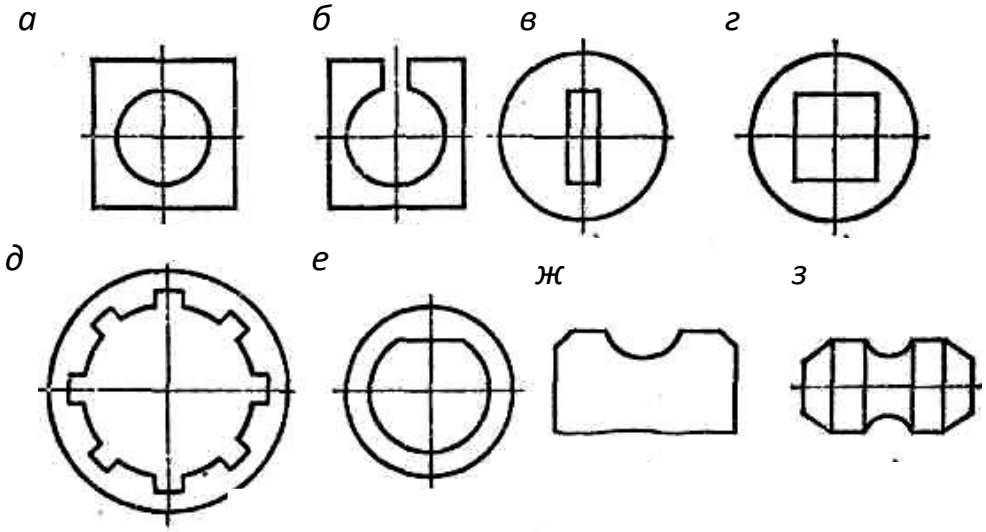



Рис. 6.6. Основные виды оорабатываемых поверхностей при протягивании:
*а, б, в, г, д, е* – внутренние поверхности; *ж, з* – наружные поверхности

При внутреннем свободном притягивании заготовки *2* (рис. 6.7, *а*), имеющие предварительно обработанное отверстие, базируют торцовой поверхностью на опорной плите *1* протяжного станка. Внутренняя протяжка имеет следующие составные части: хвостовик с замковой частью *8*, переходной конус *3*; переднюю направляющую *7* (для направления протяжки в начале ее работы по предварительно обработанному отверстию); режущую часть *6*, которая срезает основной закреплен в ползуне, установленном на вертикальных направляющих станины, и ему сообщается возвратно-поступательное движение в вертикальном направлении.

Прошивку (рис. 6.7, *б*) устанавливают передней направляющей *4* в отверстие заготовки *5*, установленной на опорной плите *6* прошивочного станка. Прошивка имеет режущую *3* и калибрующую *2* части, а также заднюю направляющую *1*. Прошивки чаще всего применяют для калибрования внутренних отверстий высокой точности. Иногда последние секции прошивки или протяжки выполняют полукруглыми для развальцовки – сглаживания шероховатости и придания поверхности высоких эксплуатационных свойств.

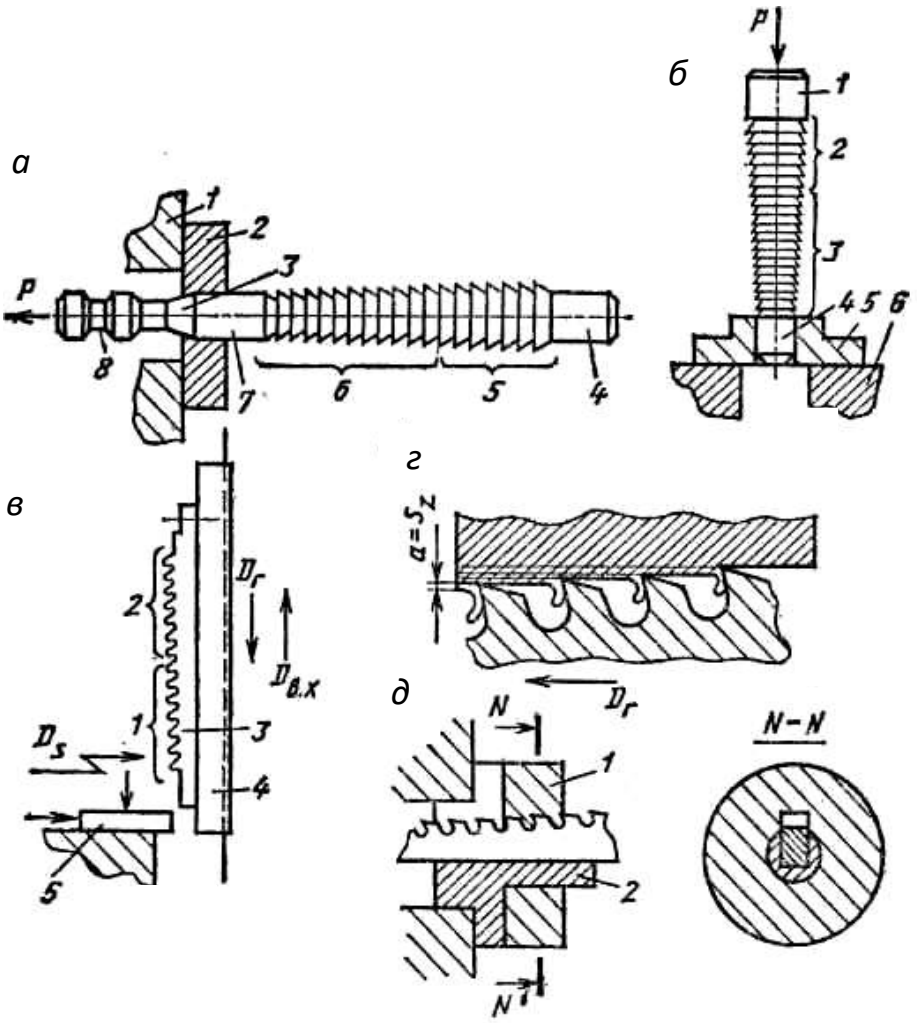



Рис. 6.7. Схемы обработки:
*а* – на горизонтально-протяжном станке; *б* – на прошивном станке;
*в* – на вертикально-протяжном станке; *г* – срезание припуска при протягивании;
*д* – шпоночного паза

Особенности протяжек, осуществляющих протягивание наружных поверхностей, заключаются в том, что они не имеют ни передних, ни задних направляющих. Наружная протяжка *3* (рис. 6.7, *в*), жестко закрепленная на каретке *4* протяжного станка, имеет также режущую *1* и калибрующую *2* части. Заготовка *5*, жестко закрепленная на столе станка, отводится по окончании цикла обработки и снимается со станка. Схема срезания припуска при протягивании приведена на рис. 6.7, *г*. На рис. 6.7, *д* показана схема протягивания шпоночного паза заготовки *1*, установленной на оправке *2*.

При протягивании применяют профильную, генераторную и прогрессивную схемы срезания припуска (рис. 6.8). При профильной (рис. 6.8, *а*) схеме срезания припуска геометрическая форма всех зубьев подобна профилю окончательно обработанной поверхности

заготовки. Вписанный контур соответствует форме первого зуба, а описанный – форме последнего зуба протяжки.

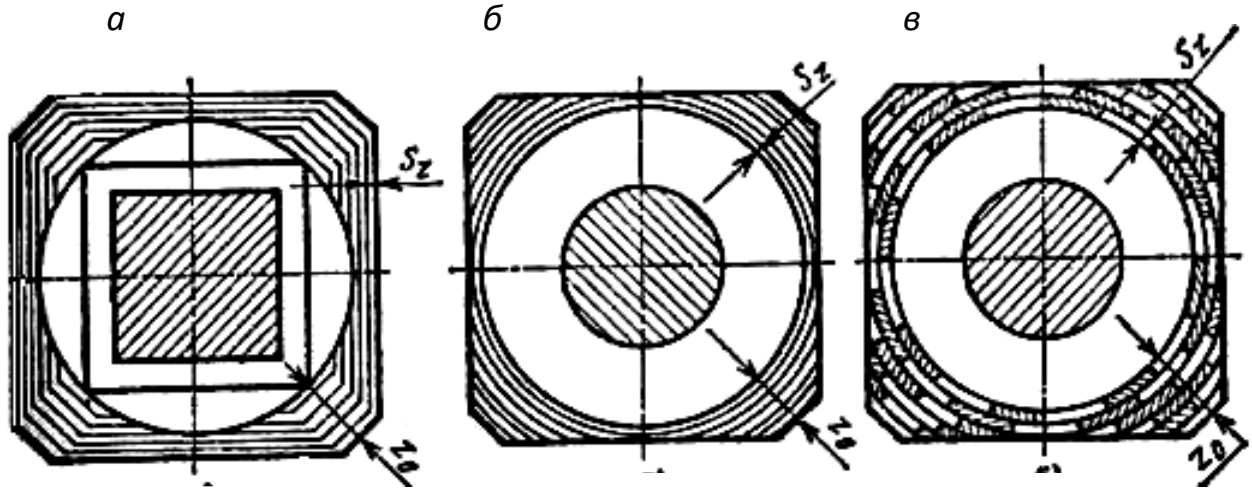



Рис. 6.8. Схемы резания при протягивании:
*а* – профильная; *б* – генераторная схема; *в* – прогрессивная

Такая схема резания имеет ограниченное применение вследствие трудности изготовления профильных протяжек. По профильной схеме работают протяжки круглого профиля, а также наружные протяжки, обеспечивающие высокое качество обработанной поверхности.

При генераторной схеме срезания припуска первый зуб протяжки имеет круглую форму, все последующие зубья имеют также круглую форму в виде частей окружности – дуг (рис. 6.8, *б*). Протяжки, работающие по генераторной схеме, более просты в изготовлении, их проще затачивать повторно и себестоимость их изготовления ниже, чем протяжек, работающих по профильной схеме. Квадратные, многогранные, координатные протяжки для срезания припуска изготовляют по генераторной схеме.

Если невозможно резание по генераторной схеме (сила резания первыми тремя зубьями превышает предельно допустимую силу разрыва опасного сечения или припуск на зуб менее 0,02 мм – когда резание становится неэффективным), применяют прогрессивную схему резания (рис. 6.8, *в*). Эта схема предусматривает разделение срезаемого слоя на несколько слоев с большим припуском на зуб. У протяжки, работающей по этой схеме, режущие зубья разделены на группы (два, три и т. д.), имеющие одинаковый наружный размер. При этом срезаются узкие стружки. Стойкость такой протяжки в среднем в 2 раза выше, чем протяжки, работающей по генераторной схеме резания.

Протяжки, работающие по прогрессивной схеме, более сложны в изготовлении, чем протяжки, работающие по профильной или генераторной схеме.

В качестве СОТС при протягивании используют эмульсии, сульфофрезол, а также смесь керосина и масла. Обработка чугунных заготовок производится без охлаждения.

### *6.3.2. Элементы режима резания при протягивании*

Определение режимов резания при протягивании сводится к назначению скорости резания, так как толщина $a$ и ширина $b$ срезаемого слоя обусловлены конструктивными особенностями протяжки.

***Скорость резания при протягивании*** – скорость относительного перемещения протяжки и заготовки в главном рабочем движении. Скорость резания выбирают, исходя из требования к качественным параметрам обрабатываемой поверхности. Обычно $V$ = 3÷20 м/мин или $V$ = 0,05÷0,4 м/с. При конструировании протяжки задается $S_z$ = 0,015÷0,08 мм/зуб – при профильной схеме срезания припуска и $S_z$ = 0,15÷0,35 мм/зуб – при прогрессивной схеме резания, в зависимости от обрабатываемого материала. Ширина срезаемого слоя $b$ измеряется вдоль режущей кромки. У шпоночной протяжки – это ширина паза, у протяжек других видов ширина равна длине активной части режущей кромки. У круглых протяжек ширина резания равна длине окружности.

Основное время (мин) при протягивании выбирают за один цикл протягивания:

$$T_o = \frac{L_{р.х.}}{1000Vq}k,$$

где $L$ – длина рабочего хода протяжки, мм; $k$ = 1,2÷1,5 – коэффициент, учитывающий соотношение скоростей рабочего и вспомогательного хода протяжки; $V$ – скорость резания, м/мин; $q$ – число одновременно обрабатываемых заготовок.

Длина рабочего хода $L = l_р + l_З + l_д + l_{доп}$; где $l_р$ – длина рабочей части протяжки; $l_з$ – длина задней направляющей; $l_д$ – длина протягиваемой поверхности; $l_{доп}$ = 30÷50 мм – суммарная длина на вход и перебег протяжки.

### *6.3.3. Сила резания при протягивании*

Для расчета протяжек на прочность и для определения мощности привода станка необходимо знать силу резания при протягивании. Она определяется по формуле

$$P_z = F_y \cdot \Sigma b,$$

где $F_y$ – сила резания, приходящаяся на единицу длины режущей кромки зуба (удельная сила резания); $\Sigma b$ – суммарная длина режущих кромок, одновременно участвующих в резании, определяется по формулам:

– для цилиндрических отверстий – $\Sigma b = \pi d z_i$;

– шлицевых отверстий и шпоночных пазов – $\Sigma b = b_i n z_i$,

где $d$ – наибольший диаметр протяжки; $z_i$ – наибольшее число одновременно работающих зубьев; $b_i$ – ширина шлица или шпонки; $n$ – число шлицев или шпоночных пазов.

Внутренние протяжки рассчитываются по напряжению на разрыв по опасному сечению хвостовика и стружечной канавки перед первым режущим зубом:

$$\sigma = \frac{P_z}{F},$$

где $F$ – площадь наименьшего сечения протяжки, м$^2$.

Эффективная мощность (Вт) резания при протягивании

$$N_э = P_z V,$$

где $P_z$, $V$ – сила и скорость резания при протягивании.

$$V = \frac{C_v}{T^m S_z^y},$$

где $C_v$ – коэффициент, характеризующий условия резания; $T$ – стойкость инструмента, мин; $S_z$ – подача на зуб, мм. Значения $C_v$ и показателей степеней $m$ и $y$ приведены в справочной литературе.

### *6.3.4. Типы протяжек, их конструктивные элементы и геометрические параметры*

Принципиальное отличие протягивания от других видов механической обработки заключается в том, что при протягивании отсутствует движение подачи $D_s$. Значение подачи при протягивании заложено в конструкции инструмента. Размер каждого последующего режущего элемента протяжки больше предыдущего на величину, численно равную $S_z$ – подаче на зуб. Каждый зуб протяжки в отличие от зуба фрезы только один раз участвует в обработке данной заготовки;

так как суммарное число зубьев, участвующих в резании, велико, то в работе одновременно находится несколько зубьев (три – шесть).

Существуют протяжки нескольких типов. Круглые протяжки предназначаются для обработки внутренних цилиндрических поверхностей (см. рис. 6.7, *а,* 6.9).

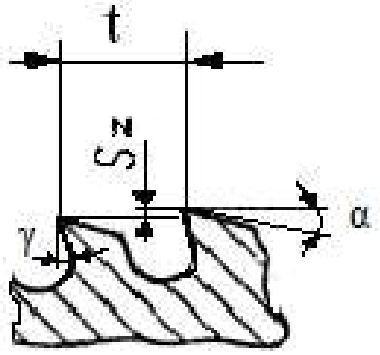



Рис. 6.9. Геометрические параметры зубьев протяжки

Шлицевые протяжки применяют для обработки прямых и винтовых шлицевых канавок. Канавки изготовляют прямыми и эвольвентного профиля.

Шпоночные протяжки применяют для обработки шпоночных пазов. Обработка заготовки *1* шпоночной протяжкой производится с помощью специального приспособления – оправки *2* (см. рис. 6.7, *д*).

Многогранные протяжки применяют для обработки граненых отверстий с любым числом сторон. Многогранные протяжки работают по генераторной схеме резания.

Плоские протяжки предназначаются для обработки плоских поверхностей (см. рис. 6.7, *в*). Они работают по профильной и прогрессивной схемам резания.

Протяжки являются сложным по конструкции и дорогим инструментом, в связи с чем они должны иметь максимально возможную стойкость. У шпоночных протяжек из быстрорежущих сталей стойкость $T > 120$ мин, у шлицевых $T > 420$ мин при обработке стальных заготовок. Для изготовления цельных протяжек применяют следующие быстрорежущие стали: Р6М5, Р9, Р9Ф5, Р9К5 и др. В некоторых случаях применяют для изготовления протяжек углеродистые и легированные стали (9ХС, ХВГ и др.). Стойкость протяжек из легированных сталей в 2 – 2,5 раза выше стойкости протяжек из быстрорежущих сталей.

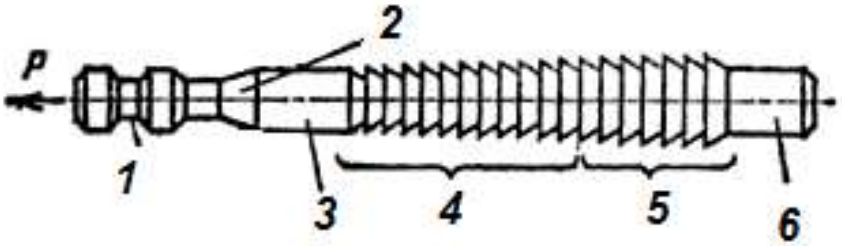



Рис. 6.10. Конструкция внутренней протяжки:
*1* – хвостовик; *2* – переходный конус; *3* – передняя направляющая поверхность;
*4* – режущая часть протяжки; *5* – калибрующая часть протяжки;
*6* – задняя направляющая

Переходной конус внутренней протяжки *2* (рис. 6.10) служит для плавного входа протяжки в обрабатываемое отверстие. Его длина обычно равна 20 мм. Угол конуса 15 – 30°. Передняя направляющая *3* протяжки обеспечивает ее центрирование по предварительно обработанному отверстию и тем самым гарантирует правильный вход режущих зубьев протяжки в начальный период обработки. Диаметр или размер направляющей равен наименьшему диаметру или размеру предварительно обработанного отверстия. Задняя направляющая *6* необходима для правильного выхода последних зубьев протяжки из обрабатываемого отверстия (во избежание перекоса заготовки). Длина задней направляющей равна половине длины обрабатываемого отверстия.

Рабочая часть протяжки состоит из режущих *4* и калибрующих *5* зубьев. Иногда вместо калибрующих зубьев применяют выглаживающие. Число режущих зубьев

$$z_{\text{р}} = \frac{z_o}{S_z} + (2 \div 4),$$

где $z_0$ – припуск на обработку поверхности; $S_z$ – подача на зуб.

Число калибрующих зубьев берут равным 3 – 8, в зависимости от точности обрабатываемой поверхности. Чем выше точность, тем больше число калибрующих зубьев. Точность поверхностей, обрабатываемых протягиванием, соответствует 6 – 7-му квалитету.

Передний угол $\gamma$ выбирают для режущих и калибрующих зубьев $\gamma = 5 \div 10°$. Задний угол $\alpha$ у протяжек выбирают, исходя из условия сохранения размеров при повторных заточках. Для внутренних протяжек для режущих зубьев $\alpha = 2 \div 4°$, а для калибрующих $\alpha = 1 \div 30'$. Для наружных протяжек $\alpha = 7 \div 10°$ для режущих зубьев, а для калибрующих $\alpha = 3 \div 4°$.

Подачу на зуб $S_z$ при конструировании протяжек выбирают, исходя из конкретных условий; она зависит от обрабатываемого материала.

Для уменьшения износа и улучшения условий срезания припуска $S_z >> 0{,}02$ мм. Для сталей $S_z = 0{,}07 \div 0{,}15$ мм; для чугуна $S_z = 0{,}1 \div 0{,}2$ мм; для бронз, латуни $S_z = 0{,}2$ мм; для алюминия $S_z = 0{,}1$ мм.

### *6.3.5. Протяжные станки. Основные параметры*

**Протяжные станки подразделяют на несколько основных типов:**

- *по степени универсальности* – станки общего назначения и специальные;
- *назначению* – станки для внутреннего и наружного протягивания;
- *направлению главного движения и степени автоматизации* – станки с вертикальным и горизонтальным главным движением и станки непрерывного действия.

Основными характеристиками протяжного станка являются наибольшая тяговая сила, длина хода штока и диапазон скоростей протягивания. Современные протяжные станки создают усилие $3 \cdot 10^4 \div 10^5$ Н. Диапазон скоростей протягивания на протяжных станках 0,3÷20 м/мин.

На протяжных станках главное движение чаще совершает протяжка, а заготовка установлена неподвижно (см. рис. 6.6), подача обеспечивается конструкцией протяжного инструмента.

#### Горизонтально-протяжные станки

***Горизонтально-протяжные станки*** применяют в основном для обработки внутренних поверхностей, их тяговая сила составляет 30÷100 000 Н, скорость рабочего хода 0,3÷20 м/мин. Длина хода каретки 1000 – 2000 мм. Горизонтально-протяжной станок (рис. 6.11) состоит из станины *1* коробчатой формы, гидронасоса *2*, гидроцилиндра *3*, каретки *4*, несущей шток, и замкового приспособления. Каретка перемещается по горизонтальным направляющим *7*.

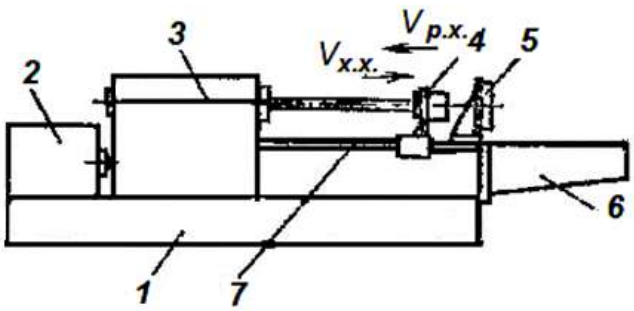



Рис. 6.11. Горизонтально-протяжной станок:
*1* – станина; *2* – гидронасос;
*3* – гидроцилиндр; *4* – каретка;
*5* – опорная плита; *6* – корыто;
*7* – направляющие

Для установки заготовки служит опорная плита *5*. Для фиксирования тяжелых протяжек устанавливают иногда дополнительный люнет на направляющие корыта *6*. Люнет удерживает задний хвостовик протяжки во время протягивания, предохраняя ее от провисания. Корыто служит также для приема стружки, отработанной СОЖ и мелких заготовок.

Протягивание осуществляется следующим образом. Обрабатываемую заготовку устанавливают на опорную плиту *5* станка и протяжку, вставленную в предварительно обработанное отверстие заготовки, закрепляют в тяговом патроне каретки *4*. В процессе протягивания шток гидроцилиндра перемещается вместе с кареткой и протяжкой в левое положение, осуществляя рабочий ход протяжки. После снятия заготовки каретка возвращается в исходное положение, и на этом рабочий цикл станка заканчивается.

## Вертикально-протяжные станки

***Вертикально-протяжные станки*** (рис. 6.12) более удобны в обслуживании, обработка на них легче поддается механизации и автоматизации. Эти станки *используют для внутреннего и наружного протягивания легких и средних заготовок*. Тяговая сила, развиваемая вертикально-протяжными станками, 50000 – 200000 Н. Скорость рабочего хода 0,5 – 15 м/мин, длина хода каретки 600 – 1600 мм.

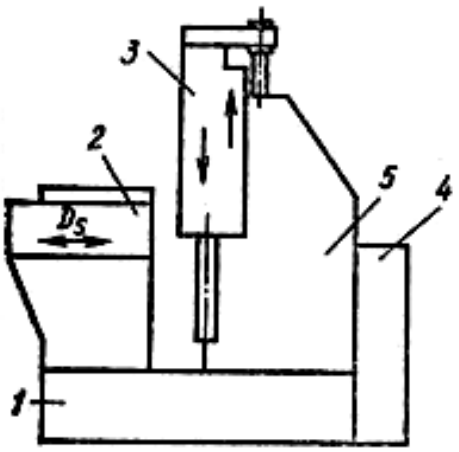



Рис. 6.12. Вертикально-протяжной станок:
*1* – основание; *2* – горизонтальный стол; *3* – ползун;
*4* – гидронасосная станция; *5* – станина

Вертикально-протяжные станки широко применяют в настоящее время и для внутреннего протягивания. Рабочий цикл станка для обработки внутренних поверхностей тот же, что и для наружного протягивания. При внутреннем протягивании протяжка захватывается патроном после подачи ее через отверстие заготовки. Подача протяжки осуществляется дополнительной вспомогательной кареткой, которая после зажима протяжки патроном рабочей каретки останавливается.

Кроме рассмотренных протяжных станков, в крупносерийном и массовом производстве находят применение многопозиционные станки (два и более суппорта), а также станки непрерывной обработки.

## Протяжные станки непрерывной обработки

***Протяжные станки непрерывной обработки обладают очень высокой производительностью***. Заготовки *2* (рис. 6.13) устанавливают в специальных приспособлениях на бесконечной тяговой ленте *1*, которая сообщает им главное поступательное движение со скоростью резания. Протяжка *3* неподвижно закреплена в процессе обработки. Заготовки в процессе обработки силами резания прижимаются к неподвижной подкладке *4*.

На протяжных станках непрерывной обработки карусельного типа заготовки устанавливают на круглом вращающемся столе.

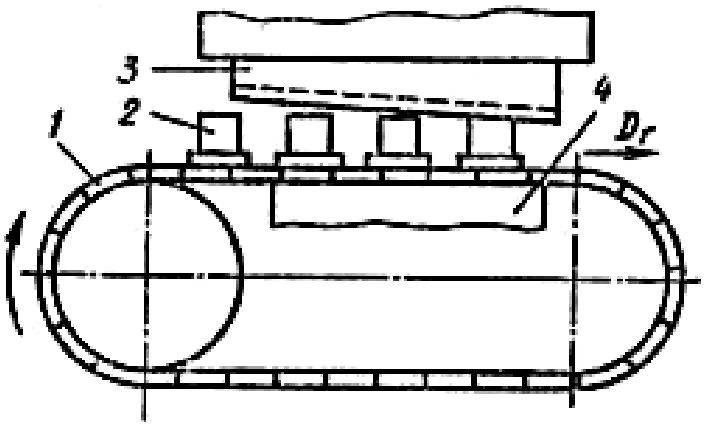



Рис. 6.13. Схема обработки на протяжном станке непрерывной обработки:
*1* – бесконечная тяговая лента; *2* – заготовки; *3* – протяжка;
*4* – неподвижная подкладка

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В чем различие схем срезания припуска при протягивании?
2. Что относят к элементам режима резания при протягивании?
3. Назовите область применения протягивания и наиболее распространенные поверхности, обрабатываемые протяжным инструментом.
4. Назовите основные типы протяжных станков и область их применения.
5. В чем отличие протяжных станков непрерывной обработки от горизонтально- и вертикально-протяжных станков?

# 7. ОБРАБОТКА НА ШЛИФОВАЛЬНЫХСТАНКАХ

## 7.1. Особенности процесса шлифования. Абразивный инструмент

Шлифование является одним из производительных методов обработки различных поверхностей. Обработка осуществляется абразивным инструментом (шлифовальные круги, бруски, сегменты, шкурки и т. п.), абразивные зерна которых являются режущими элементами. Зерна в инструменте закреплены связующим компонентом – связкой с обязательным наличием пор (рис. 7.1).

Особенностью шлифования является **одновременное микрорезание несколькими зернами,** каждое из которых имеет два-три режущих лезвия и более, у каждого режущего лезвия свои угловые параметры. **Передний угол γ** у режущих лезвий зерен часто бывает **отрицательный**. Радиус округления режущих кромок абразивных зерен **близок к нулю**, поэтому в совокупности абразивные зерна на поверхности круга способны срезать тончайшие слои с обрабатываемой заготовки (несколько микрометров), в отличие от лезвийного инструмента, радиус при вершине «клина» которых составляет от нескольких десятков до нескольких сотен микрометров.

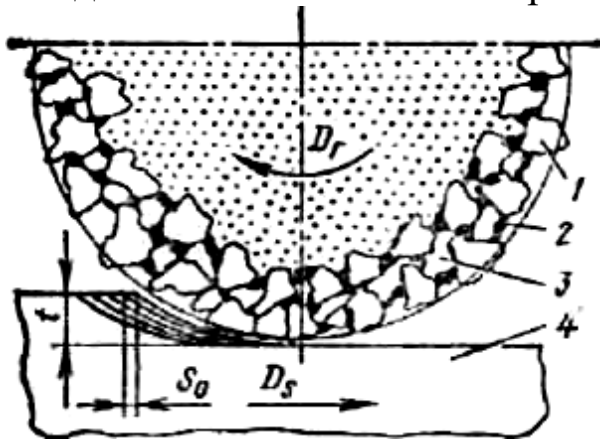



Рис. 7.1. Схема срезания припуска при шлифовании и конструктивные особенности абразивного инструмента: *1* – зерна; *2* – связка; *3* – поры; *4* – заготовка

Зерна, закрепленные связкой в инструменте, находятся на различном уровне; чем меньше толщина срезаемого слоя, тем меньше зерен участвует в резании. Чем больше зерен участвует в резании, тем меньше шероховатость обработанной поверхности. Абразивный инструмент, как и любой лезвийный инструмент, нуждается в периодической заточке (правке) по мере затупления режущих элементов. Так как скорость резания при шлифовании во много раз превышает скорость резания при лезвийной обработке, и, ввиду геометрических особенностей режущих элементов абразивного инструмента, снятие припуска происходит с **большим выделением теплоты (1000÷1500 °С).** Это оказывает влияние на физико-химические и эксплуатационные свойства обрабатываемой поверхности. Во избежание или для уменьшения влияния высокой температуры и силовых факторов необходимы **обильное охлаждение** (СОТС), оптимальные характеристики круга, шлифования, правящий инструмент и режимы правки.

## 7.2. Схемы обработки при шлифовании

В современном машиностроении шлифованию подвергают различные поверхности деталей машин: плоские, цилиндрические, фасонные, внутренние, наружные и т. п. Наиболее часто обрабатывают поверхности деталей, имеющих ось вращения (валы, втулки, резьбы и др.), а также плоские поверхности (плоскости, уступы, пазы и др.).

Существуют различные схемы шлифования этих поверхностей. Для всех способов шлифования главным движением резания является вращательное движение шлифовального круга $D_г$, а движение подачи $D_s$ совершает заготовка.

*Обработка заготовок на круглошлифовальных станках*. При наружном круглом шлифовании возвратно-поступательное продольное движение (рис. 7.2) подачи осуществляется столом с закрепленной

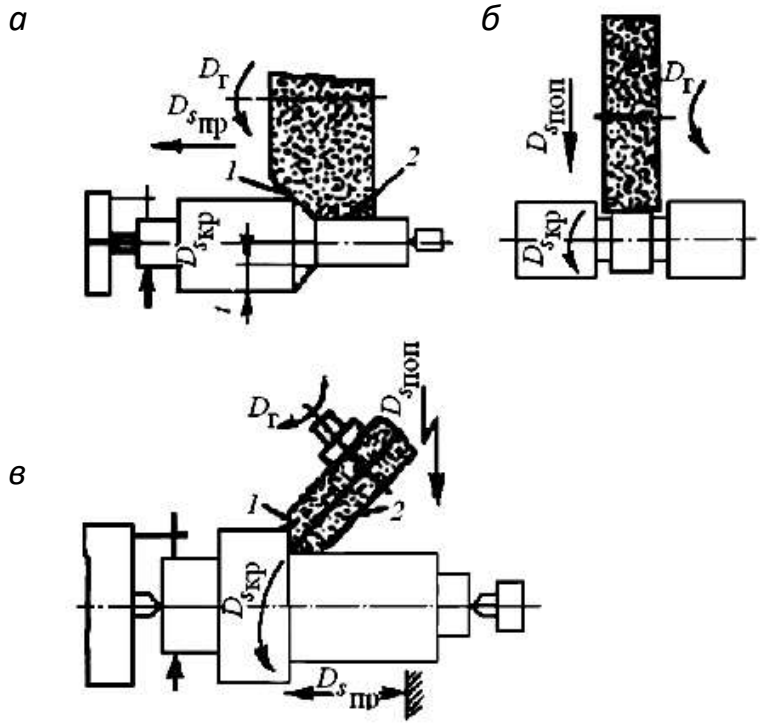



Рис. 7.2. Схемы наружного шлифования в центрах:
*а* – глубинное; *б* – врезное; *в* – шлифование двух взаимно перпендикулярных поверхностей

на нем заготовкой. Круговое движение подачи заготовки производится передней бабкой шлифовального станка, а поперечное движение подачи шлифовальным кругом осуществляется на каждый ход стола или двойной ход стола вне зоны обработки. Такой способ круглого шлифования называют ***осциллирующим шлифованием.***

В зависимости от направления поступательного движения подачи, различают еще несколько видов круглого шлифования: *глубинное; врезное* шлифование и шлифование *уступами* (рис. 7.2, *в*). Глубинное

шлифование может производиться по схеме с продольным движением подачи и врезным.

*Обработка заготовок на плоскошлифовальных станках*. При плоском шлифовании периферией круга (рис. 7.3) обеспечивается наиболее высокая точность обработки, лучшие показатели качества обработанной поверхности. Возможна обработка заготовок малой жесткости.

Заготовки, обрабатываемые этим методом, устанавливают на плоском столе и закрепляют либо механически, либо, что чаще всего, на магнитной плите.

При плоском шлифовании возвратно-поступательное продольное движение подачи ($D_{пр}$) и прерывистое движение поперечной подачи ($D_{Sпоп}$) совершает заготовка или шлифовальный круг.

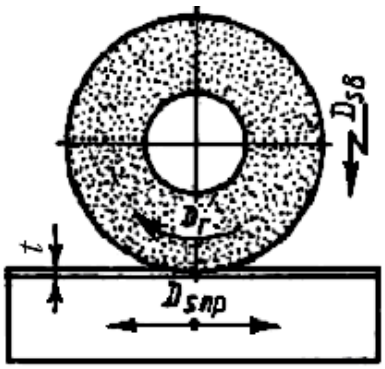



Рис. 7.3. Схема обработки заготовки на плоскошлифовальном станке периферией круга

Плоское шлифование периферией круга большой партии однотипных заготовок производится на плоскошлифовальных станках с круглым столом (рис. 7.4).

Плоское шлифование торцом круга (рис. 7.5) также может осуществляться на плоскошлифовальных станках, с прямоугольным и круглым столом. Но, в отличие от резания периферией круга, при торцовом шлифовании одновременно участвует в резании намного больше режущих элементов-зерен (большая площадь контакта). Поэтому при торцовом шлифовании выделяется существенно больше теплоты и возможны прижог и коробление тонких заготовок.

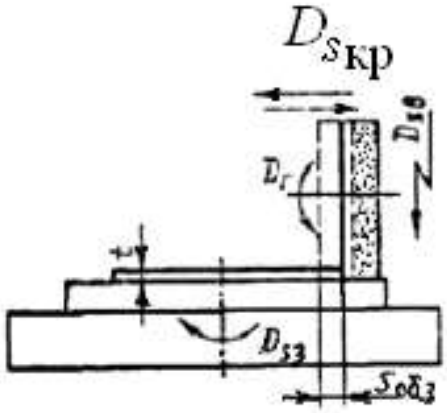



Рис. 7.4. Схема обработки заготовок периферией круга на плоскошлифовальном станке с круглым столом

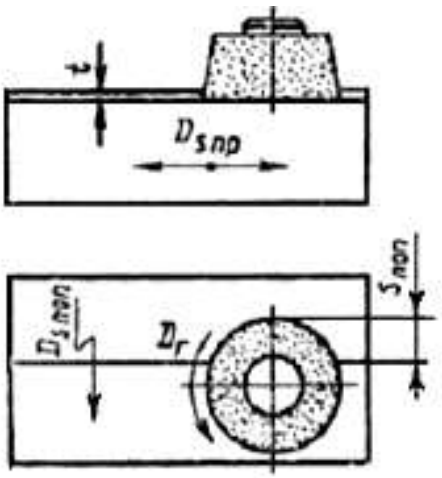



Рис. 7.5. Схема обработки на плоскошлифовальном станке торцом чашечного круга

Чтобы уменьшить выделение теплоты, часто используют сегментные торцовые круги с меньшей площадью контакта.

Способы установки и закрепления заготовок на плоскошлифовальных станках всех видов зависят от размеров, формы обрабатываемых заготовок, типа производства.

Закрепление заготовок на магнитной плите обеспечивает быстрый и надежный прижим заготовок, имеющих поверхность базирования.

*Обработка заготовок на внутришлифовальных станках*

Внутренним круглым шлифованием обрабатывают внутренние поверхности. Обработка производится следующими методами: шлифование с продольным движением подачи (рис. 7.6, *а, б*), врезное шлифование с поперечным движением подачи, врезное шлифование с дополнительной осцилляцией круга (рис. 7.6, *в*), шлифование с планетарным $D_{S\text{ пл}}$ движением круга (рис. 7.6, *г*). При планетарном движении шпиндель с кругом, помимо главного движения, совершает еще вращательное относительно оси обрабатываемого отверстия. Метод применяют для шлифования отверстий в тяжелых корпусных заготовках.

*Бесцентровое круглое наружное шлифование*. Сущность бесцентрового шлифования заключается в том, что заготовка в процессе обработки не закрепляется в центрах и других зажимных приспособлениях, а базируется на опорном ноже станка и ведущем круге (рис. 7.7). Таким

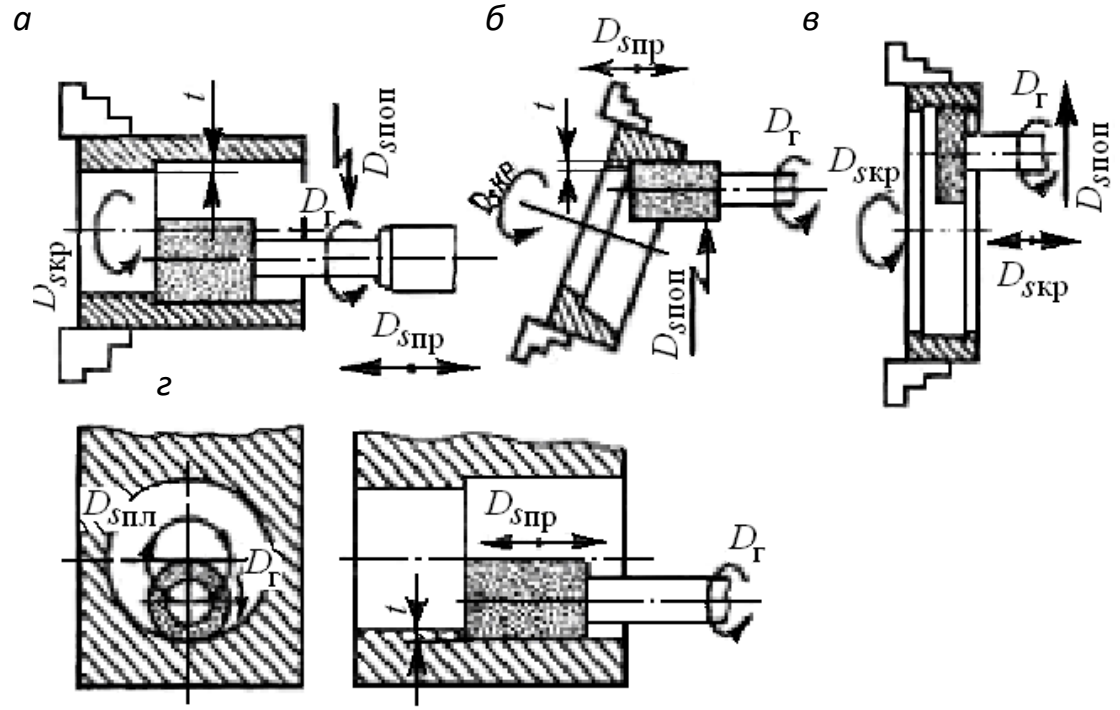



Рис. 7.6. Схемы обработки заготовок на внутришлифовальных станках:
*а–в* – шлифование в патроне; *г* – планетарное шлифование

образом, возможно шлифование большими партиями не только заготовок колец, гильз, но и заготовок, имеющих большую длину и малый диаметр. Обработка заготовки (заготовок) *2* заключается в следующем.

Шлифовальный *3* и ведущий *1* круги вращаются с разной частотой. Окружная скорость шлифовального круга в 50 – 60 раз выше окружной скорости ведущего круга. Конструктивно ведущий круг выполнен также, как шлифовальный, но на основе вязких, вулканитовых связующих веществ, обеспечивающих контакт с заготовкой практически без

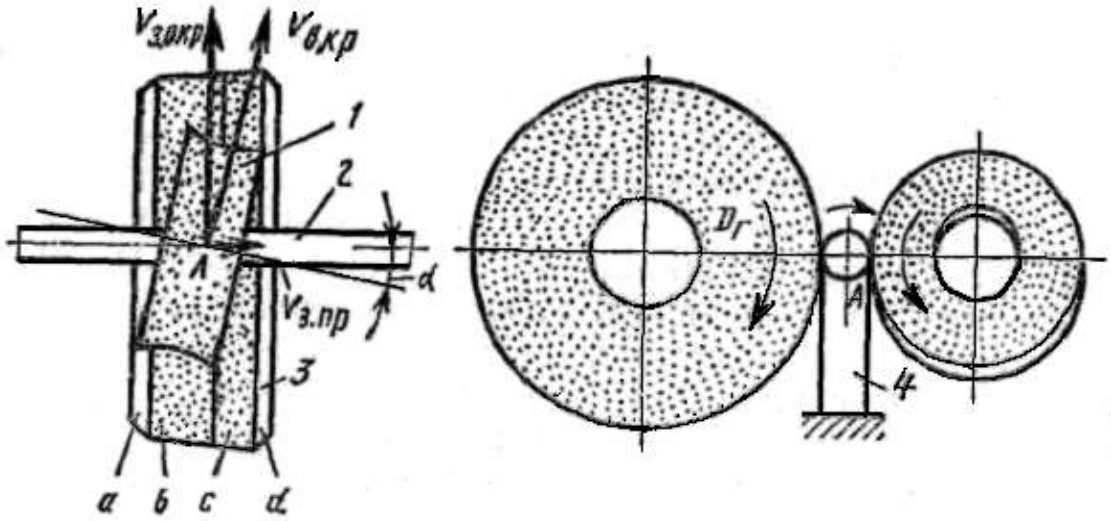



Рис. 7.7. Схема обработки на бесцентрово-шлифовальном станке
*1* – ведущий круг; *2* – заготовка; *3* – шлифовальный круг; 4 – опора

скольжения. В этом случае мгновенная окружная скорость в точке А (точка контакта) будет одинаковой для заготовки и ведущего круга.

Рассмотрим схему бесцентрового шлифования напроход (см. рис. 7.7). Для обеспечения перемещения заготовки вдоль оси шлифовального круга у ведущего круга предусмотрен наклон в вертикальной плоскости на 0 – 8° к оси шлифовального круга. Учитывая это, а также одинаковые окружные скорости ведущего круга и заготовки в месте контакта, разложим вектор угловой скорости ведущего круга на составляющие относительно заготовки: вертикальную – вектор угловой скорости заготовки и горизонтальную – вектор скорости перемещения заготовки вдоль своей оси. Меняя угол наклона ведущего круга α, можно изменять в значительной степени угловую скорость и скорость поступательного движения заготовки. При α = 0 и $V_{з\ пр.}$ = 0 происходит врезное шлифование.

Рабочая поверхность шлифовального круга состоит из четырех участков, каждый из которых выполняет свою функцию. ***а*** – участок входа заготовки, или заборный конус. Высота этого конуса 10 – 30 мм. Угол его наклона способствует беспрепятственному вхождению заготовок в зону резания с предельными значениями припуска. Основную часть круга по высоте занимает рабочий конус ***в***, который снимает припуск с заготовки и обеспечивает равномерность его съема. Цилиндрическая калибрующая зона ***с*** обеспечивает заданный параметр шероховатости поверхности после срезания основного припуска. Длина калибрующего участка не более 110 мм. Зона ***d*** имеет обратную конусность и служит для направления заготовок после обработки, длина этого конуса не превышает 20 – 30 мм.

## 7.3. Элементы режима резания при шлифовании

Элементы срезаемого слоя при шлифовании относятся не к единичным режущим зернам, а к их совокупности – режущей поверхности абразивного инструмента. Основными элементами режима резания при шлифовании являются: окружная скорость круга $V_{кр}$, окружная скорость (перемещения) заготовки $V_з$, глубина резания $t$, подача $S$. Элементы режима резания при плоском, круглом шлифовании показаны на рис. 7.2 – 7,5; а при внутреннем шлифовании – на рис. 7.6.

Скоростью резания (м/с) при шлифовании $V_{кр}$ называют линейную скорость на наибольшей окружности шлифовального круга

$$V_{кр} = \pi D \cdot n / 6 \cdot 10^4,$$

где $n$ – частота вращения, мин$^{-1}$.

**Скоростью перемещения заготовки** при шлифовании называют: *при плоском шлифовании* – скорость перемещения стола, при *круглом шлифовании* – окружную скорость заготовки.

***Поперечной подачей*** (при плоском шлифовании) и продольной подачей (при круглом и внутреннем шлифовании) *называют перемещение точки круга вдоль оси за один оборот, ход или двойной ход заготовки.* Поперечную подачу измеряют в долях высоты круга $H$; $S = k H$, где $k$ – коэффициент определяющий долю высоты круга, приводится в справочных таблицах.

***Глубиной резания*** при шлифовании *называют слой металла между обработанной и обрабатываемой поверхностью*, снимаемый *за один рабочий ход.*

В зависимости от различных технологических параметров качества заготовки, оборудования можно с помощью справочных данных назначить окружную скорость шлифовального круга, глубину срезаемого слоя, скорость движения подачи.

## 7.4. Силы резания при шлифовании

Снятие припуска с заготовки любым инструментом, в том числе абразивным, происходит под действием силы $P$, которая отделяет лишний слой материала в виде стружки. У лезвийных инструментов (резцов, сверл, фрез и т. п.) довольно просто представляется воздействие силы резания $P$ или ее составляющих ввиду явно выраженных

режущих элементов, геометрических параметров инструментов, движений и т. п. У абразивного инструмента в силу конструктивных особенностей нет единой режущей кромки.

При некоторых видах шлифования (плоское, бесцентровое и др.) хотя и происходит отделение припуска со значительными силами резания, но эти силы не оказывают существенного влияния (при оптимальных режимах обработки) на параметры качества обработанной поверхности. При круглом наружном шлифовании знание сил резания (а точнее составляющих этих сил) имеет большое значение, так как они в значительной мере оказывают влияние на качественные, точностные и стойкостные показатели шлифования.

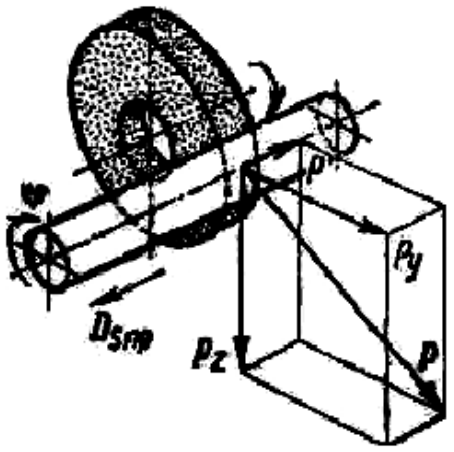



Рис. 7.8. Схемы составляющих силы резания при наружном круглом шлифовании в центрах

На рис. 7.8 приведена схема наружного круглого шлифования в центрах. Из рисунка следует, что сила резания относительно заготовки расположена в процессе шлифования под определенным углом.

Наибольшее влияние на качественные показатели обрабатываемой заготовки при круглом наружном шлифовании оказывает нормальная составляющая силы резания $P_y$ – сила, препятствующая внедрению шлифовального круга (совокупности абразивных зерен) в заготовку и направленная перпендикулярно к режущей поверхности круга. Эту силу называют радиальной, если режущая поверхность цилиндрическая. Из рис. 7.8 также следует, что кроме нормальной составляющей силы резания на заготовку еще действует касательная составляющая силы резания $P_z$ (обычно $P_z$ в 1,5 – 2,5 раза меньше $P_y$) и осевая составляющая силы резания $P_x$ = 0,5÷10 Н. В отдельных случаях силой резания можно активно управлять путем выбора оптимальных режимов резания, режимов правки, правящих инструментов, обильной подачи СОТС.

## 7.5. Конструкции абразивных инструментов

Абразивные инструменты имеют свои конструктивные особенности. Шлифовальные круги, бруски, сегменты, головки применяют для различных операций шлифования, хонингования, полирования и т. п. (рис. 7.9).

*Абразивные материалы.* Рабочими элементами любого абразивного инструмента являются классифицированные частицы абразивного материала, твердость которых выше твердости обрабатываемого материала. В качестве абразивного материала широко используются электрокорунды, карбид кремния, алмаз, кубический нитрид бора (эльбор). Алмазно-абразивной обработке подвергают самые различные поверхности и материалы. Наиболее широкое применение в машиностроении находят круги из электрокорунда и карбида кремния по ГОСТ 2424–83, алмазные круги по ГОСТ 1616–80, 16172–80Е и др., а также эльборовые круги по ГОСТ 17123–79Е.

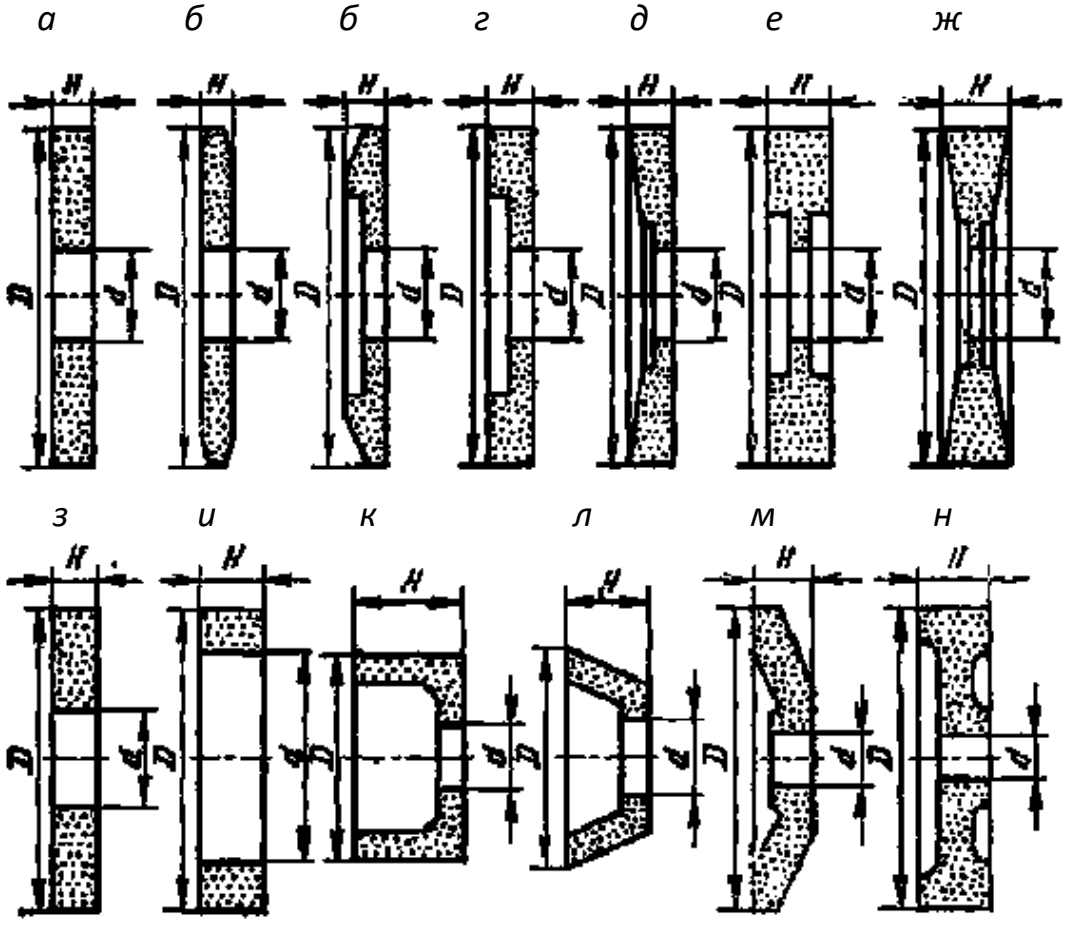



Рис. 7.9. Форма сечений шлифовальных кругов по ГОСТ 2424 – 75:
*а* – с прямым профилем (ПП); *б* – с двусторонним коническим профилем (2П); *в* – с коническим профилем (ЗП); *г* – с выточкой (ПВ); *д* – с конической выточкой (ПВК); *е* – с двусторонней выточкой (ПВД); *ж* – с двусторонней конической выточкой (ПВДК); *з* – специальный (ПН); *и* – кольцевой (К); *к* – чашечный

цилиндрический (ЧЦ); *л* – чашечный конический (ЧК); *м* – тарельчатый (Т); *н* – с двусторонней выточкой и ступицей (ПВДС)

Электрокорунды (кристаллическая окись алюминия $A1_2O_3$) получают из естественных бокситов с незначительными примесями некоторых материалов. По мере возрастания номера индекса растет процентное содержание окиси алюминия и увеличивается режущая способность. Легируя глинозем в процессе плавки титаном, цирконием, хромом, получают абразивные материалы с требуемыми свойствами.

Карбид кремния (карборунд) содержит 97 – 99 % SiC и незначительные примеси др. элементов. Выпускают две разновидности карбида кремния: черный (53С, 54С) и зеленый (62С, 63С, 64С). Зеленый карбид кремния более хрупок, чем черный, и применяется для обработки чугуна, твердых сплавов цветных металлов, камня. Черный карбид кремния более прочен и применяется в аналогичных случаях, но более тяжелых условиях обработки.

В 1957 г. был синтезирован новый абразивный материал – кубический нитрид бора. Кубический нитрид бора можно встретить под названиями: борозон, композит гексанит, эльбор, кубонит, КНБ. По своим прочностным характеристикам и режущей способности эльбор близок к алмазу. Его условное обозначение Л. Плотность эльбора (3,48 г/см$^3$) немного уступает плотности алмаза (3,5 г/см$^3$).

Для обработки легированных труднообрабатываемых жаропрочных сталей и сплавов применяют шлифовальные круги, бруски, шкурки, лезвийный инструмент из эльбора.

***Зернистость инструмента.*** Зернистость инструмента характеризует размер зерен основной группы. Требования к зерновому составу шлифовальных материалов приведены в ГОСТ 3647–80 (с 2009 г. принят Стандарт FEPA 42Д), алмазных порошков – в ГОСТ 9206–80Е, эльбора в зерне – ОСТ 2-МТ79-2-75.

***Твердость абразивных инструментов*** является важной характеристикой абразивного инструмента. *Под твердостью абразивного круга понимают свойство связки удерживать зерна под действием внешних сил.*

Чем выше степень твердости, тем прочнее связь между абразивными зернами в инструменте. И чем выше твердость, тем больше связки и меньше пор. Таким образом, абразивные инструменты из

одного и того же материала, с одной и той же связкой могут иметь различную твердость.

Поэтому из зерен самого твердого абразивного материала можно изготовить мягкие абразивные инструменты и, наоборот, из абразивного материала малой твердости можно изготовить твердые абразивные инструменты.

***Мягкими абразивными инструментами*** (в отличие от твердых) *называют такие, из которых абразивные зерна легко выкрашиваются.*

***Структура шлифовального круга.*** *Процентное соотношение трех основных фазовых составляющих* (зерен, связки и пор) *в объеме абразивного инструмента называют* ***структурой.*** Структуры абразивных инструментов обозначают номерами от 0 до 20.

Абразивные инструменты плотной структуры применяются для снятия очень небольшого припуска (малое число пор). Инструменты с плотными (0 –3) структурами используют для доводки, прецизионного шлифования.

Основные операции предварительного и окончательного шлифования производят инструментами средних (5, 6, 7, 8) структур. С повышением номера структуры расстояние между зернами увеличивается, лучше отводится стружка, СОТС легче проникает в зону резания, можно работать с несколько повышенными режимами резания. Но инструменты с более открытой структурой обладают меньшей прочностью и быстрее теряют форму профиля. Все чаще и чаще, особенно для врезного шлифования заготовок ответственных деталей, применяют высокопористые круги.

***Связка инструментов.*** Абразивные зерна в теле инструмента должны быть связаны между собой, если этот инструмент представляет собой круг, брусок, сегмент и т. п. Связующий материал или совокупность нескольких связующих, удерживающих абразивные зерна в теле инструмента, называют связкой.

***Изнашивание и стойкость кругов.*** Шлифование, как и любой процесс механической обработки, сопровождается интенсивным изнашиванием шлифовального круга. Изнашивание проявляется не только в затуплении режущих кромок, но и в выкрашивании зерен,

заполнении пор продуктами шлифования («засаливание») и в износе наиболее нагруженных частей режущей поверхности круга.

## 7.6. Технологические методы отделочной (финишной) обработки поверхностей деталей машин

Дальнейшее развитие машиностроения связано с увеличением нагрузок на детали машин, увеличением скоростей движения, уменьшением массы конструкции.

Выполнить эти требования можно при достижении особых качеств поверхностных слоев деталей.

*Влияние качества поверхностных слоев на эксплуатационные свойства огромно,* ***изменяются:***

- износостойкость;
- коррозионная стойкость;
- контактная жесткость;
- прочность соединений и др. свойства.

С этой целью широко применяются отделочные методы обработки, для которых характерны малые силы резания, незначительное тепловыделение, малая толщина срезаемого слоя.

***Хонингование***

*Хонингование применяют для получения поверхностей высокой точности и малой шероховатости*, а также для создания специфического микропрофиля обработанной поверхности в виде сетки (для удержания смазочного материала на поверхности деталей).

Поверхность неподвижной заготовки обрабатывается мелкозернистыми абразивными брусками, закрепленными в хонинговальной головке (хоне). Бруски вращаются и одновременно перемещаются возвратно-поступательно вдоль оси обрабатываемого отверстия (рис. 7.10, *а*). Соотношение скоростей движений составляет 1,5÷10, и определяет условия резания.

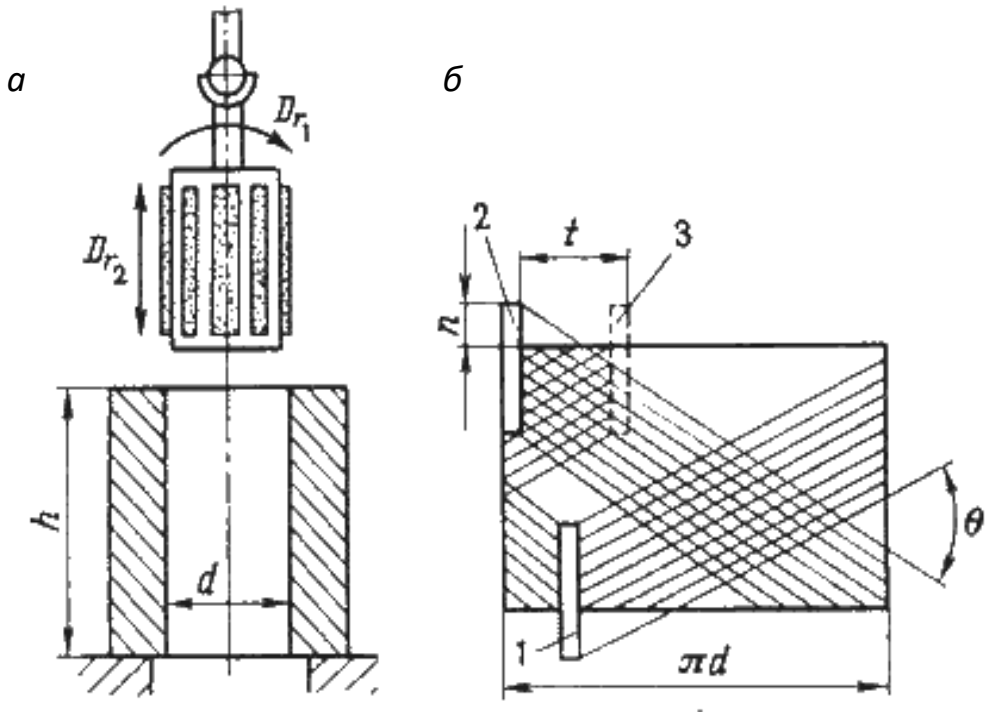



Рис. 7.10. Процесс хонингования:
*а* – схема хонингования; *б* – схема образования микропрофиля поверхности после хонингования

При сочетании движений на обрабатываемой поверхности появляется сетка микроскопических винтовых царапин – следов перемещения абразивных зерен. Угол пересечения этих следов зависит от соотношения скоростей (рис. 7.10, *б*).

Абразивные бруски всегда контактируют с обрабатываемой поверхностью, так как могут раздвигаться в радиальном направлении. Давление бруска контролируется.

Хонингованием исправляют погрешности формы от предыдущей обработки, а чистовое – для повышения качества поверхности.

Этот процесс осуществляется на специальных хонинговальных установках.

***Суперфиниширование***

*Суперфиниширование уменьшает шероховатость поверхности, оставшуюся от предыдущей обработки*. Получают очень гладкую поверхность, сетчатый рельеф, благоприятные условия для взаимодействия поверхностей.

Поверхности обрабатывают абразивными брусками, установленными в специальной головке. Для суперфиниширования харак-

терно колебательное движение брусков наряду с движением заготовки (рис. 7.11).

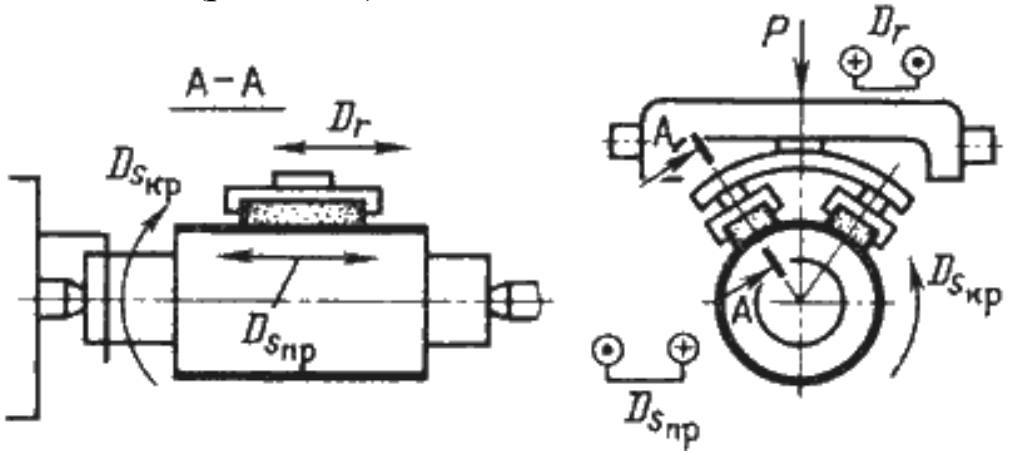



Рис. 7.11. Схема суперфиниширования

Процесс резания происходит при давлении брусков $(0,5 \div 3)10^5$ Па в присутствии смазочного материала малой вязкости. Амплитуда колебаний 1,5÷6 мм. Частота колебаний 400÷1200 мин $^{-1}$. Бруски подпружинены и самоустанавливаются по обрабатываемой поверхности. Соотношение скоростей $D_{Sкр}$ к $D_г$ в начале обработки составляет 2÷4, а в конце – 8÷16.

***Полирование***

*Полированием уменьшают шероховатость поверхности.*

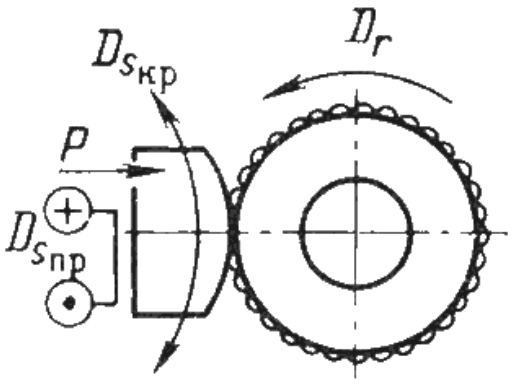
Этим способом получают зеркальный блеск на ответственных частях деталей (дорожки качения подшипников) либо на декоративных элементах (облицовочные части автомобилей). Используют полировальные пасты или абразивные зерна, смешанные со смазочным материалом. Эти материалы наносят на быстровращающиеся эластичные круги (фетровые) или на колеблющиеся щетки.

Хорошие результаты дает полирование быстродвижущимися абразивными лентами (шкурками).

При этом одновременно протекают следующие процессы:

- тонкое резание;
- пластическое деформирование поверхностного слоя;
- химические реакции (воздействие на металл химически активных веществ).

Схема полирования представлена на рис. 7.12.



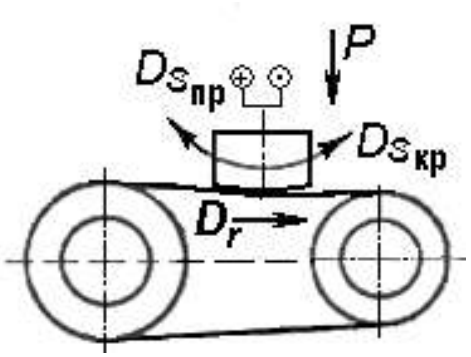



Рис. 7.12. Схема полирования

Рис. 7.13. Полирование бесконечной лентой

ля

процесса характерны высокие скорости, до 50 м/с. Заготовка поджимается к кругу силой Р и совершает движения подачи $D_{Sкр}$ и $D_{Sпр}$ в соответствии с профилем обрабатываемой поверхности.

Полирование не только уменьшает шероховатость, но и придает зеркальный блеск, что нужно для снижения трения и декоративного вида. Для полирования применяют полировальные пасты – абразивные зёрна со смазочным веществом. Инструментом являются круги из войлока, фетра, кожи; щётки, бесконечные абразивные ленты (рис. 7.13).

Надо отметить, что полирование не исправляет погрешности формы, так как используется гибкий инструмент.

***Абразивно-жидкостная отделка***

*Данный вид обработки применяется для отделки объемно-криво-линейных, фасонных поверхностей.*

На обрабатываемую поверхность, имеющую следы предшествующей обработки, подают струи антикоррозионной жидкости со взвешенными частицами абразивного порошка.

Водно-абразивная суспензия перемещается под давлением с большой скоростью. Частицы абразива ударяются о поверхность заготовки и сглаживают микронеровности.

Интенсивность съема материала регулируется зернистостью порошка, давлением струи и углом, под которым подают жидкость.

Жидкостная пленка играет важную роль в данном процессе. Зерна, попадающие на выступы, легко преодолевают ее, а зерна, попадающие во впадины, – встречают сопротивление, съем материала затрудняется, шероховатость сглаживается.

Метод жидкостного полирования успешно применяется при обработке фасонных внутренних поверхностей. Сопло вводится в полость заготовки, которая совершает вращательное и поступательное перемещения в зависимости от профиля обрабатываемой поверхности.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В чем заключается особенность шлифования?
2. Расскажите об основных методах шлифования различных поверхностей.
3. Какие абразивные материалы применяют для изготовления шлифовальных кругов?
4. Какие связующие материалы применяют для изготовления шлифовальных кругов?
5. Расскажите о конструктивных особенностях круглошлифовального станка.
6. Каковы конструктивные особенности внутришлифовального станка?
7. Расскажите о конструктивных особенностях бесцентрово-шлифовальных станков.
8. Перечислите виды отделочной обработки и дайте им краткую характеристику.
9. Назовите область применения отделочной обработки различных видов.

## 8. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Расширенное внедрение труднообрабатываемых материалов для производства деталей машин, усложнение конструкций этих деталей в купе с возрастающими требованиями к понижению себестоимости и повышению производительности послужило предпосылкой разработки и освоения способов электрофизической обработки.

*Электрофизические способы обработки металлов основаны на использовании специфичных явлений*, возникающих под действием

электронного тока, для удаления материала либо конфигурации формы заготовки.

***Главным преимуществом электрофизических способов обработки*** металлов является **возможность их использования для конфигурации формы заготовок из материалов, не поддающихся обработке резанием,** причём обработка этими способами происходит в критериях воздействия малых сил либо при полном их отсутствии.

Принципиальным преимуществом электрофизических способов обработки металлов является независимость производительности большинства из их от твёрдости и хрупкости обрабатываемого материала. Трудоёмкость и продолжительность этих способов обработки материалов завышенной твёрдости (НВ > 400) меньше, чем трудоёмкость и продолжительность обработки резанием.

Электрофизические способы обработки металлов обхватывают фактически все операции механической обработки и не уступают большинству из них по достигаемой шероховатости и точности обработки.

Э. и э. м. о. весьма разнообразны и условно их можно разделить на электрофизические (электроэрозионные, электромеханические, лучевые), электрохимические и комбинированные (рис. 8.1).

***Электроэрозионные методы обработки***

Эти методы основаны на явлении эрозии электродов из токопроводящих материалов при пропускании между ними импульсного электрического тока.

Разряд между электродами происходит в газовой среде или при заполнении межэлектродного пространства диэлектрической жидкостью – керосином, минеральным маслом.

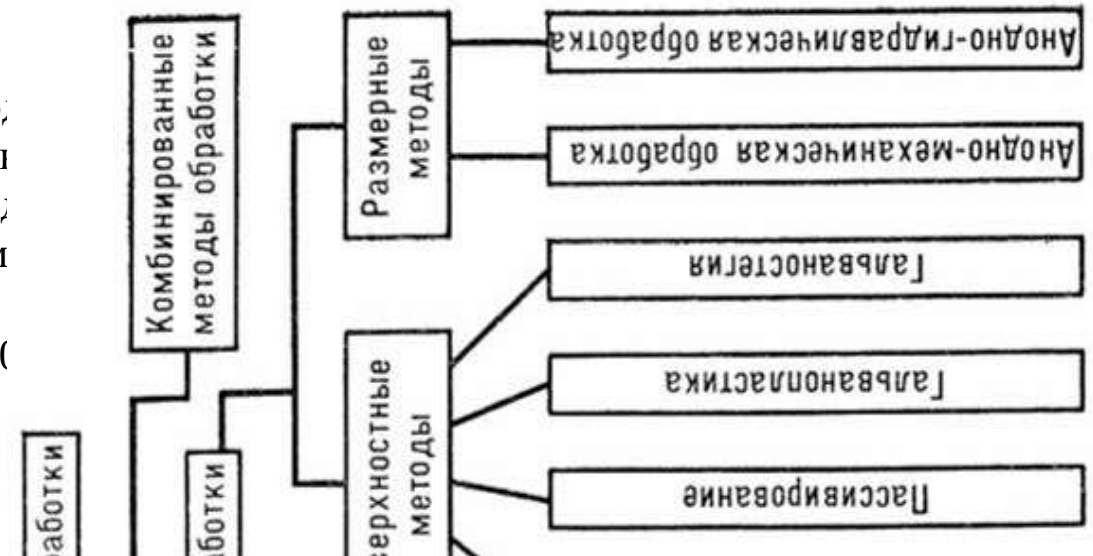



Рис. 8.1. Классификация основных электрофизических и электрохимических методов обработки

элементарного объема металла, и на обрабатываемой поверхности образуется лунка.

Удаленный металл застывает в диэлектрической жидкости в виде гранул диаметром 0,01÷0,005 мм.

При непрерывном подведении к электродам импульсного тока процесс эрозии продолжается до тех пор, пока не будет удален весь металл, находящийся между электродами на расстоянии, при котором возможен электрический пробой (0,01÷0,05 мм) при заданном напряжении.

Для продолжения процесса необходимо сблизить электроды до указанного расстояния. Электроды сближаются автоматически с помощью следящих систем.

***Электроискровая обработка***

Схема электроискровой обработки представлена на рис. 8.2. *При электроискровой обработке используют импульсные искровые разряды между электродами* (обрабатываемая заготовка (анод) – инструмент (катод)).

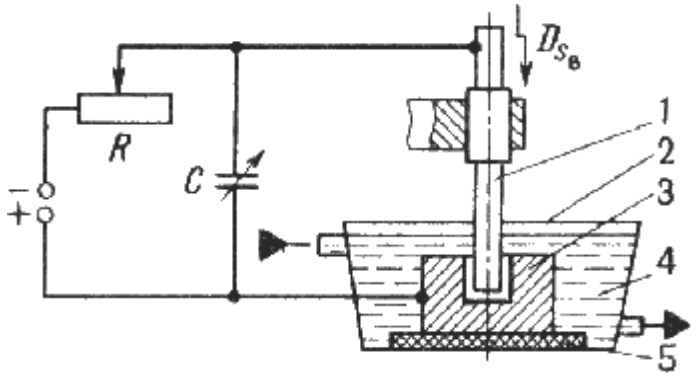



Рис. 8.2. Схема электроискрового станка:
*1* – электрод-инструмент; *2* – ванна; *3* – заготовка-электрод;
*4* – диэлектрическая жидкость; *5* – изолятор

Конденсатор заряжается через резистор от источника постоянного тока напряжением 100÷200 В. Когда напряжение на электродах *1* и *3* достигает пробойного, образуется канал, через который осуществляется искровой разряд энергии, накопленной конденсатором.

Продолжительность импульса 20÷200 мкс.

Точность обработки до 0,002 мм, 0,63÷0,16 мкм.

Для обеспечения непрерывности процесса (зазор = const) станки снабжаются следящей системой и системой автоматической подачи инструмента.

Получают сквозные отверстия любой формы поперечного сечения, глухие отверстия и полости, отверстия с криволинейными осями, вырезают заготовки из листа, выполняют плоское, круглое и внутреннее шлифование.

Изготовляют штампы и пресс-формы, фильеры, режущий инструмент.

Схемы электроискровой обработки представлены на рис. 8.3.

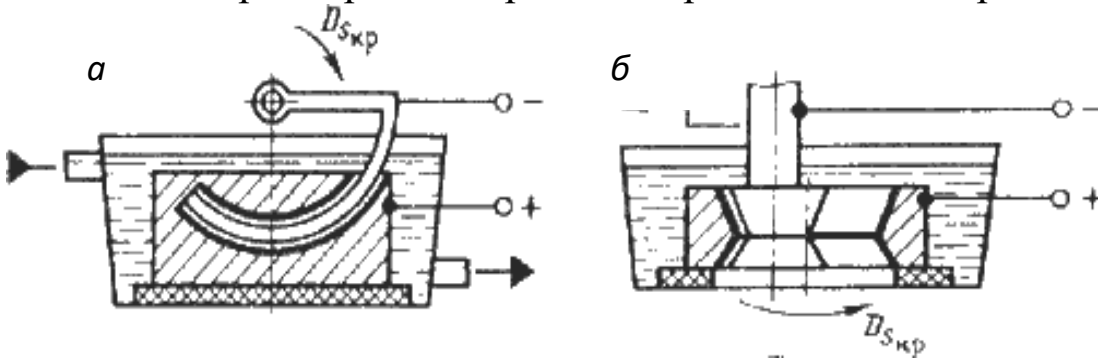



Рис. 8.3. Схемы электроискровой обработки:
*а* – прошивание отверстия с криволинейной осью;
*б* – шлифование внутренней поверхности фильеры

Электроискровую обработку применяют для упрочнения поверхностного слоя металла. На поверхность изделия наносят тонкий слой металла или композиционного материала. Подобные покрытия повышают твердость, износостойкость, жаростойкость, эрозионную стойкость и так далее.

***Электроимпульсная обработка***

*При электроимпульсной* обработке используют электрические импульсы большой длительности (5÷10 мс), *в результате чего происходит дуговой разряд.*

Большие мощности импульсов от электронных генераторов обеспечивают высокую производительность обработки.

Электроимпульсную обработку целесообразно применять при предварительной обработке штампов, турбинных лопаток, фасонных отверстий в детали из коррозионностойких и жаропрочных сплавов.

Схема обработки показана на рис. 8.4.

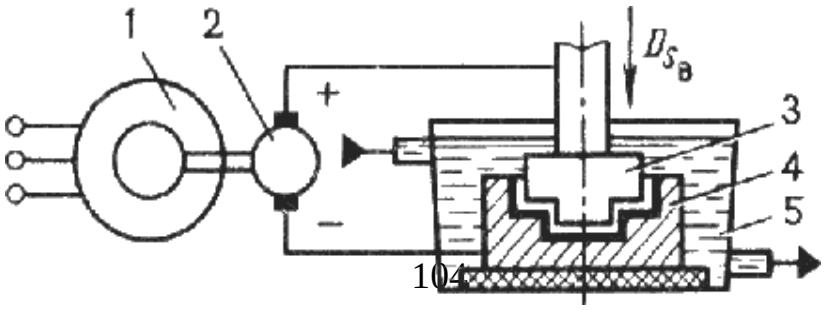


Рис. 8.4. Схема электроимпульсной обработки:
*1* – электродвигатель; *2* – импульсный генератор постоянного тока;
*3* – инструмент-электрод; *4* – заготовка-электрод; *5* – ванна

***Электроконтактная обработка***

*Электроконтактная обработка основана на локальном нагреве заготовки в месте контакта с электродом-инструментом и удалении размягченного или расплавленного металла из зоны обработки механическим способом:* относительным движением заготовки или инструмента.

Источником теплоты служат импульсные дуговые разряды.

Этот вид обработки рекомендуется для крупных деталей из углеродистых и легированных сталей, чугуна, цветных сплавов, тугоплавких и специальных сплавов (рис. 8.5.).

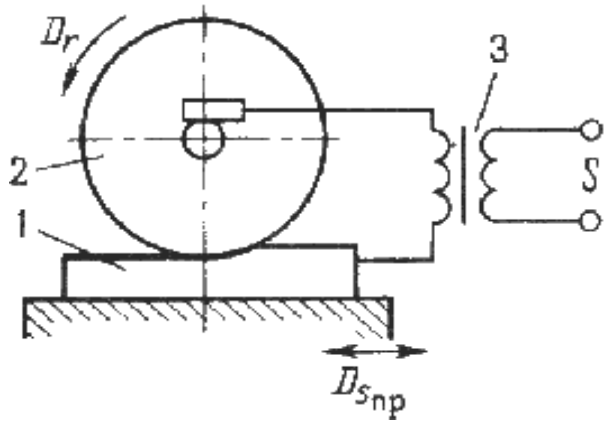



Рис. 8.5. Схема электроконтактной обработки плоской поверхности:
*1* – обрабатываемая заготовка; *2* – инструмент-электрод; *3* – трансформатор

Этот метод применяют для зачистки отливок от заливов, отрезки литниковых систем, зачистки проката, шлифования коррозионных деталей из труднообрабатываемых сплавов.

***Электрохимическая обработка***

*Электрохимическая обработка основана на законах анодного растворения металлов при электролизе.*

При прохождении электрического тока через электролит на поверхности заготовки происходят химические реакции, и поверхностный слой металла превращается в химическое соединение.

Продукты электролиза переходят в раствор или удаляются механическим способом.

Производительность этого способа зависит от электрохимических свойств электролита, обрабатываемого материала и плотности тока.

***Электрохимическое полирование*** (рис. 8.6).

Электрохимическое полирование осуществляется в ванне, заполненной электролитом (растворы кислот и щелочей).

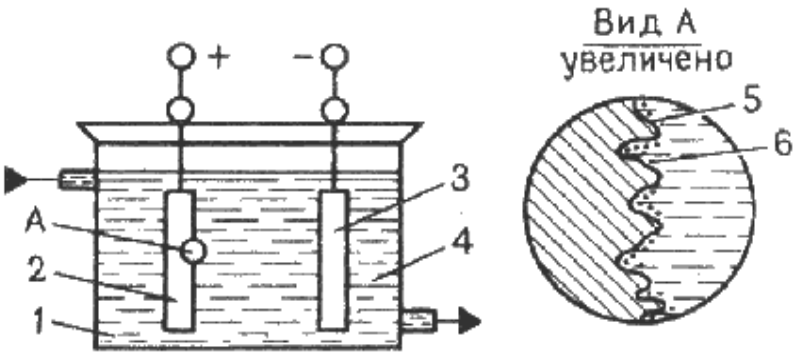



Рис. 8.6. Схема электрохимического полирования:
*1* – ванна; *2* – обрабатываемая заготовка; *3* – пластина-электрод;
*4* – электролит; *5* – микровыступ; *6* – продукты анодного растворения

Обрабатываемую заготовку подключают к катоду. Катодом служит металлическая пластинка из свинца, меди, стали (иногда электролит подогревают).

При подаче напряжения начинается процесс растворения металла заготовки (в основном на выступах микронеровностей). В результате избирательного растворения, микронеровности сглаживаются, и обрабатываемая поверхность приобретает металлический блеск.

Улучшаются электрофизические характеристики деталей: уменьшается глубина микротрещин, поверхностный слой не деформируется, исключаются упрочнения и термические изменения структуры, повышается коррозионная стойкость.

Этим методом получают поверхности под гальванические покрытия, доводят рабочие поверхности режущего инструмента, изготовляют тонкие ленты и фольгу, очищают и декоративно отделывают детали.

***Электрохимическая размерная обработка***

*Электрохимическая размерная обработка* (рис. 8.7) *выполняется в струе электролита, прокачиваемого под давлением через межэлектродный промежуток.*

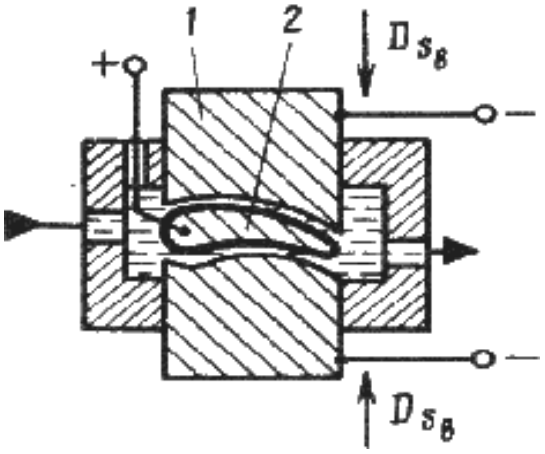



Рис. 8.7. Схема электрохимической размерной обработки:
*1* – инструмент-катод; *2* – заготовка-анод

Электролит растворяет образующиеся на поверхности заготовки- анода соли и удаляет их из зоны обработки. Высокая производительность процесса заключается в том, что одновременно обрабатывается вся поверхность заготовки.

Участки, не требующие обработки, изолируют. Инструменту придают форму, обратную форме обрабатываемой поверхности. Формообразование происходит по методу копирования.

Точность обработки повышается при уменьшении рабочего зазора. Для его контроля используют высокочувствительные элементы, которые встраивают в следящую систему.

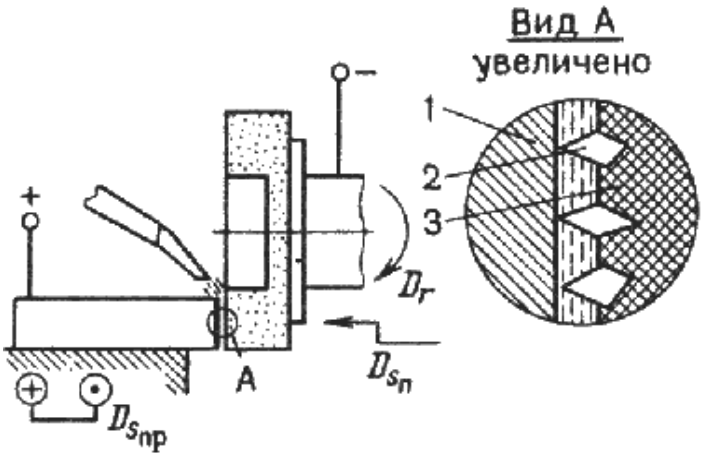
Этот способ рекомендуют для обработки заготовок из высокопрочных сталей, карбидных и труднообрабатываемых материалов. Также можно обрабатывать тонкостенные детали с высокой точностью и качеством обработанной поверхности (отсутствует давление инструмента на заготовку).

***Комбинированные методы обработки***

*Электроабразивная и электроалмазная обработка.* При таких видах обработки инструментом служит шлифовальный круг из абразивного материала на электропроводящей связке (бакелитовая связка с графитовым наполнителем). Между анодом-заготовкой и катодом-шлифовальным кругом имеется зазор, куда подается электролит. Продукты анодного растворения удаляются абразивными зернами; шлифовальный круг имеет вращательное движение, а заготовка –

движение подачи, которые соответствуют процессу механического шлифования (рис. 8.8).

Рис. 8.8. Схема электроабразивного шлифования:




*1* – заготовка; *2* – абразивные зерна; *3* – связка шлифовального круга

Введение в зону резания ультразвуковых колебаний повышает производительность в 2÷2,5 раза при улучшении качества поверхности. Эти методы применяются для отделочной обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов, а также нежестких заготовок, так как силы резания незначительны.

***Анодно-механическая обработка***

*Анодно-механическая обработка основана на сочетании электротермических и электромеханических процессов* и занимает промежуточное место между электроэрозионным и электрохимическим методами.

Заготовку подключают к аноду, а инструмент – к катоду. В качестве инструмента используют металлические диски, цилиндры, ленты, проволоку.

Обработку ведут в среде электролита (водный раствор жидкого натриевого стекла).

Рабочие движения – как при механической обработке резанием.

Электролит в зону обработки подают через сопло (рис. 8.9).

При пропускании через раствор электролита постоянного электрического тока происходит процесс анодного растворения, как при электрохимической обработке.

При соприкосновении инструмента с микронеровностями заготовки происходит электроэрозия, присущая электроискровой обработке. Металл заготовки в месте контакта с инструментом разогревается и разжижается. Продукты электроэрозии и анодного растворения удаляются при относительных движениях инструмента и заготовки.

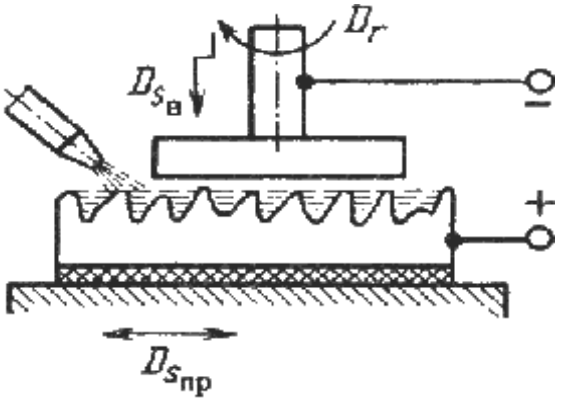



Рис. 8.9. Схема анодно-механической обработки плоской поверхности

Этим способом обрабатывают заготовки из высокопрочных и труднообрабатываемых сплавов, вязких материалов.

Этим способом разрезают заготовки на части, прорезают пазы и щели, обрабатывают поверхности тел вращения, шлифуют плоские поверхности и поверхности, имеющие форму тел вращения, полируют поверхности, затачивают режущий инструмент.

***Лучевые методы обработки***

*Электроннолучевая обработка – основана на превращении кинетической энергии направленного пучка электронов в тепловую энергию.* Высокая плотность энергии сфокусированного электронного луча позволяет обрабатывать заготовку за счет нагрева, расплавления и испарения материала с локального участка.

Схема электроннолучевой обработки представлена на рис. 8.10.

Электронный луч образуется за счет эмиссии электронов с нагретого в вакууме катода. Он с помощью электростатических и электромагнитных линз фокусируется на заготовке.

При размерной обработке установка работает в импульсном режиме, что обеспечивает локальный нагрев заготовки.

Электроннолучевой метод эффективен при обработке отверстий диаметром 1÷0,010 мм, при прорезании пазов, резке заготовок, изготовлении тонких пленок и сеток из фольги, изготовлении заготовок

из труднообрабатываемых металлов и сплавов, керамики, кварца, полупроводникового материала.

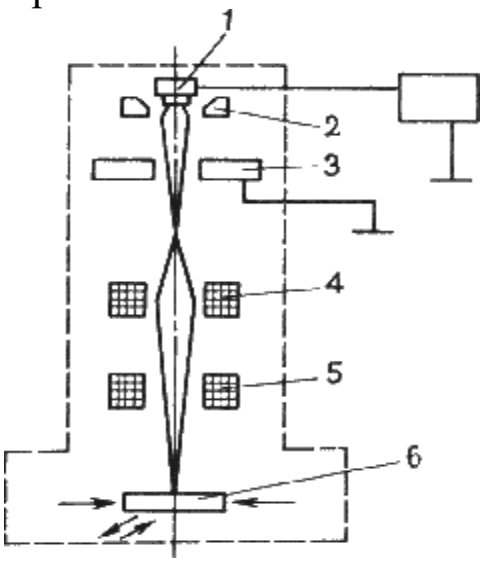



Рис. 8.10. Схема установки для электроннолучевой сварки:
*1* – катод электронной пушки; *2* – электрод; *3* – анод;
*4* и *5* – отклоняющая магнитная система; *6* – заготовка

*Лазерная обработка* основана *на тепловом воздействии светового луча высокой энергии на поверхность заготовки*. Источником светового излучения служит лазер – оптический квантовый генератор.

Энергия светового луча не велика 20÷100 Дж, но она выделяется в миллионные доли секунды и сосредотачивается в луче диаметром 0,01 мм. Поэтому температура в зоне контакта 6000÷8000 ºС.

Слой металла мгновенно расплавляется и испаряется. С помощью этого метода осуществляется прошивание отверстий, разрезание заготовки, прорезание пазов в заготовках из любых материалов (фольга из тантала, вольфрама, молибдена). Также с помощью этого метода можно осуществить контурную обработку по сложному периметру.

***Плазменная обработка***

*Сущность обработки заключается в том, что плазму направляют на обрабатываемую поверхность.*

Плазменная струя представляет собой направленный поток частично или полностью ионизированного газа, имеющего температуру 10000÷20000 ºС. Плазму получают в плазменных горелках, пропуская

газ через столб сжатой дуги. В качестве плазмообразующих газов используют азот, аргон, водород, гелий, воздух и их смеси.

С помощью этого метода прошиваются отверстия, вырезаются заготовки из листового материала, производится точение в заготовках из любых материалов.

При прошивании отверстий и разрезке головку устанавливают перпендикулярно к поверхности заготовки, при строгании и точении под углом 40÷60º.

***Плазменное напыление***

*Этот вид обработки осуществляется с целью получения заданных размеров.*

В камеру плазматрона подается порошкообразный конструкционный материал и инертный газ под давлением.

Под действием дугового разряда конструкционный материал плавится и переходит в состояние плазмы; струя плазмы сжимается в плазматроне газом. Выходя из сопла, струя направляется на обрабатываемую заготовку.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Чем вызвано появление и развитие методов ЭФХО?
2. Каким группам методов ЭФХО соответствует действие наименьших обрабатывающих усилий?
3. Влияет ли уровень диэлектрической проницаемости жидкости на производительность ЭЭО?
4. Чем отличаются электроискровые режимы ЭЭО от электроимпульсных?
5. В чем отличия ЭКО от ЗЭО?
6. Почему ЭЛО проводится в вакуумной камере?
7. Возможна ли светолучевая обработка диэлектрических материалов?
8. На каких физических явлениях основана УЗО?
9. Почему при ЭХО возрастает интенсивность растворения выступов микронеровностей?
10. Как влияет уровень электрических параметров ЭХО на ширину межэлектродного зазора?
11. Какие разновидности электрохимической обработки вы знаете?
12. Какие методы ЭФХО оказывают на экологию наиболее вредное воздействие?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Технология конструкционных материалов.* Компактный учебный курс: учеб. пособие для машиностр. образовательных учреждений / В. П. Глухов, В. Л. Тимофеев, В. Б. Фёдоров А. А. Чумичкин; под общ. ред. В. Л. Тимофеева. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2008. 258 с.

2. *Сафонов Б. П., Брагин Л. П., Марценко К. Н.* Сборник задач по материаловедению и технологии конструкционных материалов. НИРХТУ, Новомосковск, 2003. 78 с.

3. *Технология конструкционных материалов* / А. М. Дальский [и др.]. М.: Машиностроение, 2004. 512 с.

4. *Технология металлорежущих материалов* / А. М. Дальский [и др.]. М., Машиностроение, 2008. 664 с.

5. *Петруха П. Г.* Резание конструкционных материалов, режущие инструменты и станки. М., Машиностроение, 2007. 614 с.

6. *Обработка металлов резанием.* Справочник технолога / А. П. Панов [и др.]. М., Машиностроение, 2009. 736 с.

7. *Марочник сталей и сплавов* / В. Г. Сорокин, А. А. Гервасьев М. А. М., Интернет-инжиниринг, 2001. 608 с.

8. *Справочник сварщика /* под ред. В. В. Степанова. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1975. 520 с.

9. *Технология конструкционных материалов. Основы обработки металлов резанием /* В. Ф. Карпенко, Л. Г. Баграмов В. В. Стрельцов, А. В. Карпенкова. М.: Компания Спутник+, 2002. 396 с.

10. *Вишницкий А. Л., Ясногородский И. З., Григорчук И. П.* Электрохимическая и электромеханическая обработка металлов, Л., 1971. 212 с.

14. *Глинникова Т. П., Волегов С. А.* Технология конструкционных материалов: лаб. практикум по темам «Металлургия», «Литье», «Обработка металлов давлением». Екатеринбург, Изд-во УГГУ, 2016.68 с.

15. *Глинникова Т. П., Волегов С. А.* Технология конструкционных материалов: лаб. практикум по теме «ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ». Екатеринбург, Изд-во УГГУ, 2015. 65 с.

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

1. КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ…… 3
1.1. Общие понятия и определения……. 3
1.2. Элементы режима резания…… 4
1.3. Геометрические параметры режущего клина……. 6
1.4. Материалы для изготовления режущих инструментов. Требования, предъявляемые к инструментальным материалам……... 9
1.5. Физические основы резания…… 13
*ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ*……... 26
2. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ……... 28
*ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ*……... 30
3. ОБРАБОТКА НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ…… 32
3.1. Типы токарных резцов и их назначение…… 32
3.2. Станки токарной группы…….. 34
*ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ*…….. 42
4. ОБРАБОТКА НА СВЕРЛИЛЬНЫХ СТАНКАХ…… 43
4.1. Характеристика методов обработки осевым инструментом…… 44
4.2. Конструктивные особенности инструментов основных типов… 45
4.3. Режим резания при сверлении…… 49
4.4. Силы резания при сверлении…….. 51
4.5. Станки для обработки отверстий……... 53
*ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ*…….. 54
5. ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК НА СТАНКАХ ФРЕЗЕРНОЙ ГРУППЫ 55
5.1. Фреза и ее элементы…… 57
5.2. Основные типы фрез…… 58
5.3. Режим резания при фрезеровании……. 62
5.4. Силы резания при фрезеровании……. 63
5.5. Фрезерные станки…… 65
*ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ*…….. 65
6. ОБРАБОТКА СТРОГАНИЕМ ДОЛБЛЕНИЕМ И ПРОТЯГИВАНИЕМ…… 66
6.1. Строгальные и долбежные резцы. Элементы резания при строгании и долблении…… 68
6.2. Станки строгальной группы…… 70
*ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ*…….. 71
6.3. Обработка на протяжных станках…….. 71
6.3.1. Протягивание и схемы резания при протягивании внутренних наружных поверхностей…….. 72
6.3.2. Элементы режима резания при протягивании……. 76

6.3.3. Сила резания при протягивании…… 76
6.3.4.Типы протяжек, их конструктивные элементы и геометрические параметры……. 77
6.3.5. Протяжные станки. Основные параметры…… 79
Горизонтально-протяжные станки……. 80
Вертикально-протяжные станки……. 81
Протяжные станки непрерывной обработки……. 82
*ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ*…….. 82
7. ОБРАБОТКА НА ШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКАХ…….. 83
7.1. Особенности процесса шлифования. Абразивный инструмент 83
7.2. Схемы обработки при шлифовании…….. 84
7.3. Элементы режима резания при шлифовании…… 88
7.4. Силы резания при шлифовании…….. 89
7.5. Конструкции абразивных инструментов…….. 90
7.6. Технологические методы отделочной (финишной) обработки поверхностей деталей машин……... 93
*ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ*…….. 97
8. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА……..... 98
*ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ*…….. 108
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ……. 109




**Министерство образования и науки**
**Российской Федерации**
**ФГБОУ высшего образования**

**Глинникова Т. П., Волегов С. А.**

# Технология конструкционных материалов

## Лабораторный практикум по темам «Литье», «Обработка металлов давлением»

**для студентов направления бакалавриата: 15.03.01 «Машиностроение», 15.03.02 - «Технологические машины и оборудование» (ТМО) и среднего профессионального образования 15.02.01- «Монтаж и техническая эксплуатация промышленного оборудования (по отраслям)»**

***очного и заочного обучения***

**Екатеринбург**

**2018**

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

Глинникова Т. П., Волегов С. А.

# Технология конструкционных материалов

Лабораторный практикум по темам
«Металлургия», «Литье»,
«Обработка металлов давлением»
для студентов направления бакалавриата:
15.03.01 (150700)- «Машиностроение»,
15.03.02 (151000) - «Технологические машины и оборудование» (ТМО) и среднего профессионального образования
(15.02.01) 151031 - «Монтаж и техническая эксплуатация промышленного оборудования (по отраслям)» *очного и заочного обучения*

Издание УГГУ Екатеринбург, 2018
Г 54
Рецензент: *А. П. Комиссаров*, д-р техн. наук, профессор кафедры ГМК Уральского государственного горного университета

Руководство рассмотрено на заседании кафедры эксплуатации горного оборудования 05 декабря 2018 г. (протокол № 4) и рекомендовано для издания в УГГУ.

**Глинникова Т. П., Волегов С. А.**
**Г 54** Технология конструкционных материалов: Лабораторный практикум по темам «Литье», «Обработка металлов давлением» для студентов направления бакал*авр*иата: 15.03.01 – «Машиностроение», 15.03.02 – «Технологические машины и оборудование» (ТМО) и среднего профессионального образования 15.02.01 - «Монтаж техническая эксплуатация промышленного оборудования (по отраслям)» очного и заочного обучения / Т. П. Глинникова, С. А. Волегов. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2018. 60 с.

Руководство составлено для проведения лабораторных работ по дисциплине "Технология конструкционных материалов" В руководстве изложены краткие сведения о способах получения чугуна и стали, методах обработки металлов давлением, видах литья, технологии изготовления литейной формы и литейной оснастки.

© Глинникова Т. П., Волегов С. А.,
© Уральский государственный
горный университет, 2018

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.
# ПЛАВКА ЧУГУНА В ВАГРАНКЕ

## Цель работы

1. Изучить принцип работы ваграночной печи
2. Изучить технологический процесс получения чугуна в ваграночных печах (в вагранках)
3. Изучить конструкцию и устройство вагранки.

## Краткие сведения о плавке чугуна в вагранке

Несмотря на создание в настоящее время ряда новых плавильных агрегатов, основное количество чугуна для отливок выплавляется в вагранках.

**Устройство вагранки**. Вагранка, рис. 1.1, представляет собой шахтную печь, диаметр которой колеблется в пределах от 700 до 2300 мм, а производительность 4 – 50 т/ч. По конструктивным особенностям вагранки делят на два типа: с копильником и без него. Первые применяют при производстве крупных отливок, когда необходимо накопить большое количество расплава, а вторые – при получении мелких и средних отливок с небольшой толщиной стенок, когда требуется расплав, обладающий более высокой жидкотекучестью.

Кожух вагранки *10* изготовляют из листовой стали в виде цилиндра, внутренняя поверхность которого выкладывается огнеупорным кирпичом *9*. Между кожухом и огнеупорным кирпичом оставляется зазор размером 20 – 50 мм, который засыпается кварцевым песком. Кожух вагранки устанавливается на массивную стальную подовую плиту *5*, имеющую посредине отверстие (равное внутреннему диаметру футеровки), которое закрывается дверцами *2*, снабженными запорным устройством. В свою очередь, подовая плита опирается на четыре колонны *4*, установленные на бетонный фундамент.

Дно *6* вагранки, называемое лещадью, набивается слоем формовочной смеси. В нижней части вагранки у лещади предусмотрено отверстие – летка *1* для выпуска чугунного расплава в копильник *13*, а затем через летку *19* и желоб *20* в разливочный ковш. Для выпуска шлака в копильнике предусмотрена шлаковая летка. Для введения

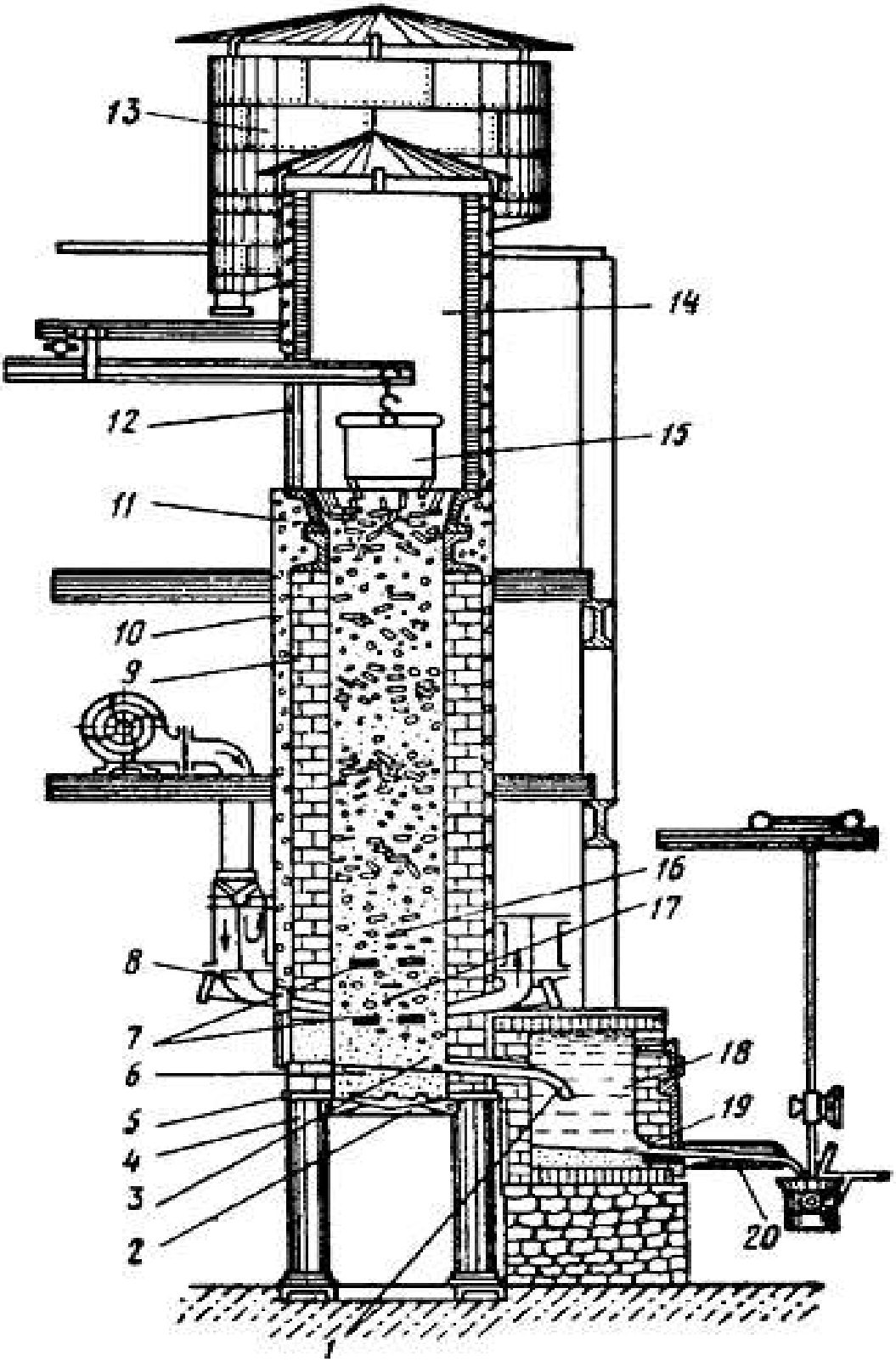



Рис.1.1. Схема устройства вагранки открытого типа с копильником:
*1* – летка, *2* – дверцы днища, *3* – горн, *4* – колонны, *5* – подовая плита, *6* – лещадь, *7* – окна, *8* – фурмы, *9* – кирпичная кладка, *10* – кожух, *11* – чугунные кирпичи, *12* – загрузочное окно, *13* – искроуловитель. *14* – шахта. *15* – бадья, *16* – металлическая шихта, *17* – коксовая колоша, *18* – копильник, *19* – летка для расплава, *20* – желоб

необходимого для горения топлива воздуха в шахте вагранки предусмотрены окна *7* и специальные трубы *8*, называемые фурмами; в них воздух поступает из фурменной коробки, соединенной с вентилятором. Чтобы обеспечить равномерность распределения воздуха, он вводится в плавильную зону двумя рядами фурм, располагаемых в шахматном порядке.

Завалка исходных материалов в вагранку производится с колошниковой площадки через загрузочное окно *12* бадьей *15*. Отходящие при плавке газы удаляются через верхнюю часть шахты *14*, после чего направляются в искроуловитель *13*. Для предохранения футеровки печи от ударов кусками загружаемой шихты верхнюю часть шахты вагранки выкладывают пустотелыми чугунными кирпичами *11*. По виду используемого при плавке топлива вагранки подразделяют на коксовые, коксогазовые и газовые. В связи с необходимостью защиты окружающей среды вагранки с открытыми искроуловителями (см. рис. 1.1) заменяют на вагранки закрытого типа (рис. 1.2).

**Материалы ваграночной плавки**

К ним относят огнеупоры, металлургическую шихту, флюсы и топливо.

**Огнеупоры** – обладающие высокой температурой плавления материалы и изделия, применяемые для оформления рабочего пространства (шахты) вагранки, благодаря которым обеспечивается процесс плавки в условиях высоких (свыше 1580°С) температур. В качестве огнеупоров для футеровки горна, плавильного пояса и фурменной зоны чаще всего применяют шамотный кирпич марок ШАВ и ШБВ, поставляемый литейным цехам по ГОСТ 3272-2002. Для заделки швов кирпичной кладки используют массу, состоящую из кварцевого песка (80 – 85%), огнеупорной глины (20 – 15%), крошки шамота и воды.

**Металлургическая шихта** – строго подобранный набор исходных металлических материалов, обеспечивающих требуемый (заданный) химический состав получаемого чугуна. В состав ваграночной шихты могут входить выплавляемые в доменных печах чушковые чугуны (литейные и передельные), чугунный и стальной лом, возврат собственного производства (литники, сплески, брак отливок), а также различные присадки (ферросилиций, ферромарганец и др.). При получении высококачественных чугунов в шихту вводят специальные легированные (содержащие хром, никель) чугуны.

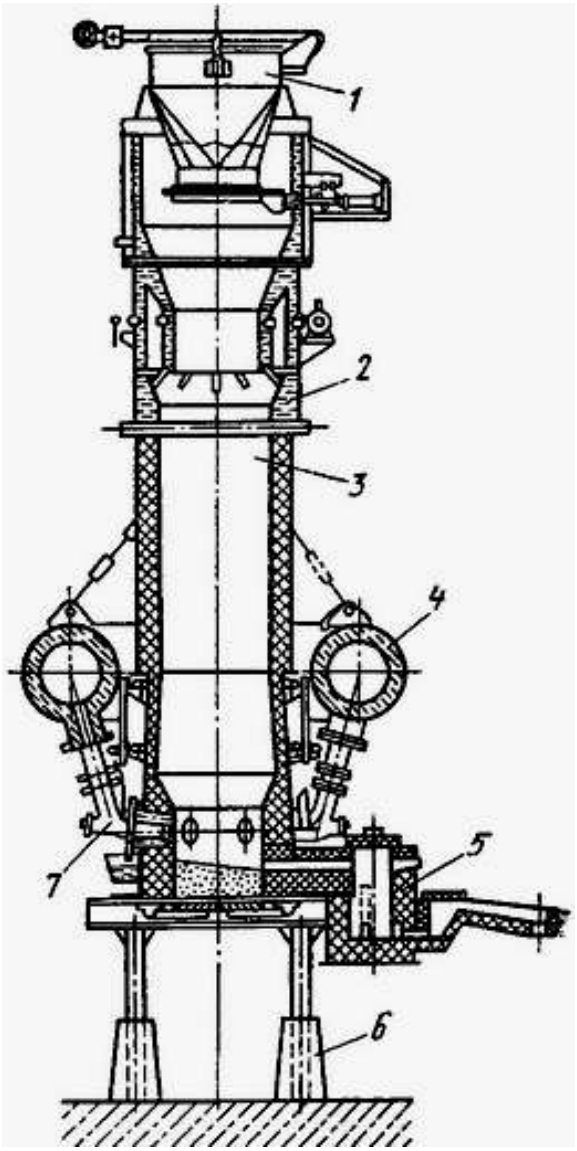



Рис. 1.2. Схема устройства вагранки закрытого типа без копильника:
*1* – узел герметизации загрузки шихты, *2* – узел отбора ваграночных газов, *3* – водоохлаждаемая шахта, *4* – фурменные трубы. *5* – сифонный шлакоотделитель, *6* – опорная часть, *7* – фурма

**Флюсы** – неметаллические шихтовые материалы, которые вводят в вагранку для понижения температуры плавления неметаллических включений и перевода в шлак золы топлива, кварцевого песка, а также вредных (серы и фосфора) и посторонних примесей. В качестве флюса в ваграночной плавке наиболее широко применяют известняк (содержащий не менее 97% $CaCO_3$), расход которого составляет 2,5 – 4,0% от массы расплавляемой шихты, реже плавиковый шпат и др.

**Топливо**. Наиболее распространенным видом топлива для ваграночной плавки является кокс, при горении которого выделяется теплота, обеспечивающая плавление исходных шихтовых материалов

и образующегося шлака, понижение его вязкости, с тем, чтобы наиболее полно протекали металлургические процессы между расплавом чугуна и шлаком. Расход кокса в вагранках составляет 10 – 12% от массы расплавляемой шихты.

Перед использованием шихтовые материалы подвергают обработке: металлические (чушковые чугуны, лом и отходы собственного производства) измельчают и разрезают на более мелкие части специальным оборудованием (чушколомами, аллигаторными ножницами, копрами и др.), а крупные куски флюсов – в щековых дробилках и в шаровых мельницах. Для интенсификации горения кокса его перед использованием просеивают на специальных ситах – грохотах для отсеивания мелочи.

### Технологический процесс плавки

Вновь построенная или отремонтированная вагранка (рис. 1.2) должка быть хорошо просушена. После розжига в нее загружают слой кокса высотой 500 – 1500 мм, который называется холостой колошей. Этот кокс служит для разогрева вагранки и поддерживает расплавляемые шихтовые материалы в зоне наиболее высоких температур, что способствует ускорению процесса плавки. Далее на разогретый кокс холостой колоши загружают рабочую коксовую колошу, флюс и первую порцию металлической шихты. Таким образом, загрузка шихтовых материалов происходит слоями: кокс – флюс – металл.

В современных условиях загрузку шихты обычно осуществляют с помощью бадьи, вводимой в шахту вагранки наклонным (скиповым) подъемником (рис. 1.3). После загрузки шихтовых материалов открывают фурмы и дают дутье – воздух, необходимый для горения топлива. При этом летку оставляют открытой до тех пор, пока не появятся капли расплавленного чугуна. В плавильном поясе – зоне плавления (рис. 1.3) шихта расплавляется и вместе со шлаком чугунный расплав стекает в горн вагранки. Образующиеся при этом газы поднимаются вверх и по пути нагревают металлическую шихту и топливо, а затем уходят в систему подогрева дутья (см. рис.1.2). По мере сгорания кокса и плавления чугуна загружаемая в вагранку шихта опускается, а на ее место загружают сверху новые порции шихтовых материалов.

В процессе плавки чугунный расплав скапливается в горне вагранки. Шлак же, имеющий более низкую плотность, располагается на поверхности расплавленного чугуна. По мере скопления шлак выпускают через верхнюю – шлаковую летку, а накопившийся чугунный расплав – через нижнюю летку (см. рис. 1.3).

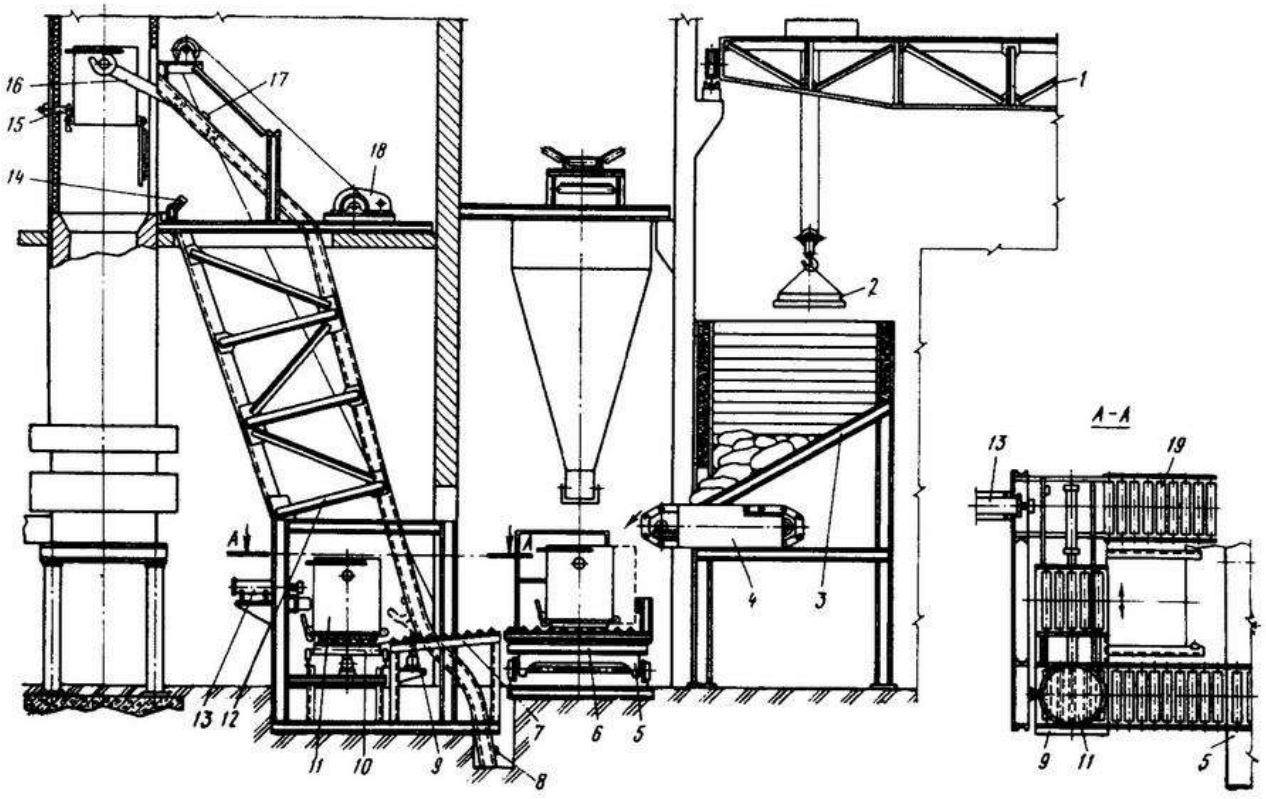



Рис. 1.3. Скиповая загрузка шихты в вагранку:
*1* – мостовой электрический кран, *2* – электромагнитная шайба, *3* – суточные бункера, *4* – пластинчатый транспортер. *5* – электровесовая тележка. *6. 7, 19* – приводные рольганги. *8, 17* – конечные выключатели, *9* – упоры *10* – тележка с пневмоприводом. *11* – съемная бадья. *12* – скиповый подъемник. *13* – пневмосталкиватель, *14, 15* – упоры для открывания и закрывания днища вагранки, *16* – скиповая тележка, *18* – электролебедка

При выпуске чугуна отверстие летки пробивают стальным ломиком, после чего расплавленный чугун по желобу направляется в разливочный ковш. После выпуска чугуна отверстие летки заделывают пробкой из огнеупорной глины. Процесс плавки завершается удалением остатков металла и шлака из вагранки через крышку в днище.

## Задание по работе

1. Изучить устройство вагранки по видеоматериалу фильма «Способы получения чугуна и стали».

2. Изучить технологический процесс плавки чугуна в вагранке.
3. Вычертить эскиз схемы устройства вагранки без копильника.
5. Состав загружаемой шихты в вагранку.
6. Выделить основные достоинства и недостатки выплавки чугуна в вагранках.
7. Составить отчет по работе.

**Порядок проведения работы**

1. Студенты внимательно просматривают фильм «Способы получения чугуна и стали»
2. Во время просмотра выполняют зарисовку эскизов общего вида вагранки. Литература**.** См. [1, 2].
3. Важно записать какие материалы используют для загрузки печи, состав шихты и комплекс движений, выполняемых рабочим при обслуживании вагранки.
4. После просмотра фильма студенты самостоятельно изучают теоретический материал, в котором рассмотрены устройство вагранки, материалы плавки и процесс ваграночной плавки.
5. Студент должен сделать вывод о достоинствах и недостатках получения чугуна в вагранках, эффективности производства, а главное – стоимость и качество полученного в вагранке чугуна.
6. Составить отчет по работе.

**Содержание отчета**

1. Эскиз схемы устройства вагранки без копильника.
2. Описание устройства вагранки с копильником и без копильника.
3. Материалы, используемые при плавке чугуна в вагранке (состав шихты).
4. Выводы.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2
# ПРОИЗВОДСТВО СТАЛИ В ЭЛЕКТРОПЕЧАХ

## Цель работы

1. Изучить принцип работы электрической печи
2. Изучить типы электрических печей
3. Изучить процесс получения стали в плавке с полным окислением и плавку с частичным окислением, а также плавку в кислой дуговой электропечи.
4. Изучить физико-химические процессы, протекающие при плавке стали в электропечах

## Краткие сведения о производстве стали в электропечах

Электроплавка – наиболее совершенный способ получения литой стали. Быстрый подъем и точное регулирование температуры, высокий нагрев и возможность создания окислительной и восстановительной атмосферы в плавильном пространстве – все это позволяет выплавлять сталь точного химического состава, с особыми физическими и химическими свойствами.

Электроплавка дает возможность получения высококачественных сталей, содержащих такие тугоплавкие элементы, как вольфрам, ванадий, молибден, расплавление которых в других печах затруднительно.

В настоящее время большинство сортов специальных сталей выплавляется в электропечах. В текущей пятилетке будет продолжаться повышение удельного веса производства электростали.

**Работа электропечей.**

Электропечи могут работать как на жидкой, так и на твердой шихте. Работа на твердой шихте (лом, стружка, отходы проката) в основных печах является наиболее распространенной. Процесс плавки включает: 1) расплавление шихты; 2) окисление примесей; 3) раскисление стали; 4) удаление серы; 5) доводку стали до требуемого химического состава.

Расплавление шихты и порядок выгорания примесей в электропечи аналогичен мартеновскому процессу. По мере расплавления ме-

талла происходит окисление железа и содержащихся в нем примесей. В качестве окислителей добавляют железную руду и окалину. После окисления примесей образуются разные химические соединения, которые переходят в шлак. В качестве шлакообразующих материалов в печь вводят известь или известняк и плавиковый шпат – флюорит $CaF_2$ ($T_{пл}$ = 1378°С ).

Современные электрические печи для выплавки стали можно разделить на две группы – дуговые и индукционные.

В *дуговых* печах теплота получается от горения электрической дуги, образующейся непосредственно между электродами (печи с «независимой» дугой) или между электродами и металлической ванной (печи с «зависимой» дугой).

При вертикальном положении электродов *4* (рис. 2.1) электрическая дуга *3* образуется между каждым электродом и металлом *1*.

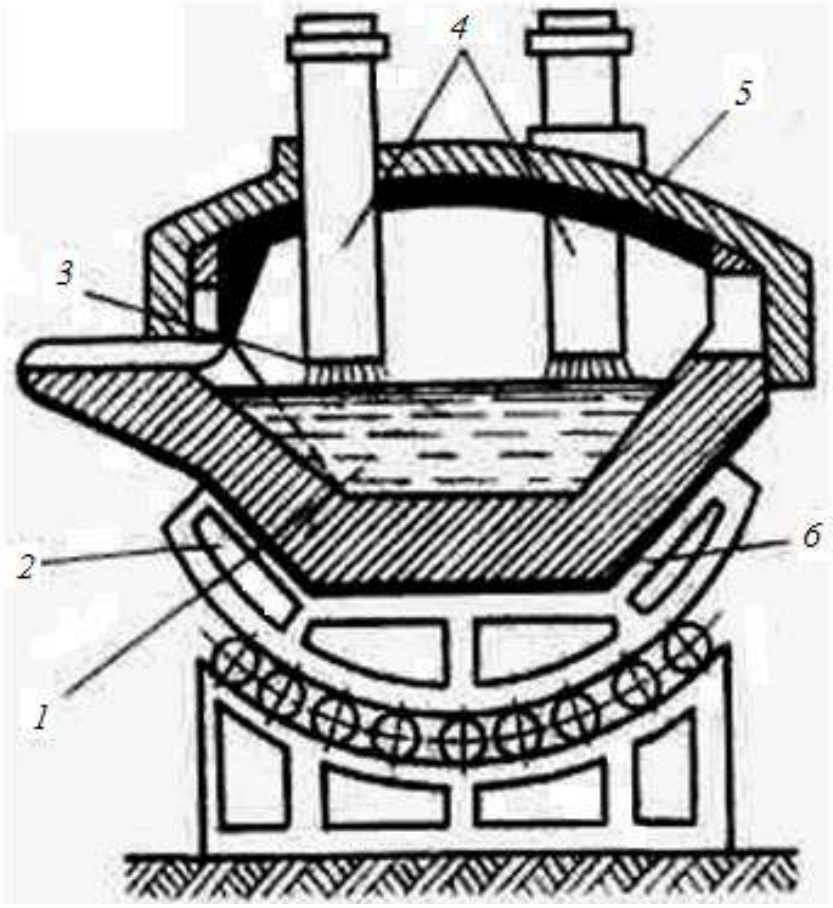



Рис. 2.1. Дуговая электропечь с вертикально расположенными электродами

Металлическая часть шахты служит промежуточным проводником. Печи этого типа получили преимущественное распространение. Такая печь состоит из металлического кожуха цилиндрической фор-

мы с плоским или сферическим дном *6*, а внутри футерована огнеупорными материалами. С помощью особого механизма *2* печь можно устанавливать в наклонное положение. Электроды (угольные или графитовые) проходят через съемочный свод *5*. Диаметр их от 200 до 600 мм, длина до 3 м. Графитовые электроды более устойчивы при высоких температурах, имеют меньшее электросопротивление, чем угольные, и поэтому их применение в печах более целесообразно. Емкость электропечей колеблется от 250 кг до 200 т.

*Индукционные* печи позволяют получать более чистый металл, чем при плавке в дуговых печах. Принцип их работы основан на выделении тепла при прохождении тока через проводник. Таким проводником является сама металлическая шихта. Преимущественное распространение получили бессердечниковые печи, часто называемые *высокочастотными* (рис. 2.1).

Через индуктор *1*, представляющий собой обмотку из медной трубки, охлаждаемой внутри водой, пропускается ток, возбуждающий в окружающем пространстве переменное магнитное поле. Это магнитное поле возбуждает индукционные токи в металле *3*, заключенном в ванну *2*.

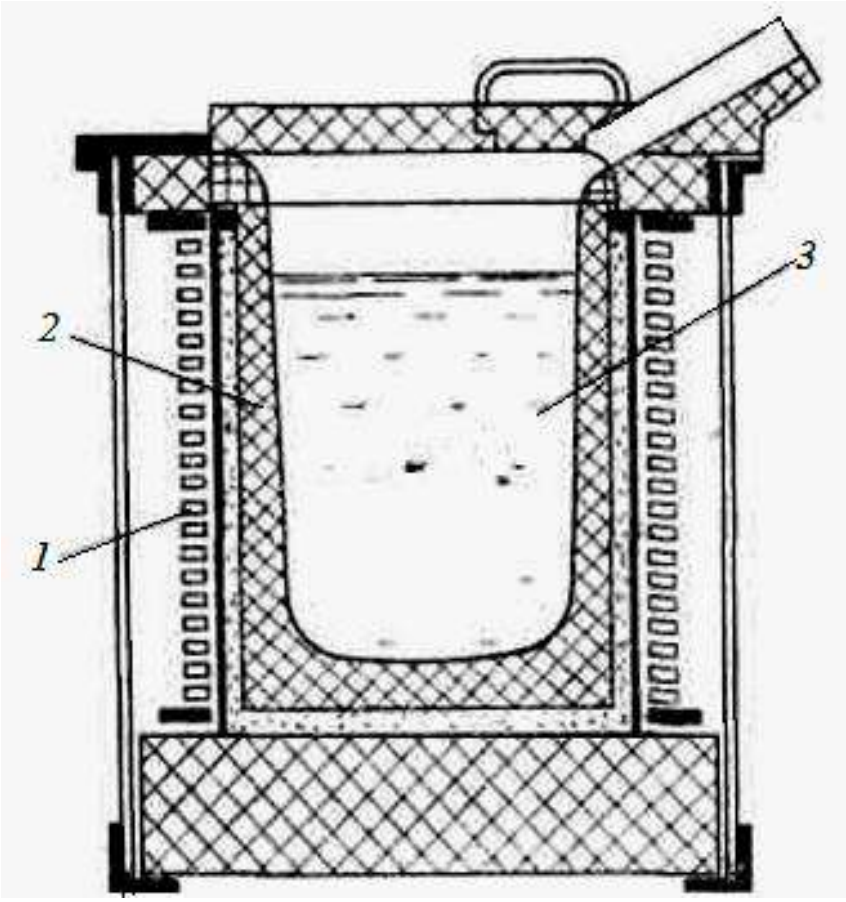



Рис. 2.2. Высокочастотная печь

Под влиянием наведенных токов металл прогревается. Емкость высокочастотной печи от 50 кг до 60 т. Печи промышленного типа питаются переменным током от мотор-генераторов, работающих на частоте 500 – 2500 Гц. Применяются также ламповые и искровые генераторы.

Индукционные печи 'удобны тем, что не требуют электродов, благодаря чему предотвращается опасность науглероживания металла и упрощается управление печью. Кроме того, под действием магнитного потока (магнитных силовых линий) усиливается циркуляция металла, что очень важно для ускорения химических реакций и получения однородного металла.

**Получение стали в электропечах.** В зависимости от футеровки различают *кислые* и *основные* электропечи. Собственно все виды передела чугуна на жидкую сталь являются процессами рафинирования, заключающимися в том, что находящиеся в чугуне в качестве примесей элементы (углерод, кремний, марганец и др.) подвергаются окислению кислородом воздуха или соединениями, легко отдающими кислород. При этом получаются газообразные или жидкие окислы, не растворяющиеся в металле или растворяющиеся в очень ограниченном количестве. Газообразные соединения уходят в атмосферу, а жидкие образуют шлаки, всплывающие благодаря меньшему удельному весу на поверхность металла и таким образом отделяющиеся от него.

При кислом процессе нельзя удалить серу и фосфор (требуются чистые исходные материалы). В основных электропечах эти элементы удаляются легко, поэтому основные печи применяются для получения высококачественных сортов стали. Кислые же печи применяются главным образом для получения стальных фасонных отливок.

Плавка в основной электропечи начинается с расплавления загруженного скрапа и чугуна.

По ходу выгорания примесей различают несколько вариантов плавки:

1) с полным окислением;
2) с частичным окислением;
3) без окисления.

**Плавка с полным окислением** применяется, когда в шихте содержится значительное количество фосфора и других примесей. В этих условиях примеси не успевают выгореть за время расплавления и для ускорения процесса окисления в ванну добавляют железную

или марганцевую руду. Введение марганцевой руды предохраняет ванну от перенасыщения окислами железа. $MnO_2$ разлагается с образованием $Mn_3O_4$, которая при соединении с углеродом дает CO по реакции

$$Mn_3O_4 + 4C \rightarrow 3Mn + 4CO.$$

Вследствие выделения CO ванна «кипит». Процесс получения стали распадается на несколько периодов.

В течение *окислительного периода* (кипа) происходит удаление из металла фосфора и значительной части газов (поглощаемых металлом во время расплавления). В процессе расплавления происходит окисление фосфора с образованием $(CaO)_4 \cdot P_2O_5$. Одновременно идет окисление Mn, Si, C. Продукты окисления примесей образуют шлак. После образования шлака берут пробу металла, если в пробе окажется значительное количество фосфора, то шлак «скачивают». Скачивание (дефосфация) необходимо для предупреждения перехода фосфора обратно в металл. Когда металл окажется достаточно чистым по содержанию фосфора, удалением «чёрного» шлака заканчивается окислительный период плавки.

После этого начинается *восстановительный период,* во время которого, кроме раскисления металла, производят десульфурацию и доводят химический состав стали до заданного состава. При плавке с полным окислением окисляется значительное количество углерода, и содержание его в металле понижается. Для повышения содержания углерода до нужного предела ванну науглероживают (на поверхность металла забрасывают куски малосернистого кокса, бой электродов и т. д.). Одна часть углерода идет на восстановление растворенной в металле FeO, а другая расплавляется в металле.

При дуговой электроплавке металла, в отличие от мартеновской и конверторной, раскисление ванны производится не столько за счет присадки раскислителей, сколько за счет раскислительного шлака. Различают два вида раскислительного шлака: белый (известковый) и карбидный. Для получения белого шлака в печь на поверхность ванны забрасывают шлаковую смесь: 76% CaO, 19% $CaF_2$ и 5% кокса.

Белый шлак обеспечивает наиболее полное удаление серы:

$$FeS + C + C\,O = CaS + CO + Fe;$$

$$MnS + C + CaO = CaS + CO + Mn.$$

Элемент CaS, образуемый в ходе этих реакций, нерастворим в металле и уходит в шлак.

Доводка и окончание плавки заключается в присадке в печь небольшого количества раскислителей – ферросилиция и алюминия.

Легирующими примесями являются Ni, Mo, Cr, W, V. Никель и молибден окисляются в меньшей степени и вводятся до полного раскисления ванны, хром и вольфрам – в уже раскисленную ванну, а ванадий – перед выпуском металла. Плавка с полным окислением производится только для получения стали с малым содержанием углерода.

**Плавка с частичным окислением.** Для получения фасонного литья чаще применяют *плавку с частичным окислением.* Единственным источником кислорода при такой плавке служат ржавчина или окалина железного лома и проникающий в печь воздух. Применяется этот способ, когда содержание фосфора в шихте лишь незначительно выше допустимого в готовом металле, так что для окисления фосфора достаточно тех окислов железа, которые имеются в ванне после расплавления. При частичном окислении выгорает лишь кремний, а фосфор, марганец и углерод в большей или меньшей степени остаются в металле.

**Плавка без окисления** производится при восстановительном режиме на чистом по сере и фосфору и незаржавленном ломе. Это, по существу, переплавка чистого скрапа, и ведется она главным образом при наличии в скрапе хрома, вольфрама и других ценных примесей для получения соответствующих сталей. Руды при этом в ванну не подают и шлак не спускают.

Таблица 1.

**Продолжительность плавки *T* (ч) и расход электроэнергии *Q* (кВт ч/т) в зависимости от емкости и условий работы электропечи**

| Емкость печи, кг | Двукратное шлакование | | Однократное шлакование | | Без спуска шлака | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *T* | *Q* | *T* | *Q* | *T* | *Q* |
| 500 | 2,0/3,63 | 700/1450 | 1,68/3, 32 | 588/1330 | 1,33/3,00 | 465/1200 |
| | 3,15/7,22 | 324/868 | 2,57/6,63 | 265/795 | 2,08/6,05 | 219/725 |

*Примечание.* В числителе – данные для жидкой шихты, в знаменателе – для твердой.

**Плавка в кислой дуговой электропечи** протекает подобным образом, но имеет свои особенности:

1) футеровка – динасовый кирпич;

2) сера и фосфор не удаляются, печь работает без спуска шлака,

который в основном состоит из силикатов железа и марганца;

3) раскисление ведется присадками, роль шлака заключается в связывании FeO и MnO кремнеземом. В конце процесса идет восстановление кремния, способствующее раскислению ванны.

Технико-экономическая характеристика дуговых печей. Продолжительность плавки в дуговой электропечи зависит от ее емкости, от вида футеровки, от характера завалки и сорта выплавляемого металла. Большие печи работают экономичнее, чем малые, так как они имеют меньший расход электроэнергии на 1 т годного литья и большую производительность одного агрегата (табл. 2). В кислых печах плавка идет быстрее, чем в основных. Угар металла при твердой завалке составляет 5 – 8%, при жидкой – 2%. Нормальный выход годного литья 91 – 92%.

Из табл. 2 следует, что производительнее и дешевле работать на жидкой шихте, которая к тому же требует меньше материалов на огнеупорную футеровку. Учитывая экономичность больших электропечей, в эксплуатацию вводятся печи емкостью 200 т.

Пути совершенствования электроплавки стали. *Применение кислорода* позволяет в ряде случаев (например, при изготовлении нержавеющей стали в дуговых печах) увеличить производительность печи на 15 – 25% и снизить удельный расход электроэнергии на 20 – 30%, а расход электродов на 5 – 10%.

**Плавка в вакууме** – один из основных способов получения особо качественных металлов и сплавов. При таком способе значительно снижается содержание в металле газовых включений ($O_2$, $N_2$, $H_2$) и улучшается качество стали. Некоторое повышение стоимости металла окупается тем, что из него можно изготовлять более прочные конструкции меньших габаритов. Для плавки под вакуумом индукционная печь размещается в герметически изолированной камере, из которой откачивается воздух. В таких печах плавка идет при вакууме, равном тысячным долям миллиметра ртутного столба.

**Электрошлаковый переплав** осуществляется в электропечах сопротивления (рис. 2.3). В обычных печах сопротивления нагревательным элементом (стержнем, спиралью) является материал, обладающий высоким электросопротивлением, в результате чего элемент разогревается при прохождении через него тока. Таким элементом

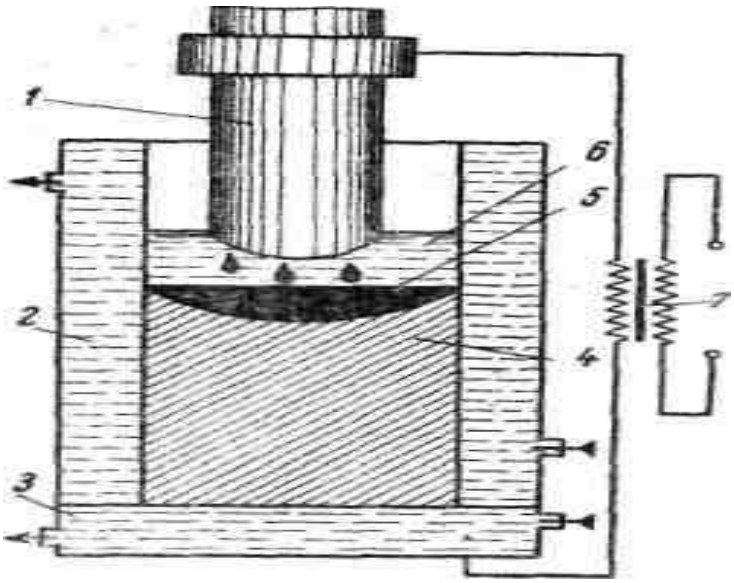



Рис. 2.3. Электропечь сопротивления:
*1* – расходуемый электрод; *2* – кристаллизатор; *3* – поддон; *4* – слиток;
*5* – жидкий металл; 6 – шлак; *7* – трансформатор

сопротивления в печах для электрошлакового переплава (ЭШП) является ванна расплавленного шлака. Опущенный в нее расходуемый электрод, отлитый из стали, подвергаемой рафинированию, плавится, капли металла проходят через шлак, дегазируются, очищаются от примесей и застывают в нижней части, образуя слиток. Флюс для ЭШП имеет различный состав, например; $CaF_2$ – 65%; $A1_2O_3$ – 30%; CaO – 5%. Способ ЭШП применяется для получения стали с особо высокими характеристиками.

## Порядок выполнения работы

1. Повторяется материал по темам «Выплавка в дуговых печах», «Выплавка в индукционных электропечах» раздела «Производство сталей в электропечах».
2. Просмотр фильма «Способы получения чугуна и стали»
3. Во время просмотра выполняется зарисовку эскизов общего вида электрической печи. **Литература.** См. [1, 2].
4. После просмотра фильма студенты самостоятельно изучают теоретический материал, в котором рассмотрены различные типы электропечей.
5. Перечислить материалы, используюемые для загрузки печи и комплекс движений, выполняемых рабочим при обслуживании

электрической печи.

6. Начертить эскизы для отчета – дуговую, высокочастотную и электропечь сопротивления.
7. Изучить принцип работы электропечи.
8. Ознакомиться с разновидностями электрической плавки.
9. Изучить электрошлаковый переплав и его отличительные особенности.
10. Привести основные отличия выплавки стали в электрических печах от мартеновского способа и от конверторного способа получения стали.
11. Составить отчет по работе.

## Содержание отчета

1. Эскиз дуговой, высокочастотной и электропечи сопротивления.
2. Описание принципа работы электропечи.
3. Формулы физико-химических процессов выплавки стали с полным окислением.
4. Основные отличия выплавки стали в электрических печах от мартеновского способа и от конверторного способа получения стали.
5. Выводы и предложения о достоинствах и недостатках получения стали в электропечах, эффективности производства, а главное – стоимости и качества полученной в электропечах стали.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.
# ХОЛОДНАЯ ОБЪЕМНАЯ И ЛИСТОВАЯ ШТАМПОВКИ

## Цель работы

1. Изучить технологию холодной объемной и листовой штамповки
2. Изучить особенности применения холодной объемной и листовой штамповки
3. Изучить оборудование и материалы, применяемые при холодной объемной и листовой штамповке
4. Изучить инструмент, применяемый при холодной объемной и листовой штамповке
5. Изучить ограничения применения методов холодной объемной и листовой штамповки

## Краткие сведения о штамповке

Холодная штамповка производится в штампах без нагрева заготовок и сопровождается деформационным упрочнением металла.

Холодная штамповка является одним из наиболее прогрессивных методов получения высококачественных заготовок небольших и точных из стали и цветных металлов. Она обеспечивает достаточно высокую точность и малую шероховатость поверхности при малых отходах металла и низкой трудоемкости и себестоимости изготовления изделий. Возможность осуществления холодной штамповки и качество заготовок определяются качеством исходного материала. Большое значение имеет подготовка поверхности заготовок: удаление окалины, загрязнений и поверхностных дефектов.

Процессы холодной штамповки часто выполняют за несколько технологических переходов, постепенно приближая форму и размеры заготовок к форме и размерам готовых изделий и осуществляя промежуточный отжиг для снятия наклепа и восстановления пластических свойств металла. В зависимости от характера деформирования и конструкции штампов холодную штамповку делят на объемную и листовую штамповку.

**Холодную объемную штамповку** выполняют на прессах или специальных холодноштамповочных автоматах. Основными ее разновидностями являются: высадка, выдавливание, объемная формовка, чеканка.

*Высадка* – образование на заготовке местных утолщений требуемой формы в результате осадки ее конца (рис. 3.1).

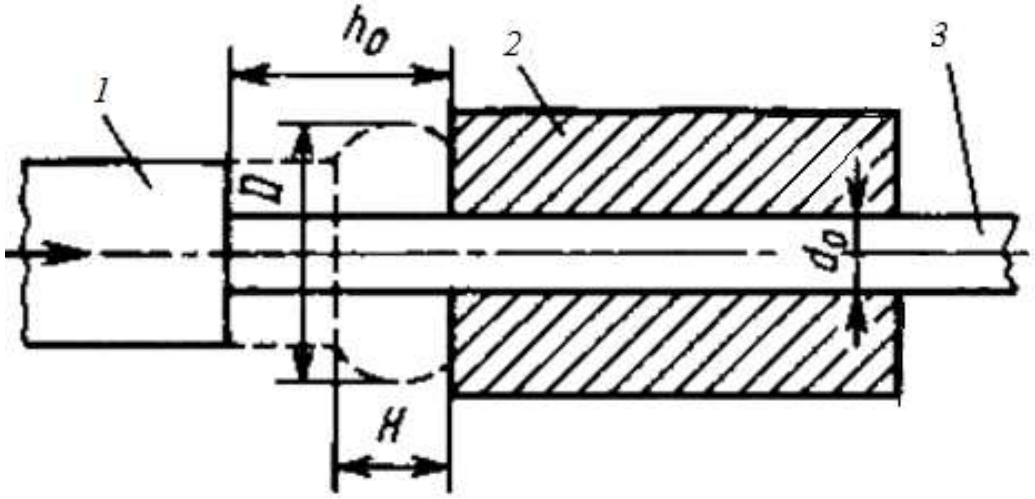



Рис. 3.1. Схема высадки

Заготовкой обычно служит холоднотянутый материал в виде проволоки или прутка из черных или цветных металлов. Высадкой изготавливают стандартные и специальные крепежные изделия, кулачки, валы-шестерни, детали электронной аппаратуры, электрические контакты и т.д.

Длина высаживаемой части ($h_0$) рассчитывается с учетом объема требуемого утолщения ($V$) по формуле: $h_0 = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot d_0^2}$. Расчет числа переходов производится, в основном, по соотношению длины высаживаемой части ($h_0$) и диаметра заготовки ($d_0$), которое характеризует устойчивость к продольному изгибу. При $\frac{h_0}{d_0} < 2{,}3$ используют один переход, при $\frac{h_0}{d_0} < 5$ – два перехода, при $\frac{h_0}{d_0} < 8$ – три перехода. При большом количестве переходов происходит упрочнение металла, поэтому требуется отжиг.

Последовательность переходов изготовления деталей показана на рис. 3.2.

Высадка осуществляется на прессах, горизонтально-ковочных машинах, автоматических линиях, оснащенных холодновысадочными пресс-автоматами.

*Выдавливание* – формообразование сплошных или полых изделий, благодаря пластическому течению металла из замкнутого объема через отверстия соответствующей формы.

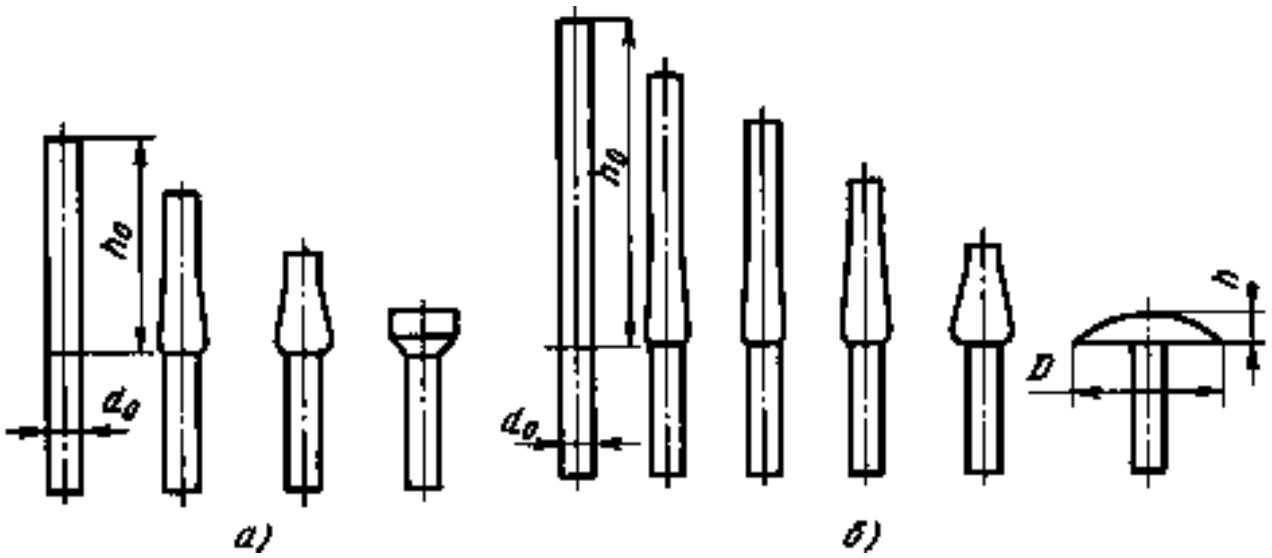



Рис. 3.2. Последовательность изготовления детали:
*а* – за три перехода; *б* – за пять переходов

Особенностью процесса является образование в очаге деформации схемы трехосного неравномерного сжатия, повышающего технологическую пластичность материала.

Различают прямое, обратное, боковое и комбинированное выдавливание (рис. 3.3).

При *прямом* выдавливании металл течет из матрицы *2* в направлении, совпадающем с направлением движения пуансона *1* (рис. 3.3, *а*, 3.3,*б*). Этим способом можно получить детали типа стержня с утолщением, трубки с фланцем, стакана с фланцем.

При *обратном* выдавливании металл течет в направлении, противоположном направлению движения пуансона, в кольцевой зазор между пуансоном и матрицей для получения полых деталей с дном (рис. 3.3, *в*) или в полый пуансон для получения деталей типа стержня с фланцем (рис. 3.3, *г*).

При *боковом* выдавливании металл течет в боковые отверстия матрицы под углом к направлению движения пуансона (рис. 3.3, *ж*). Таким образом, можно получить детали типа тройников, крестовин и т.п. Для обеспечения удаления заготовок из штампа матрицу выполняют состоящей из двух половинок с плоскостью разъема, проходящей через осевые линии исходной заготовки и получаемого отростка.

При *комбинированном* выдавливании металл течет по нескольким направлениям (рис. 3.3, *д*, 3.3, *е*). Возможны сочетания различных схем.

Заготовки для выдавливания отрезают от прутков или вырубают из листа. Размер заготовок рассчитывают с учетом потерь на последующую обработку. Форма заготовки и ее размеры для полых деталей без фланца соответствуют наружным размерам детали; для деталей с фланцем – диаметру фланца; для деталей стержневого типа – размерам головки.

Выдавливание можно осуществлять и в горячем состоянии.

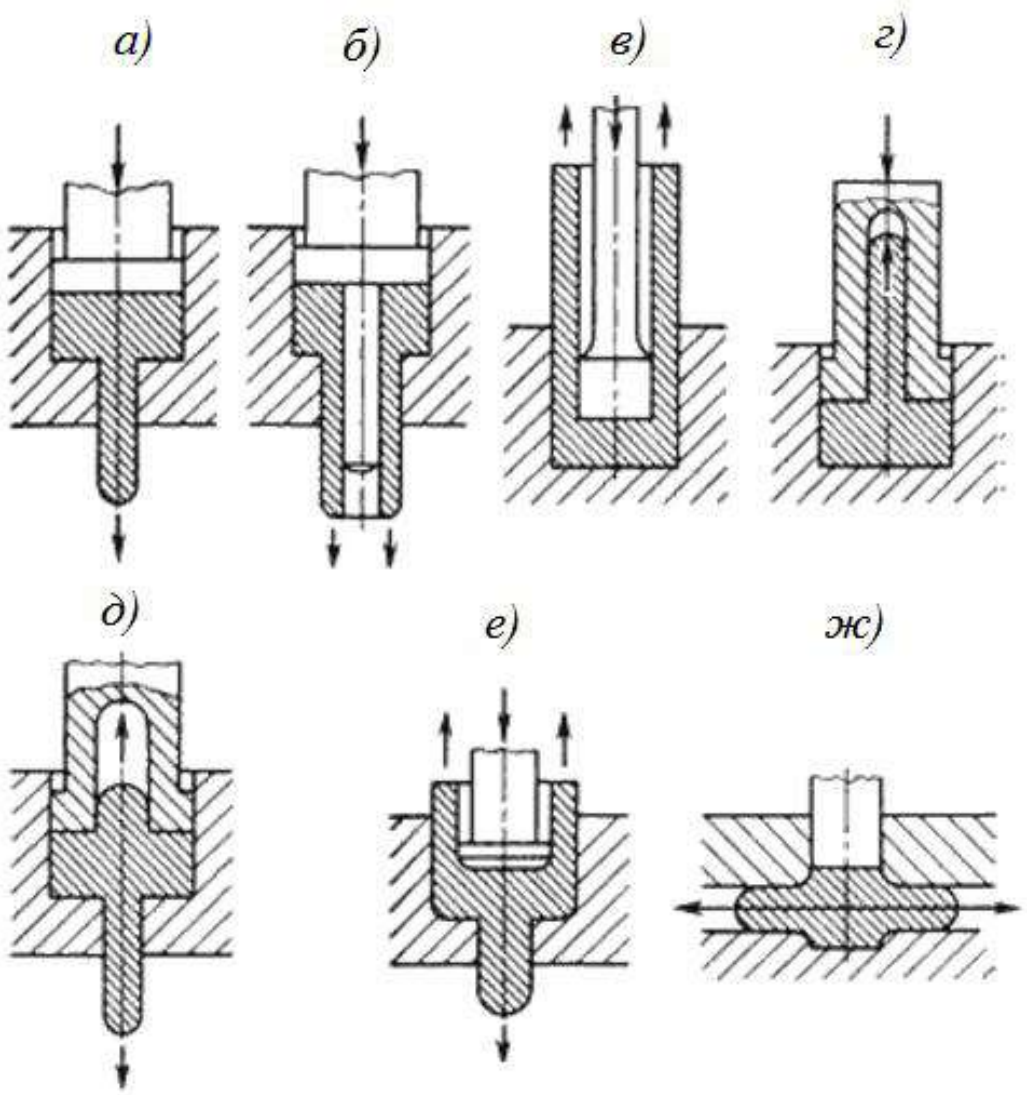



Рис. 3.3. Схемы выдавливания
*а, б* – прямого; *в, г* – обратного; *д, е* – комбинированного; *ж* – бокового

*Объемная формовка* – формообразование изделий путем заполнения металлом полости штампа.

Схемы объемной формовки представлены на рис. 3.4.

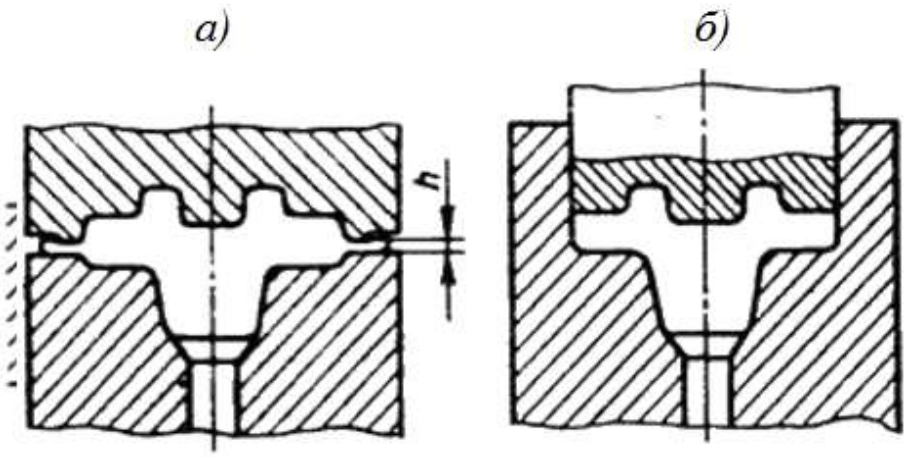



Рис. 3.4. Схемы объемной формовки
*а* – в открытых штампах; *б* – в закрытых штампах

Она производится в открытых штампах, где излишки металла вытекают в специальную полость для образования облоя (рис. 3.4, *а*), и в закрытых штампах, где облой не образуется (рис. 3.4, *б*). Формовку в закрытых штампах применяют реже из-за больших сложности и стоимости получения заготовок точного объема, необходимости использования более мощного оборудования и меньшей стойкости штампов. В закрытых штампах получают в основном детали из цветных металлов.

Объемной формовкой изготавливают пространственные детали сложных форм, сплошные и с отверстиями. Холодная объемная формовка требует значительных удельных усилий вследствие высокого сопротивления металла деформированию в условиях холодной деформации и упрочнения металла в процессе деформации. Упрочнение сопровождается снижением пластичности металла. Для облегчения процесса деформирования оформление детали расчленяется на переходы, между которыми заготовку подвергают рекристаллизационному отжигу. Каждый переход осуществляют в специальном штампе, а между переходами обрезают облой для уменьшения усилия деформирования и повышения точности размеров деталей.

Заготовкой служит полоса или пруток, причем процесс штамповки может осуществляться непосредственно в полосе или прутке или из штучных заготовок.

В качестве оборудования используют прессы, однопозиционные и многопозиционные автоматы.

*Чеканка* – образование рельефных изображений на деформируемом материале.

Чеканка осуществляется в закрытых штампах на чеканочных фрикционных и гидравлических прессах.

При холодной штамповке коэффициент использования материала достигает 95%. При холодном деформировании формируется благоприятная ориентированная волокнистая структура металла, что придает деталям высокую усталостную прочность при динамических нагрузках. Это позволяет получать конструкции с меньшими размерами и металлоемкостью, чем у конструкций, полученных обработкой резанием, не снижая при этом их надежность. Но для холодной объемной штамповки требуется дорогостоящий специальный инструмент, что делает целесообразным ее применение только в массовом и крупносерийном производствах.

**Листовая штамповка** – один из видов холодной обработки давлением, при котором листовой материал деформируется в холодном или подогретом состоянии.

Листовой штамповкой изготавливаются разнообразные плоские и пространственные детали – от мелких, массой от долей грамма и размерами в доли миллиметра (секундная стрелка часов), до средних (металлическая посуда, крышки, кронштейны) и крупных (облицовочные детали автомобилей).

Толщина заготовки при листовой штамповке обычно не более 10 мм, но иногда может превышать 20 мм, в этом случае штамповка осуществляется с предварительным подогревом до ковочных температур.

При листовой штамповке используют: низкоуглеродистые стали, пластичные легированные стали, цветные металлы и сплавы на их основе, драгоценные металлы, а также неметаллические материалы: органическое стекло, фетр, целлулоид, текстолит, войлок и др.

Листовую штамповку широко применяют в различных отраслях промышленности, особенно, автомобилестроении, ракетостроении, самолетостроении, приборостроении, электротехнической промышленности.

**Основные преимущества листовой штамповки:**

- возможность изготовления прочных легких и жестких тонкостенных деталей простой и сложной формы, получить которые другими способами невозможно или затруднительно;

- высокие точность размеров и качество поверхности, позволяющие до минимума сократить механическую обработку;
- сравнительная простота механизации и автоматизации процессов штамповки, обеспечивающая высокую производительность (30000 … 40000 деталей в смену с одной машины);
- хорошая приспособляемость к масштабам производства, при которой листовая штамповка может быть экономически выгодна и в массовом, и в мелкосерийном производствах.

Холодная листовая штамповка заключается в выполнении в определенной последовательности разделительных и формоизменяющих операций, посредством которых исходным заготовкам придают форму и размеры детали.

*Операцией листовой штамповки* называется процесс пластической деформации, обеспечивающий характерное изменение формы определенного участка заготовки.

Различают *разделительные* операции, в которых этап пластического деформирования обязательно завершается разрушением, и *формообразующие* операции, в которых заготовка не должна разрушаться в процессе деформирования. При проектировании технологического процесса изготовления деталей листовой штамповкой основной задачей является выбор наиболее рациональных операций и последовательности их применения, позволяющих получить детали с заданными эксплуатационными свойствами при минимальной себестоимости и хороших условиях труда.

Все операции выполняются при помощи специальных инструментов – штампов, которые имеют различные конструкции в зависимости от назначения. Штампы состоят из рабочих элементов – матрицы и пуансона, и вспомогательных частей – прижимов, направляющих, ограничителей и т.д. Пуансон вдавливается в деформируемый металл или охватывается им, а матрица охватывает изменяющую форму заготовку и пуансон.

### Операции листовой штамповки

*Разделительные операции* предназначены или для получения заготовки из листа или ленты, или для отделения одной части заготовки от другой. Операции могут выполняться по замкнутому или по незамкнутому контуру.

Отделение одной части заготовки от другой осуществляется относительным смещением этих частей в направлении, перпендикулярном к плоскости заготовки. Это смещение вначале характеризуется пластическим деформированием, а завершается разрушением.

*Отрезка* – отделение части заготовки по незамкнутому контуру на специальных машинах – ножницах или в штампах.

Обычно ее применяют как заготовительную операции для разделения листов на полосы и заготовки нужных размеров.

Основные типы ножниц представлены на рис. 3.5.

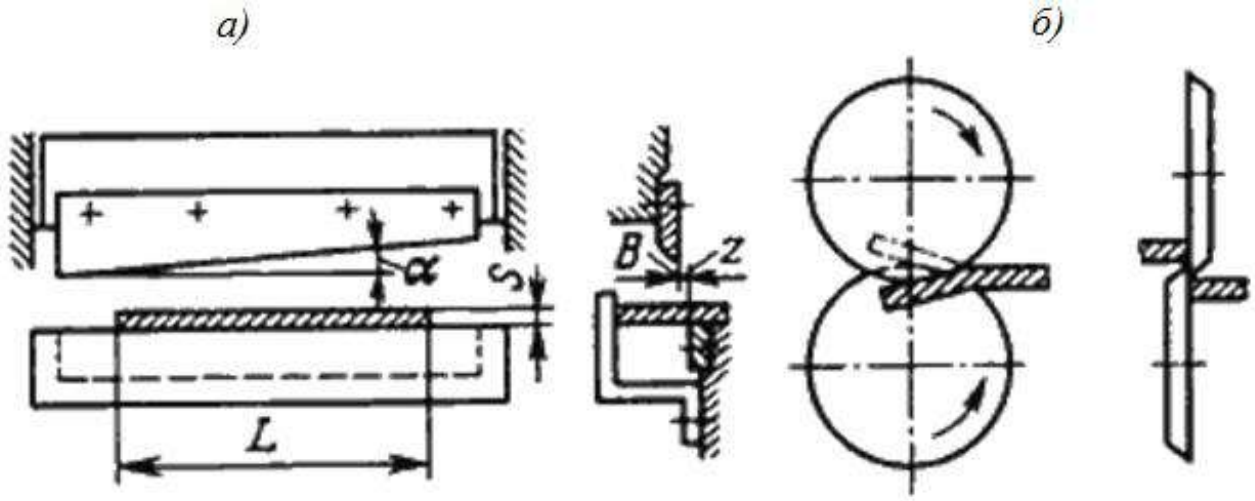



Рис. 3.5. Схемы действия ножниц
*а* – гильотинных; *б* – дисковых

Ножницы с поступательным движением режущих кромок ножа могут быть с параллельными ножами, для резки узких полос, с одним наклонным ножом – гильотинные (рис. 3.5, *а*). Режущие кромки в гильотинных ножницах наклонены друг к другу под углом 1 … 5° для уменьшения усилия резания. Лист подают до упора, определяющего ширину отрезаемой полосы *B*. Длина отрезаемой полосы *L* не должна превышать длины ножей.

Ножницы с вращательным движением режущих кромок – дисковые (рис. 3.5, *б*). Длина отрезаемой заготовки не ограничена инструментом. Вращение дисковых ножей обеспечивает не только разделение, но и подачу заготовки под действием сил трения. Режущие кромки ножей заходят одна за другую, это обеспечивает прямолинейность линии отрезки. Для обеспечения захвата и подачи заготовки диаметр ножей должен быть в 30 … 70 раз больше толщины заготовки, увеличиваясь с уменьшением коэффициента трения.

*Вырубка* и *пробивка* – отделение металла по замкнутому контуру в штампе.

При вырубке и пробивке характер деформирования заготовки одинаков. Эти операции отличаются только назначением. Вырубкой оформляют наружный контур детали, а пробивкой – внутренний контур (изготовление отверстий).

Вырубку и пробивку осуществляют металлическими пуансоном и матрицей. Пуансон вдавливает часть заготовки в отверстие матрицы. Схема процессов вырубки и пробивки представлена на рис. 3.6.

Основным технологическим параметром операций является радиальный зазор между пуансоном и матрицей $z$. Зазор $z$ назначают в зависимости от толщины ($S$) и механических свойств заготовки, он приближенно составляет (0,05 … 0,1)$S$. При вырубке размеры отверстия матрицы равны размерам изделия, а размеры пуансона на $2z$ меньше их. При пробивке размер пуансона равен размерам отверстия, а размеры матрицы на $2z$ больше их.

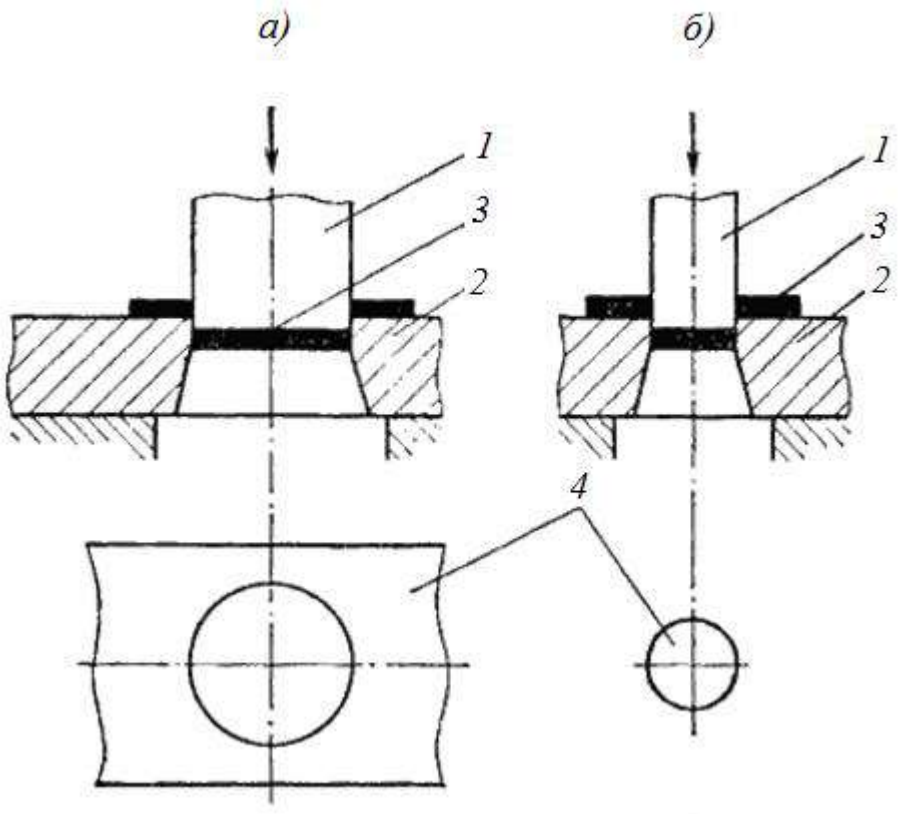



Рис. 3.6. Схема процессов вырубки (*а*) и пробивки (*б*)
*1* – пуансон, *2* – матрица, *3* – изделие, *4* – отход

Уменьшение усилия резания достигается выполнением скоса на матрице при вырубке, на пуансоне – при пробивке.

При штамповке мало- и среднегабаритных деталей из одной листовой заготовки вырубают несколько плоских заготовок для штамповки. Между смежными контурами вырубаемых заготовок оставляют перемычки шириной, примерно равной толщине заготовки. В отдельных случаях смежные заготовки вырубают без перемычек (экономия металла при ухудшении качества среза и снижении стойкости инструмента).

Расположение контуров смежных вырубаемых заготовок на листовом материале называется раскроем. Часть заготовки, оставшаяся после вырубки – высечкой.

Высечка составляет основной отход при листовой штамповке. Тип раскроя следует выбирать из условия уменьшения отхода металла в высечку (рис. 3.7).

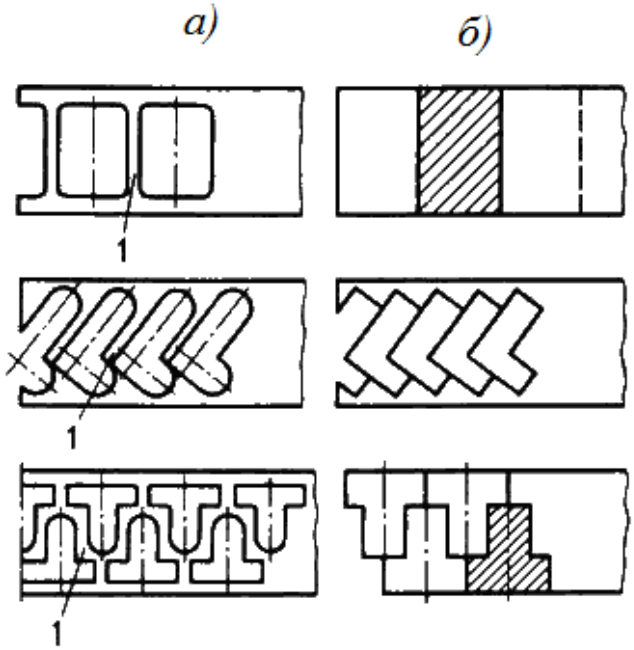



Рис. 3.7. Примеры раскроя материала с перемычками (*а*) и (*б*) без перемычек

Экономия металла может быть получена: уменьшением расхода металла на перемычки, применением безотходного и малоотходного раскроя, повышением точности расчета размеров заготовки и уменьшением припусков на обрезку.

**Порядок выполнения работы**

1. Повторяется материал по темам «Горячая и холодная пластическая деформация. Влияние на структуру и свойства» раздела «Обработка металлов давлением».

2. Просмотр фильма «Холодная объемная и листовая штамповка»
3. Во время просмотра выполняется зарисовка эскизов общего вида инструмента и оборудования, применяемого при холодной объемной и листовой штамповки. **Литература.** См. [1, 2].
4. Отмечаются материалы, используемые для холодной объемной и листовой штамповки, и комплекс движений, выполняемых рабочим при обслуживании оборудования.
5. После просмотра фильма самостоятельно изучается теоретический материал, в котором рассмотрены различные виды холодной объемной и листовой штамповки.
6. Изучаются принципы пластической деформации.
7. Изучить основной закон холодной объемной и листовой штамповки.
8. Составить отчет о проделанной работе.

## Содержание отчета

1. Эскиз схемы выдавливания, схемы объемной штамповки, схемы процессов вырубки и пробивки.
2. Эскизы применяемого инструмента при холодной объемной и листовой штамповке.
3. Указать основные отличия штампов при холодной объемной и листовой штамповке
4. Записать основной закон холодной объемной и листовой штамповки.
5. вывод о достоинствах и недостатках холодной объемной и листовой штамповки, эффективности производства, а главное – стоимость и качество полученной при холодной объемной и листовой штамповки продукции.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАЗОВОЙ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫВ ДВУХ ОПОКАХ

## Цель работы

1. Изучить свойства и состав формовочных и стержневых смесей.
2. Изучить модельно-опочную оснастку, инструменты и приспособления, применяемые при формовке.
3. Изучить технологический процесс изготовления литейной формы.

## Исходные данные

Чертеж детали

## Основные положения

***Литейное производство*** – отрасль машиностроения, производящая литые изделия из различных металлов и сплавов. Сущность его состоит в получении литых заготовок – *отливок* – путем заливки расплавленного металла в литейную форму, полость которой имеет конфигурацию заготовки.

В машинах и промышленном оборудовании около 50 % всех деталей изготавливают литьем. Например, доля литых деталей в кузнечном молоте составляет 90 %, в металлорежущих станках – 80 %, в автомобилях и тракторах – 55 %.

Все способы литья разделяют на две группы:

- Литье в песчано-глинистые формы.
- Специальные способы литья, куда относится литье в металлические формы, литье по выплавляемым моделям, литье под давлением, центробежное литье и другие способы.

Литьем в песчано-глинистые формы изготавливают до 80 % всех отливок.

### *Свойства формовочных смесей*

Для получения отливок высокого качества формовочные смеси, из которых делают разовые литейные формы, должны обладать опре-

деленными свойствами.

***Прочность*** – способность смеси обеспечивать сохранность формы без разрушения при ее изготовлении и при заливке металла.

***Пластичность*** – способность смеси воспроизводить очертание модели.

***Газопроницаемость*** – способность пропускать газы через стенки формы. Газы вытесняются из полости формы при заливке жидкого металла. При недостаточной газопроницаемости в отливке могут образоваться газовые поры.

***Термохимическая устойчивость***, или ***непригораемость***, – способность смеси не взаимодействовать с жидким металлом. Пленки пригара ухудшают качество поверхности отливки и затрудняют последующую обработку на металлорежущих станках.

Формовочная смесь состоит из следующих компонентов:

- Глина (связующее) – 8-10 %
- Кварцевый песок (наполнитель) – 84-88 %
- Каменноугольная пыль (противопригарная добавка) – 0,5-1 %
- Вода – остальное

### *Свойства стержневых смесей*

Стержни служат для образования отверстий в отливках. Они работают в более тяжелых условиях под воздействием расплавленного металла и поэтому должны обладать повышенной прочностью.

Состав стержневой смеси: глина – 4- 6 %, кварцевый песок – 90-92 %, вещества, обеспечивающие дополнительную прочность (сульфидная барда, жидкое стекло или синтетическая смола) – 2-3 %, вода – 3-4 %.

После изготовления стержни подвергаются просушке при 150 – 280°С. При этом смола затвердевает, и стержень приобретает повышенную прочность.

### Технологический процесс изготовления разовой литейной формы

1. В литейном цехе завода изготавливают формовочную и стержневую смеси.

2. В технологическом бюро по чертежу *детали* (рис. 4.1) разрабатывают чертеж *отливки* (см. рис. 4.2).

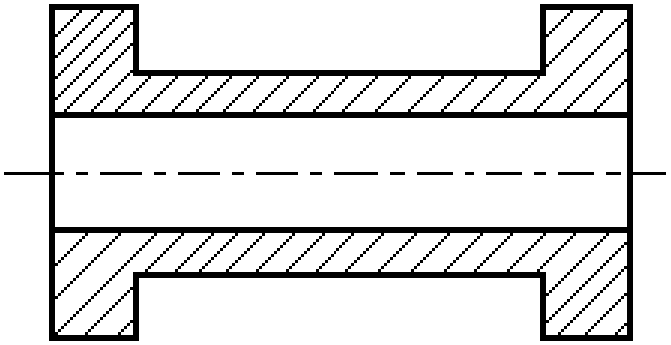


Рис. 4.1. Эскиз детали

При разработке чертежа отливки определяется ***припуск на механическую обработку*** **и** ***припуск на усадку*** **при кристаллизации и охлаждении отливок.** Предусматриваются литейные уклоны, которые служат для удобства извлечения модели из формы без ее разрушения, и ***галтели*** – скругления углов отливки для предотвращения образования трещин в этих местах.

Выбирается линия разъема модели и формы.

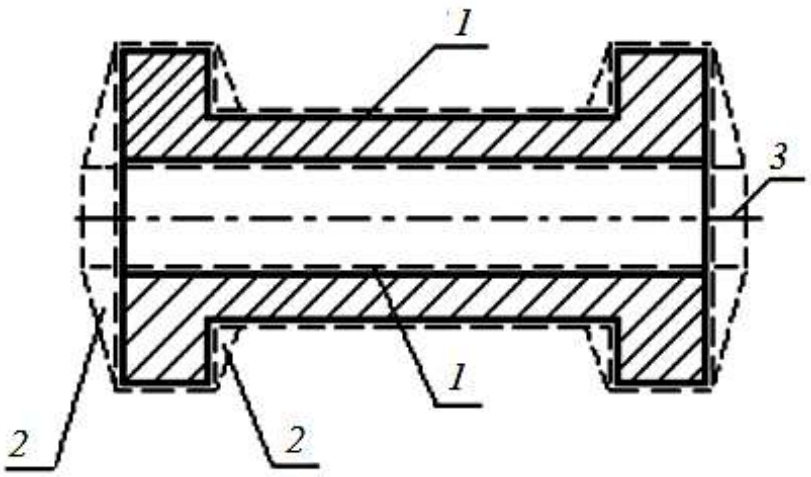



Рис. 4.2. Пример изображения отливки:
*1* – припуск на механическую обработку и усадку; *2* – литейные уклоны;
*3* – плоскость разъема

3. По чертежу отливки в модельном отделении изготавливается *модель* отливки (рис. 4.3) и стержневой ящик.

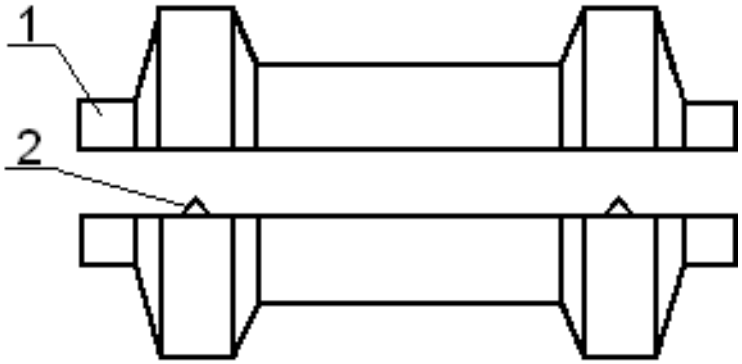



Рис. 4.3. Чертеж модели:
*1* – стержневые знаки; *2* – фиксаторы

4. В полости стержневого ящика из стержневой смеси изготавливается стержень (рис. 4.3).
5.

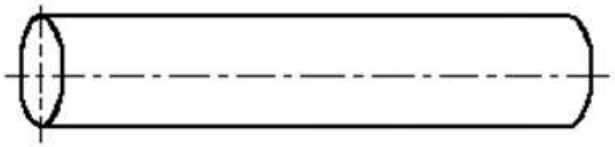


Рис. 4.4. Стержень

**Технология формовки**

5. На подмодельную плиту *4* (рис. 4.5) устанавливается половина модели (без фиксаторов) *3* и ставится нижняя опока *2*. Поверхность модели покрывается тонким слоем модельной пудры (графита) для того, чтобы к ней при формовке не прилипала формовочная смесь. Для удержания пудры на поверхности модели модель смачивают керосином или соляркой. В опоку засыпается формовочная смесь *1* и уплотняется с помощью трамбовок.
6. Готовая полуформа поворачивается на 180°. Устанавливается вторая половина модели по фиксаторам. Устанавливается верхняя опока, и жестко фиксируется взаимное положение опок.

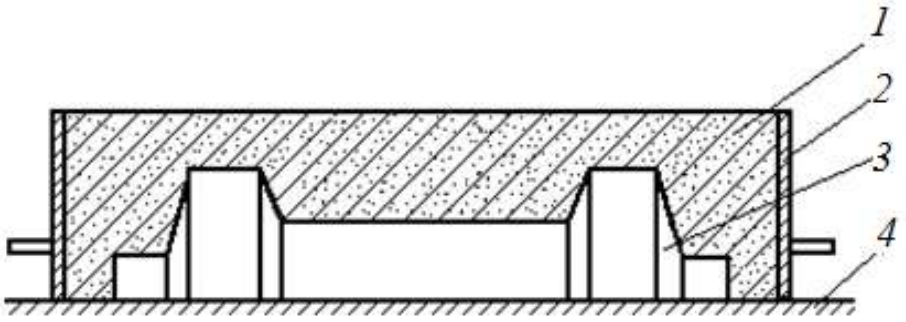



Рис. 4.5. Изготовление нижней полуформы:
*1* – формовочная смесь; *2* – опока; *3* – модель; *4* – подмодельная плита

Разъем литейной формы присыпается песком. Устанавливается модель стояка литниковой системы, производится засыпка и уплотнение формовочной смеси (рис. 4.6).

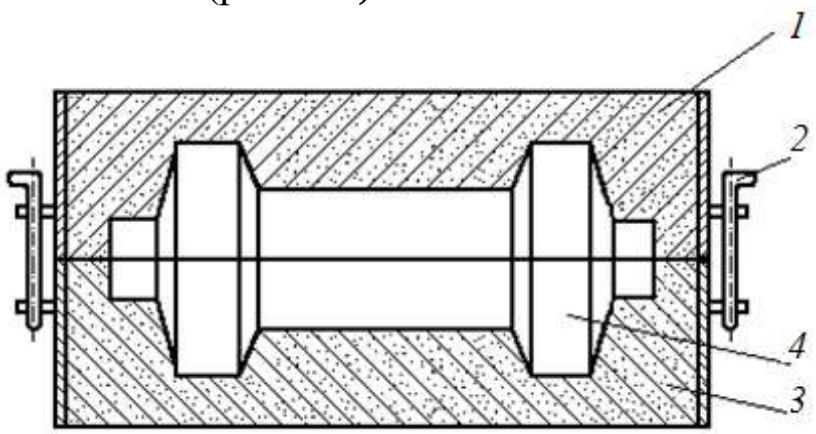



Рис. 6. Изготовление верхней полуформы:
*1* – верхняя опока; *2* – устройство для центрирования опок;
*3* – нижняя опока; *4* – модель

7. Удаляется модель стояка и начинается оформление *литниковой системы* (см. рис. 4.7): прорезается литниковая чаша. Накалываются вентиляционные каналы.
8. Верхняя опока с набитой в ней формовочной смесью снимается с нижней опоки. Удаляется модель. Прорезаются питатель и шлакоуловитель – части литниковой системы.
9. ,Сборка формы. Перед сборкой литейная форма осматривается, заделываются местные разрушения, из полости формы и литниковой системы удаляют частицы формовочной смеси. После укладки стержней верхняя половина формы устанавливается на нижнюю, и форма готова для заливки металла (рис.4.8).

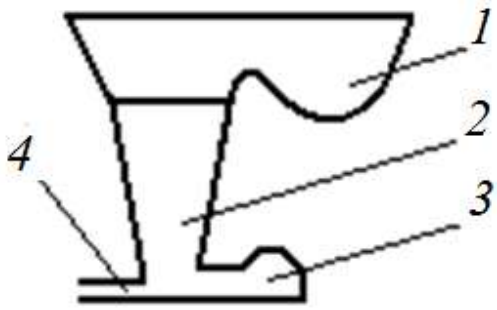



Рис. 4.7. Литниковая система:
*1* – литниковая чаша; *2* – стояк; *3* – шлакоуловитель; *4* – питатель

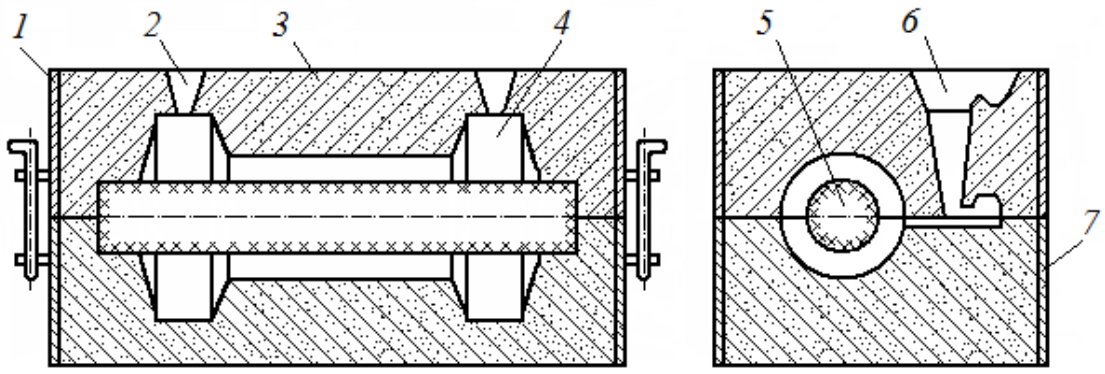



Рис. 4.8. Литейная форма в сборе:
*1* – верхняя опока; *2* – вентиляционный канал (выпор); *3* – формовочная смесь; *4* – полость формы; *5* – стержень; *6* – литниковая система; *7* – нижняя опока

## Содержание отчета

Отчет должен содержать основные данные о формовочных и стержневых материалах и о модельно-опочной оснастке. Особое внимание следует обратить на описание технологического процесса изготовления литейной формы с пояснениями, эскизами операций.

## Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите основные способы литья.
2. Роль литейного производства в машиностроении (примеры).
3. Перечислите свойства формовочной смеси.
4. Что такое прочность и пластичность формовочной смеси?
5. Зачем нужны газопроницаемость и термохимическая устойчивость формовочной смеси?
6. Состав формовочной смеси.
7. Условия работы стержня и состав стержневой смеси.
8. Чем отличается чертеж отливки от чертежа детали?
9. Что такое модель, стержень, опоки? Для чего они нужны?
10. Устройство литниковой системы.
11. Перечислите операции изготовления литейной формы.
12. Из каких частей состоит литейная форма в сборе?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5
## СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ ЛИТЬЯ
## (ЛИТЬЁ В КОКИЛЬ И ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ)

### Цель работы

1. Познакомиться с методами литья: в металлические формы (кокили) и по газифицируемым моделям.
2. Изучить макроструктуру и определить ударную вязкость отливок, полученных литьём в кокиль и литьём по газифицируемым моделям.

### Материалы и оборудование

1. Заливаемый сплав – силумин (сплав алюминия с кремнием).
2. Формовочная смесь.
3. Кокиль – металлическая литейная форма.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с основными сведениями по литью в кокиль и по газифицируемым моделям.
2. Выполнить экспериментальную часть.
3. Проанализировать полученный материал и сделать необходимые выводы.

### Основные положения

#### *1. Литьё в металлическую форму (кокиль)*

***Кокиль*** – металлическая литейная форма, которая обеспечивает высокую скорость кристаллизации металла и формирования отливки. Кокиль изготавливают из чугуна, стали и других сплавов.

Способ литья в кокиль имеет преимущества перед литьём в песчаные формы. Кокили выдерживают большое число заливок (от нескольких сот до десятков тысяч) в зависимости от заливаемого в них сплава: чем ниже температура заливаемого сплава, тем больше их стойкость. При этом способе исключается применение формовочной

смеси, повышаются технико-экономические показатели производства, улучшаются санитарно-гигиенические условия труда.

Высокая теплопроводность кокиля ускоряет процесс кристаллизации сплава и способствует получению отливок с высокими механическими свойствами. Высокая прочность металлических форм позволяет многократно получать отливки одинаковых размеров с небольшими припусками на механическую обработку. Минимальное физико-химическое взаимодействие металла отливки и формы повышает качество поверхности отливки.

К недостаткам этого способа литья относится высокая трудоёмкость изготовления и стоимость кокилей.

Существует опасность образования внутренних напряжений в отливке из-за отсутствия податливости металлической формы. В поверхностном слое кокильных чугунных отливок образуется структура цементита, что затрудняет их механическую обработку, поэтому необходима термическая обработка (отжиг) отливок.

В кокилях получают 45 % всех алюминиевых и магниевых отливок, 6 % стальных отливок, 11 % чугунных отливок. Этот способ литья экономически целесообразен в серийном и массовом производстве.

В зависимости от конфигурации и размеров отливки металлические формы делятся на неразъёмные и разъёмные.

В **неразъёмных формах** вся отливка целиком получается в одной форме (типа чашки). На рис. 5.1 изображена неразъёмная вытряхиваемая форма. Ее применяют для получения простых отливок,

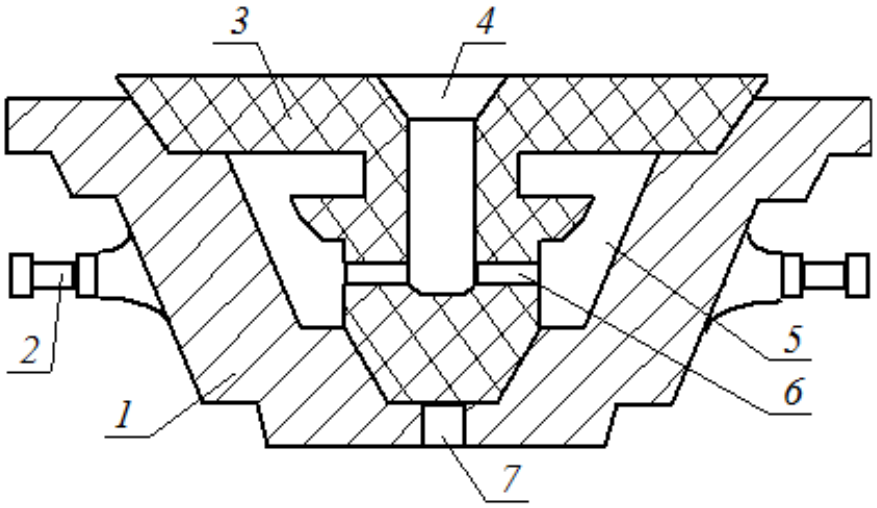



Рис. 5.1. Вытряхиваемая неразъёмная форма:
*1* – корпус формы, *2* – цапфа для поворота формы при выбивке отливки, *3* – песчаный стержень, *4* – литниковая чаша со стояком, *5* – полость формы, *6* – питатели, *7* – вентиляционный канал

имеющих достаточные уклоны на боковых стенках (плиты, коробки и т. п.).

Внутреннюю и внешнюю поверхности отливки в неразъёмном кокиле формируют при помощи стержней. Литниковая система делается внутри стержня. Такие металлические формы обычно закрепляются при помощи цапфы на специальных стойках. После заливки производится поворот формы на 180° и удаляется (вытряхивается) отливка вместе со стержнем.

***Разъёмные формы*** состоят из двух или более частей и, в свою очередь, разделяются на формы с горизонтальной, вертикальной и комбинированной плоскостями разъёма (см. рис. 5.2, 5.3).

Металлическую форму с горизонтальным разъёмом (рис. 5.2) применяют для таких же отливок, как и в неразъёмной форме, но с более сложной верхней поверхностью, образуемой рабочей частью верхней половины формы.

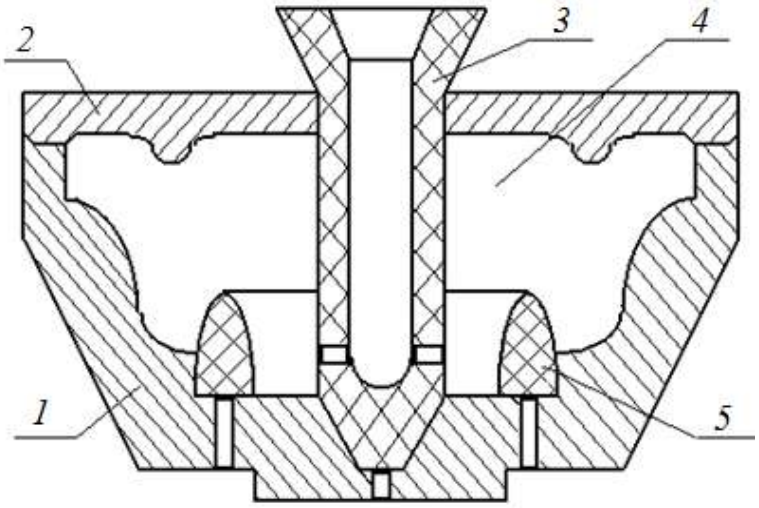



Рис. 5.2. Кокиль с горизонтальным разъёмом:
*1* – нижняя часть формы, *2* – верхняя часть формы, *3* – центральный песчаный стержень, *4* – полость формы, *5* – нижний кольцевой стержень

Металлические формы с вертикальным разъёмом (рис. 5.3) применяют для изготовления более разнообразных и сложных отливок (корпусные детали, литые блоки цилиндров автомобильных двигателей, крупные поршни, крышки с массивными фланцами и т. д.). Металлические формы с комбинированным разъёмом применяют для отливки сложных по конфигурации деталей. Внутреннюю конфигурацию и отверстия в отливках получают с помощью стержней, песчаных или металлических.

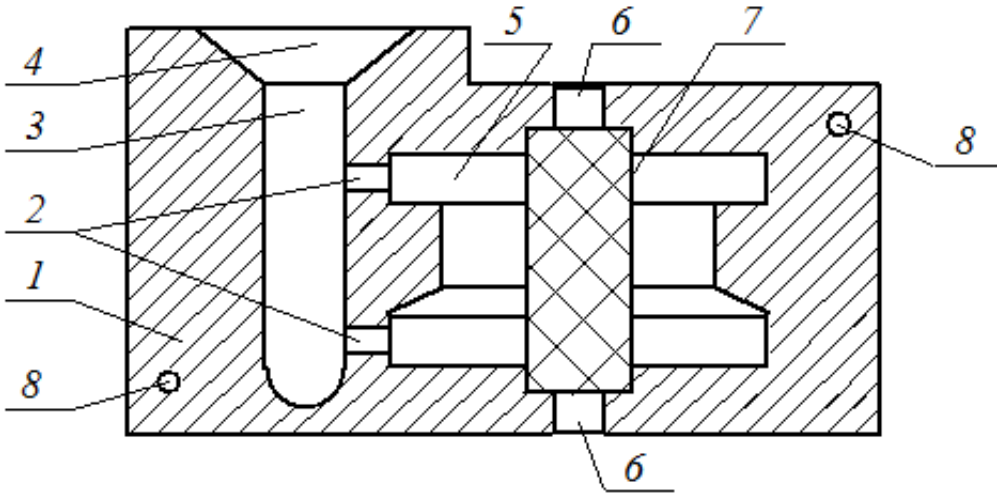



Рис. 5.3. Металлическая форма с вертикальным разъёмом, с песчаным стержнем: *1* – левая половина формы, *2* – каналы-питатели, *3* – стояк литниковой системы,*4* – литниковая воронка, *5* – полость формы, *6* – вентиляционные каналы,*7* – песчаный стержень, *8* – центрирующие отверстия

Песчаные стержни применяют для отливок из стали и чугуна. Они обладают повышенной податливостью, газопроницаемостью и огнеупорностью. Однако чистота внутренней поверхности отливок хуже, чем при применении металлических стержней.

Металлические стержни применяют для сплавов с низкой температурой плавления, таких как алюминиевые, магниевые и др. Металлические стержни, не обеспечивающие свободной усадки отливки при охлаждении, обычно удаляются из отливки сразу после затвердевания, т. е. перед выбивкой всей отливки из формы. Для удаления газов из кокиля по линии разъёма изготавливают газовые каналы и выпоры. Газовые каналы делают обычно глубиной 0,2-0,5 мм. Через такие каналы не вытекает жидкий сплав, но легко удаляются газы.

Чтобы уменьшить скорость охлаждения отливок, избежать образования упрочнённого слоя на их поверхности и повысить стойкость кокиля, на его рабочую поверхность наносят теплоизоляционные покрытия. Их приготовляют из одного или нескольких огнеупорных материалов (кварцевой пыли, молотого шамота, графита, мела, талька и др.) и связующего материала (жидкого стекла, сульфидного щёлока и др.).

Механизировать и автоматизировать процесс кокильного литья легче, чем процесс литья в песчаные формы. Для механизации применяют кокильные машины – однопозиционные и карусельные. В этих машинах автоматизируют следующие технологические операции: открывания и закрывания кокилей, установку и удаление метал-

лических стержней и выталкивание отливки из кокиля.

В металлических формах получают отливки чугунные от 10 г до 15 т, стальные от 0,5 г до 5 т и из цветных металлов (медных, алюминиевых, магниевых) от 4 г до 400 кг.

### *2. Литьё по газифицируемым моделям*

Очень часто возникает необходимость в разовых, единичных отливках тех или иных деталей. В этих случаях по традиционной технологии приходится предварительно делать деревянные модели для получения наружного отпечатка в литейной форме и стержневые ящики для образования внутренних полостей отливки. Трудоёмкость изготовления модельных комплектов в три – пять раз превышает трудоёмкость изготовления самой отливки. Для её уменьшения и снижения себестоимости разовых отливок новаторы судостроительной верфи г. Николаева предложили делать модели не из дерева, а из пенополистирола, который газифицируется расплавленным металлом. В последние годы использование пенополистирола в качестве модельного материала получает всё большее распространение. Использование пенополистирола (пенопласта) обеспечивает возможность получения различных отливок в неразъёмных формах без извлечения модельных комплектов из форм, без формовочных уклонов и с минимальными припусками на механическую обработку (рис. 5.4).

***Пенополистирол*** – материал легко формирующийся, а это значит, что из него можно изготовить модели сложной конфигурации.

При литье по газифицируемым моделям для изготовления моделей применяется бисерный пенополистирол в виде гранул, в замкнутых ячейках которых содержится порошкообразный наполнитель (легкоплавкий компонент).

При этом для газифицируемых моделей (рис. 5.5) применяют пенополистирол с объёмной массой 0,015-0,025 г/см$^3$. Пенополистирол с б***о***льшим удельным весом не содержит количества воздуха, необходимого для его сжигания, такой пенополистирол лишь расплавляется, не сгорая, тем самым заполняет часть формы и приводит к браку при отливке детали. Пенополистирол с меньшим удельным весом при формовке деформируется, что приводит к искажению формы и размеров отливки.

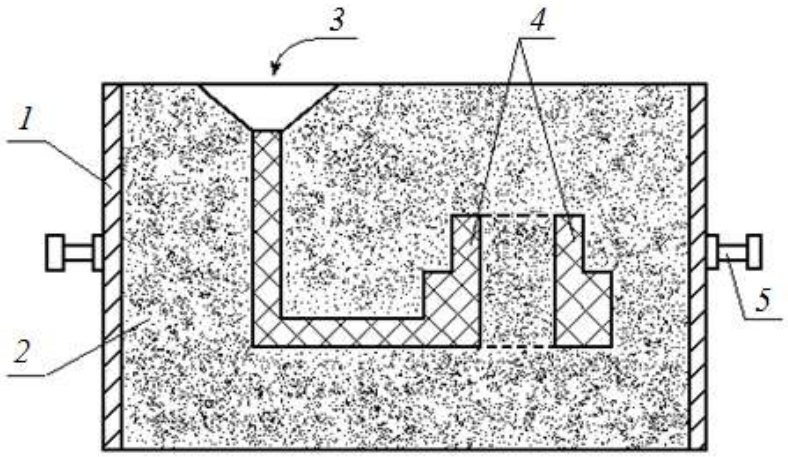



Рис. 5.4. Неразъёмная форма с пенополистироловой моделью:
*1* – опока, *2* – формовочная смесь, *3* – расплавленный сплав,
*4* – модель из пенополистирола (пенопласта), *5* – цапфы

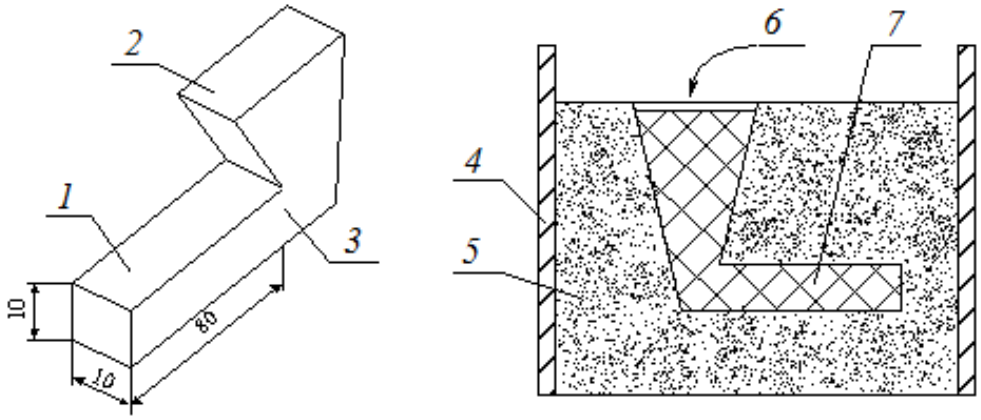



Рис. 5.5. Пенополистироловая модель для изготовления испытуемого образца и её расположение в опоке:
*1, 7* – пенополистироловая модель, *2* – литниковая система, *3* – линия отрезки литниковой системы от детали, *4* – опока, *5* – формовочная смесь,
*6* – заливка расплавленного металла

Применение пенополистироловых моделей сокращает трудоёмкость формовочных работ на 80 %, объём обрубных и зачистных работ на 70 %. Достоинство пенополистироловых моделей – их способность не усыхать и не набухать от влаги. Это исключает коробление при транспортировке и, особенно, хранении. При отливке деталей сложной конфигурации внешних и внутренних обводов, модель может быть изготовлена частями, которые собираются во время формовки.

К недостаткам литья по газифицируемым моделям нужно отнести, прежде всего, большое выделение газа при сгорании модели, что при неправильном ведении заливки (заливка должна вестись с опре-

делённой скоростью) и при плохой газопроницаемости формовочной смеси ведёт к образованию газовых пор в отливках, уменьшающих их прочность.

Другим существенным недостатком пенопластовой модели является потеря точности при уплотнении формовочной смеси из-за податливости пенополистирола. Решить эту проблему можно с помощью электромагнитного поля и замены формовочной смеси железными опилками. На дно опоки, вставленной внутрь соленоида, присоединённого к сети переменного тока, насыпают слой железного порошка, ставят на него пенопластовую модель с литниковой системой и засыпают её доверху тем же железным порошком (опилками), затем включают ток, превращающий железный порошок в монолит, и заливают расплавленный металл, мгновенно сжигающий пенопласт. Как только отливка чуть затвердеет, ток выключают, и форма вновь становится порошком.

На установке успешно отливались магниевые блоки для автомобильных двигателей, причём качество не уступало кокильному литью. Отсутствие дорогостоящих кокилей, простота и универсальность магнитных форм с использованием газифицируемых моделей позволили снизить себестоимость продукции ровно вдвое.

## Задание и методические указания по выполнению работы

1. Подготовить кокиль под заливку. Для этого необходимо зачистить внутреннюю полость кокиля от пригаров, окалины и старой огнеупорной смазки, а затем смазать полость кокиля огнеупорной смазкой. Собрать половинки кокиля и прогреть до 100–300°С.

2. Подготовить формовочную смесь для формовки. Для этого её необходимо разрыхлить, удалить металлические включения в виде капель и приливов. Формовочная смесь должна быть совершенно сухой.

3. Заформовать пенопластовые модели в формовочную смесь.

4. Проследить за заливкой металла, выполняемой мастером, и за остыванием отливок, засекая время по часам.

5. Отделённые от литниковой системы образцы подвергнуть испытанию на ударную вязкость с помощью маятникового копра и результаты свести в таблицу. Объясните причины различия результатов испытаний ударной вязкости.

## Содержание отчёта

1. Цель работы.
2. Материалы и оборудование.
3. Описать (кратко) способы литья в кокиль и по газифицируемым моделям (обязательно включить в отчёт рис. 4, 6).
4. Краткий вывод по результатам работы.

## Вопросы для самоконтроля

1. Что такое кокиль и для чего он предназначен?
2. Какие преимущества у литья в кокиль по сравнению с литьём в песчаные формы?
3. Какие недостатки имеет литьё в кокиль?
4. Назовите область применения кокильного литья.
5. Какими бывают металлические формы в зависимости от конфигурации и размеров отливки?
6. В каких формах вся отливка целиком получается в одной форме (типа чашки)?
7. Для чего нужны цапфы?
8. Какие виды разъёмных форм вы знаете?
9. Для изготовления каких отливок применяют металлические формы с горизонтальным разъёмом?
10. Для изготовления каких отливок применяют кокили с вертикальным разъёмом?
11. Что такое стержень, и для чего он служит?
12. Какие виды стержней вы знаете, и для чего они применяются?
13. Что такое газовые каналы и выпоры, и для чего они применяются?
14. Что такое теплоизоляционные покрытия, из чего они состоят и для чего служат?
15. Что такое газифицируемая модель?
16. Каковы преимущества литья по газифицируемым моделям в сравнении с литьём в песчаные формы?
17. Каковы недостатки литья по газифицируемым моделям в сравнении с литьём в песчаные формы?
18. Какой плотности пенополистирол применяется при изготовлении газифицируемых моделей?
19. Что произойдёт, если плотность пенополистирола будет больше или меньше, чем необходимо для нормального процесса литья?

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6.
# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОТЛИВОК

## Цель работы

1. Ознакомиться с основными приёмами проектирования литых деталей.

2. Разработать на основе чертежа детали конструкцию отливки и необходимую технологическую оснастку для изготовления песчано-глинистой формы в двух опоках.

## Основные положения

В настоящее время основными технологическими процессами получения заготовок деталей машин из металлов и сплавов являются различные способы литья. Наиболее часто применяется метод ***литья в песчано-глинистые разовые формы***. Литейная форма изготавливается обычно в двух опоках. При проектировании формы необходимо соблюдать **основные правила**:

1. Правило расположения отливки в форме с наименьшей высотой;
2. Правило параллельных лучей;
3. Правило вписанных окружностей;
4. Правило назначения галтелей;
5. Правило минимума стержней;
6. Правило необходимости уклонов;
7. Рекомендации по выбору плоскости разъёма.

Когда отливка имеет значительную длину и малое поперечное сечение, то целесообразно располагать её **с наименьшей высотой полости формы** (рис. 6.1). Малая высота формы (рис. 6.1, *б*) экономит формовочный материал. Кроме того, происходит выравнивание механических свойств по сечению отливки из-за малого влияния ликвации по удельному весу.

*Ликвация* – расслоение компонентов сплава по удельному весу в период остывания расплава. Легкие фракции стремятся вверх, тяжёлые – вниз; поэтому при расположении, показанном на рис. 6.1, *а*, возникает разность механических свойств верхней и нижней частей отливки.

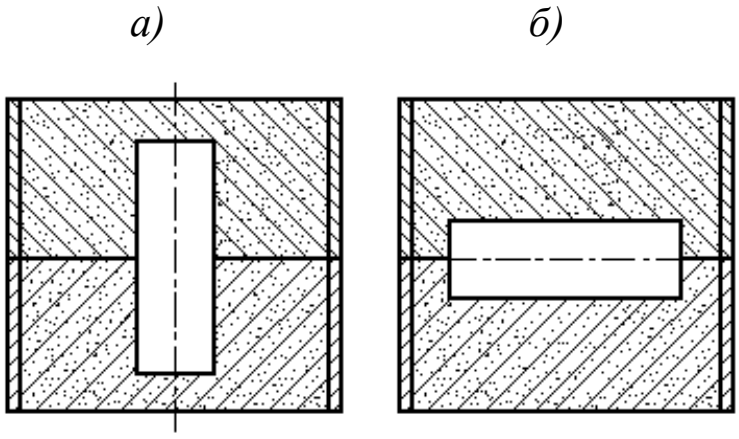



Рис. 6.1. Варианты литейной формы:
*а* – с вертикальным, *б* – с горизонтальным расположением оси отливки

Поэтому детали, у которых один габаритный размер гораздо больше других, выгодно располагать так, чтобы максимальный размер лежал в горизонтальной плоскости, как показано на рис. 6.2, *а*. Детали с примерно одинаковыми габаритными размерами можно располагать как вертикально (рис. 6.2, *б*), так и горизонтально (рис. 6.2, *в*).

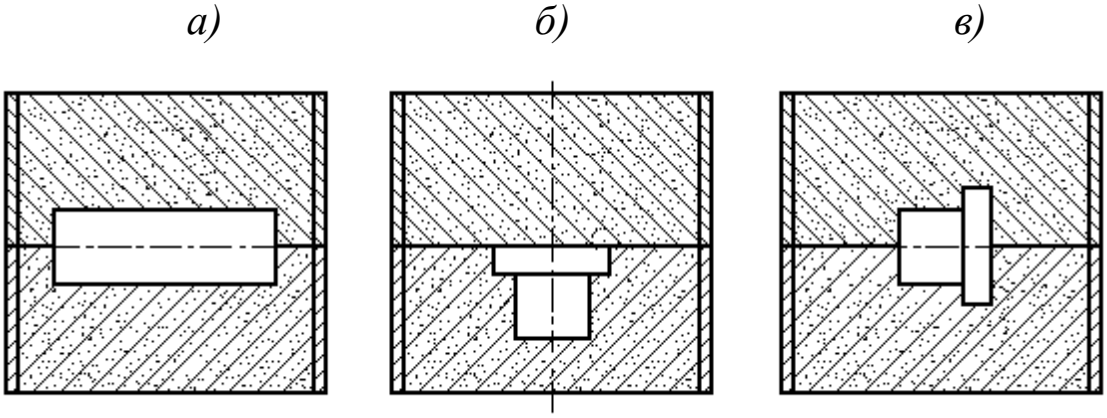



Рис. 6.2. Варианты расположения отливки в литейной форме

От расположения отливки будет зависеть конфигурация внешних обводов. Если необходимо отлить длинный корпус электродвигателя, имеющий рёбра охлаждения (рис. 6.3), то для лёгкого извлечения модели из формы по **правилу параллельных лучей** части отливки не должны давать затенённых участков при направлении на форму параллельных лучей снизу и сверху. Это правило также называют методом теневого рельефа. Мы видим, что на рис. 6.3, *а* это правило не соблюдается, значит, необходимо или изменить конфигурацию рёбер – сделать их параллельными лучам (рис. 6.3, *б*), или поменять расположение отливки на вертикальное.

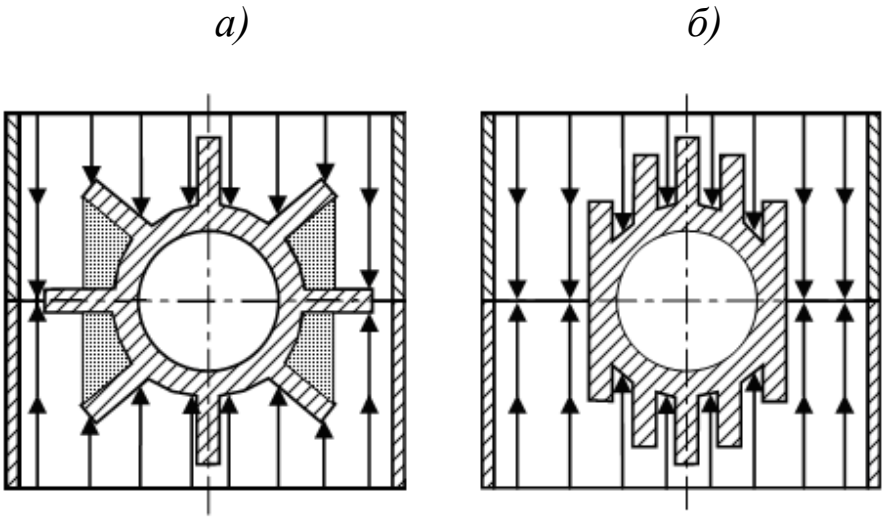



Рис. 6.3. Использование правила параллельных лучей

Вертикальное расположение оси пустотелой отливки в форме выгодно ещё и тем, что стержень, формирующий полость или отверстие в отливке, может иметь 2 и более опоры (рис. 6.4, *б*), т. е. занимает более устойчивое положение в форме, чем при горизонтальном расположении оси (рис. 6.4, *а*).

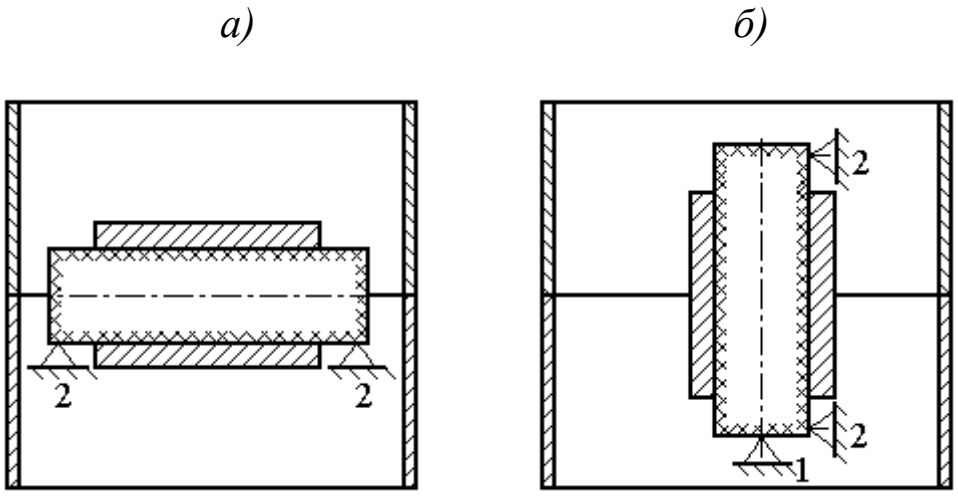



Рис. 6.4. Варианты расположения пустотелой отливки

В основу конструкции литой детали в зависимости от требований должны быть положены принципы направленного или одновременного затвердевания при охлаждении. Направленное затвердевание обеспечивает получение отливок плотных, без усадочных раковин и пористости. Однако это приводит к усложнению формовки. При ***направленном затвердевании*** кристаллизация металла происходит снизу вверх, начиная от тонких сечений отливки в нижней части

формы к более массивным сечениям в верхней части формы. Каждая расположенная выше часть отливки питает жидким металлом нижние части, являясь для них как бы прибылью. Правильность конструкции в этом случае проверяют **методом вписанных окружностей**. При этом окружность, вписанная в любое сечение отливки, должна свободно проходить по любым вышележащим сечениям в направлении кристаллизации (рис. 6.5, *а*).

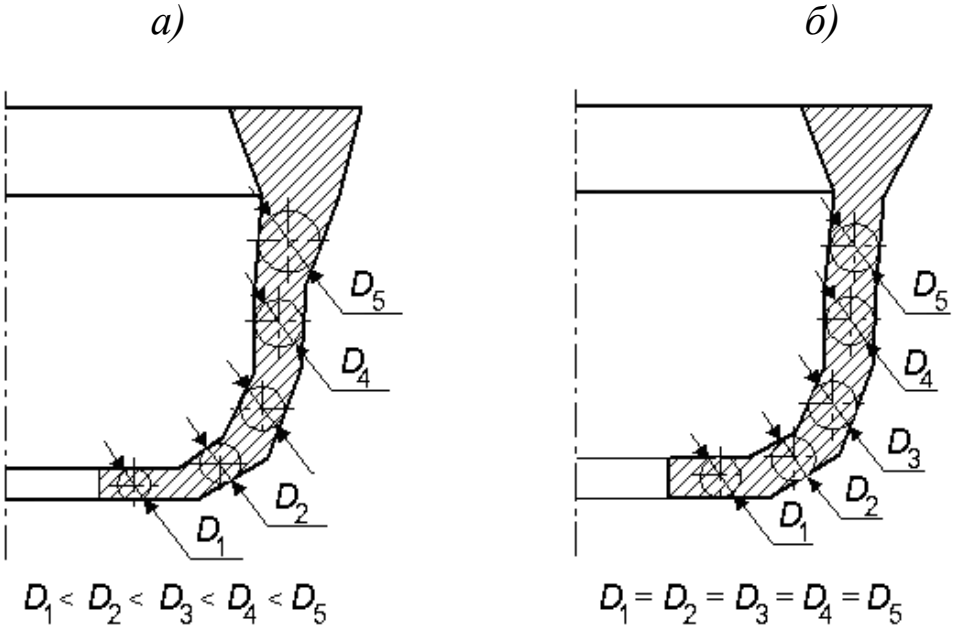



Рис. 6.5. Применение метода вписанных окружностей

Конструирование в соответствии с принципом одновременного затвердевания при охлаждении применяют для мелких и средних тонкостенных отливок, когда к литой детали не предъявляют высоких требований по плотности. Наличие центральной пористости допускается. Отливки, сконструированные с учётом принципа одновременного затвердевания, имеют одинаковую толщину, начиная с нижней и кончая верхней частью детали (рис. 6.5, *б*).

Толщина стенок литых деталей назначается, исходя из требуемой расчётной прочности с учётом жидкотекучести металла. При сопряжении стенок применяют *галтели* (радиусы внутренних закруглений), рис. 6.6.

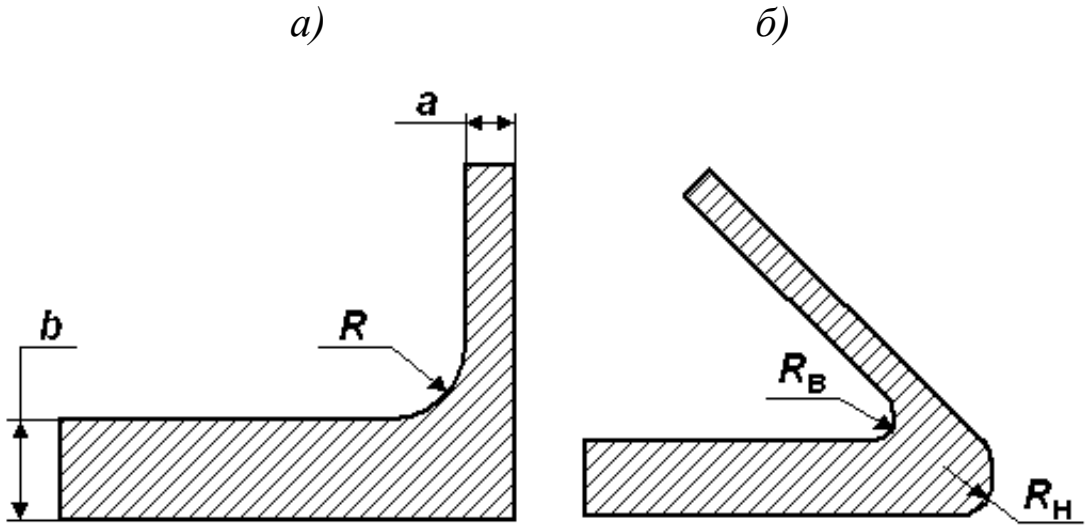



Рис. 6.6. Галтели при сопряжении стенок разной толщины

Галтели применяются для предупреждения образования трещин в углах сопряжения стенок. Радиус галтели (рис. 6.6, *а*) рассчитывается по формуле

$$R = (a + b)/2. \quad (1)$$

Соотношение толщин сопрягаемых стенок отливки не должно превышать двух.

$$b/a \le 2. \quad (2)$$

При угловых сопряжениях стенок для получения плавного перехода делают скругление с внешним радиусом (рис. 6.6, *б*), рассчитанным по формуле

$$R_н = a + b. \quad (3).$$

Внутренние полости и отверстия изготавливают с помощью стержней и «болванов». Внешняя конфигурация стержней повторяет внутренние обводы полости отливки. Стержни изготавливаются в стержневых ящиках. Для образования полостей сложной конфигурации применяют сборные стержни, состоящие из нескольких простых частей (рис. 6.7, *а*). Однако в форме должно быть **как можно меньше стержней**. Если вместо двух стержней *1* и *2* (рис. 6.7, *а*) использовать один стержень 3 (рис. 6.7, *б*), то у него будет три фиксированные точки опоры, в то время как в первом варианте – две и одна точка опоры. Кроме того, увеличение количества стержней усложняет и удорожает технологический процесс изготовления литейной формы и снижает точность отливки.

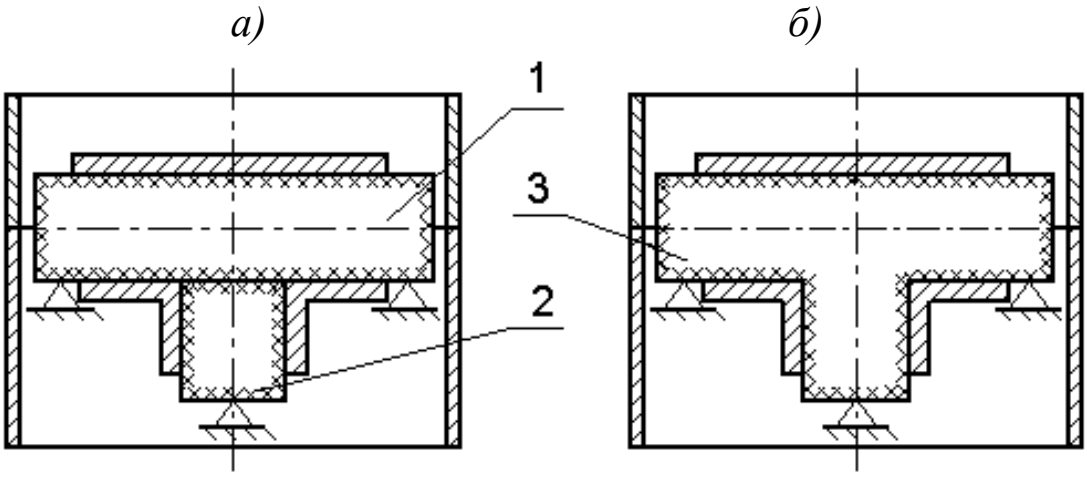



Рис. 6.7. Применение правила минимума стержней

Стержни, применяемые при изготовлении глухих полостей отливки, имеют всего одну опору, и поэтому могут потерять устойчивость. При сборке они могут упасть в полость формы, что приведёт к засорению расплава и нарушению конфигурации формы. Для устойчивости одноопорных стержней изготавливается искусственная опора *2* (жеребейка), которая устанавливается между стержнем *1* и стенками формы (рис. 6.8).

*Жеребейка* – металлический стержень, имеющий химический состав, близкий по составу к сплаву, из которого отливается деталь. Применение жеребеек крайне нежелательно, так как они являются источниками образования дефектов в отливках (газовые раковины, несвариваемость).

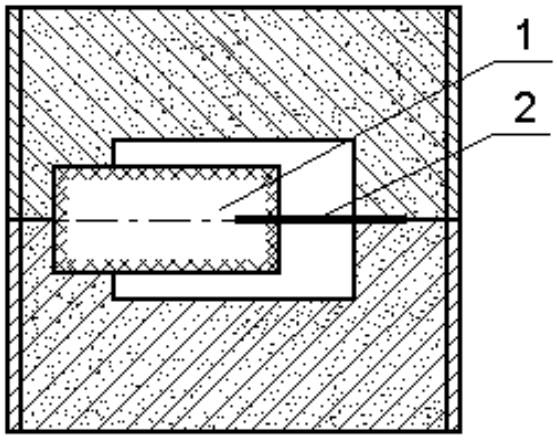



Рис. 6.8. Применение жеребейки в литейной форме

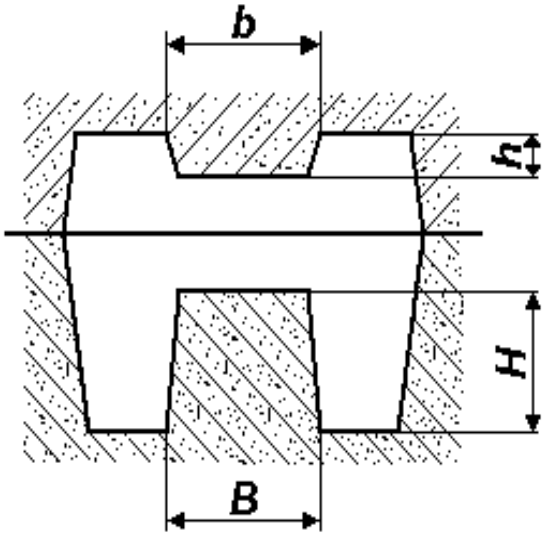



Рис. 6.9. Применение «болванов» для выполнения полостей отливки

Иногда для получения глухих (несквозных) отверстий вместо стержней применяют «болваны». Они дают возможность изготавливать форму без стержней, выполняя их функции. *Болван* – часть формы, не выступающая за плоскость разъёма. Высота внутренней полости, выполняемой «болваном» в нижней части формы не должна превышать ширину или диаметр её сечения $H \leq B$ (рис.6.9). Если же внутренняя полость выполняется «болваном» в верхней части формы, то $h \leq 0{,}3b$.

Положение стержня должно быть строго зафиксировано в полости формы. Для этого предусматриваются стержневые (литейные) знаки, как продолжения отверстий. В местах отверстий у детали модель имеет выступающие части (рис. 6.10, *1*) для получения в форме так называемых литейных знаков (рис. 6.10, *2*).

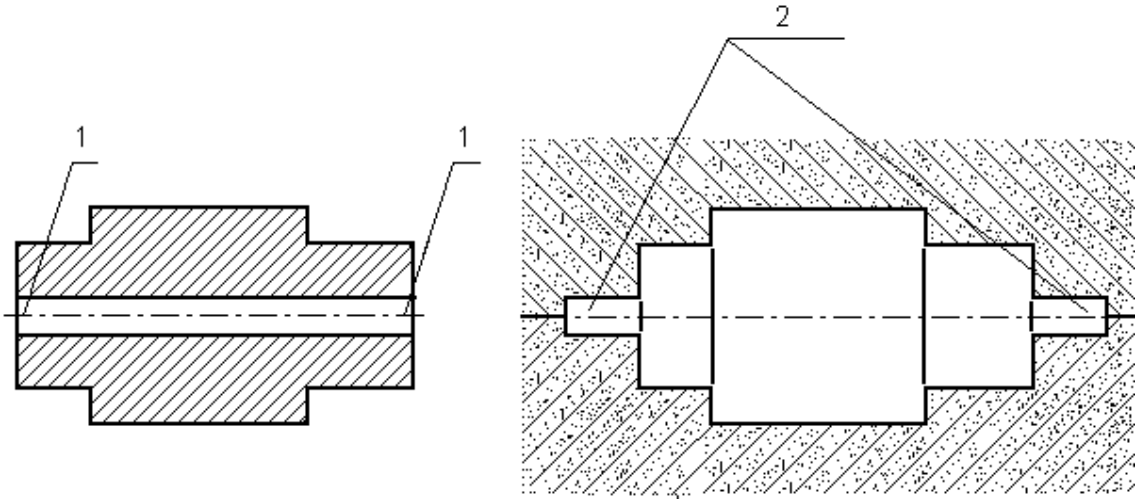



Рис. 6.10. Деталь и литейная форма для её получения

Для лучшего извлечения моделей из формы их вертикальным поверхностям задаются *формовочные уклоны* (рис. 6.11). Величина уклонов может составлять до 3° в зависимости от высоты модели. Формовочные уклоны задаются также моделям «болванов» и знаковым частям стержней (до 15°).

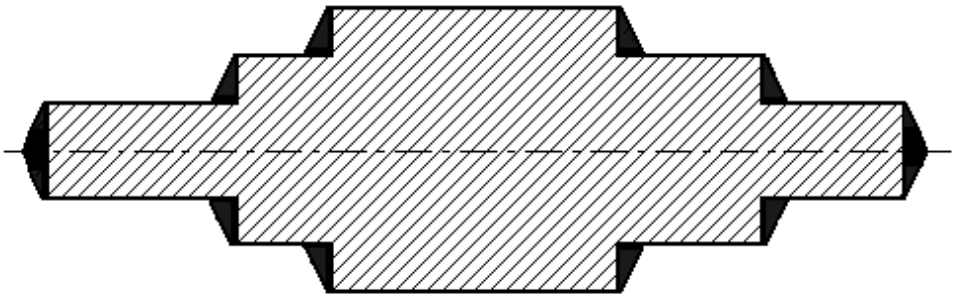


Рис. 6.11. Применение формовочных уклонов

Модель отливки выполняется в соответствии со всеми этими правилами; кроме того, учитываются припуски на механическую обработку и усадку (рис. 6.12, область 1).

*Припуск на механическую обработку* – слой металла, предусмотренный для снятия в процессе механической обработки с целью получения необходимой точности размеров и шероховатости поверхностей. Он зависит от материала отливки, способа литья, объёма производства, положения обрабатываемой поверхности в форме.

*Припуск на усадку* – слой металла компенсирующий уменьшение объема отливки во время кристаллизации и остывания. Он зависит от величины усадки применяемого сплава.

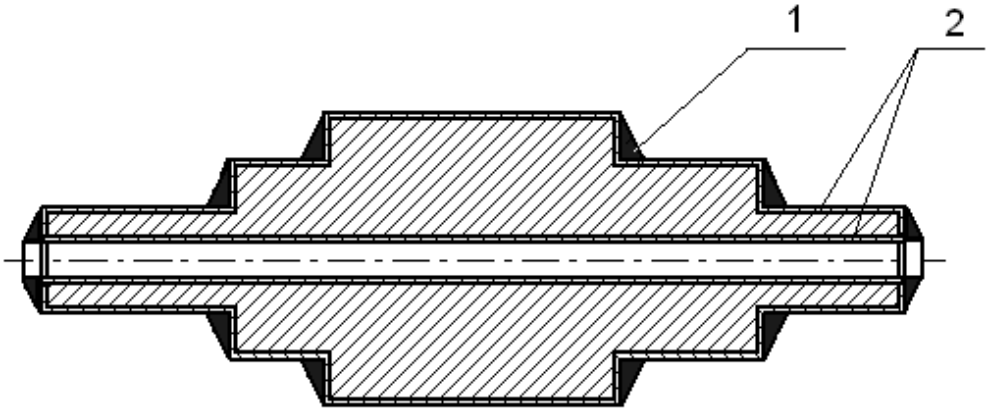



Рис. 6.12. Припуски на механическую обработку и усадку

Для облегчения формовки внутренней полости модель делится плоскостями разъёма, чаще всего на две части. **Плоскость разъёма обычно совпадает с одной из осей симметрии отливки.** Этим достигается выполнение правила параллельных лучей и экономия литейных материалов за счёт меньших затрат металла на изготовление уклонов.

Литниковая система к отливке подводится в плоскости разъёма формы. Определение размеров элементов литниковых систем для отливок из различных сплавов производится с помощью соответствующих диаграмм и эмпирических формул. С учётом массы расплавленного металла и скорости заливки определяется площадь поперечных сечений питателей, шлакоуловителя и стояка.

Иногда, для исключения образования при кристаллизации усадочных раковин в сложных отливках, в форме выполняется дополнительная ёмкость, в которой находится жидкий металл. Эта ёмкость называется *прибылью* (рис. 6.13, 1). Она соединена с полостью формы и питает отливку жидким расплавом по мере усадки металла в форме. Прибыль устанавливается в том месте формы, где расположен наибольший объём жидкого металла. При необходимости использования прибылей по эмпирическим формулам (в зависимости от размеров питаемого узла) определяется длина и ширина основания прибыли и её высота.

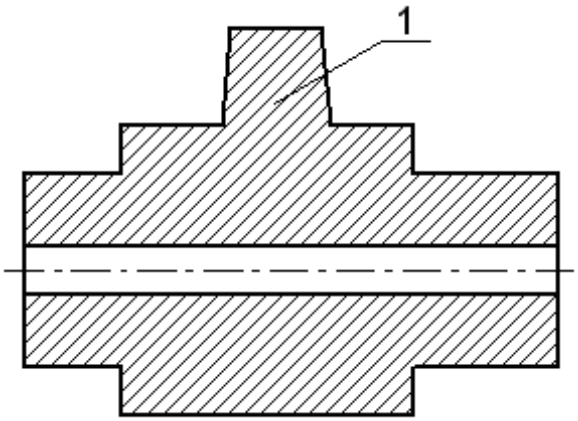



Рис. 6.13. Прибыль и место её расположения в форме

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с общими положениями конструирования отливок.

2. В соответствии с полученным заданием изобразить эскиз готовой детали (рис. 6.14, *а*).

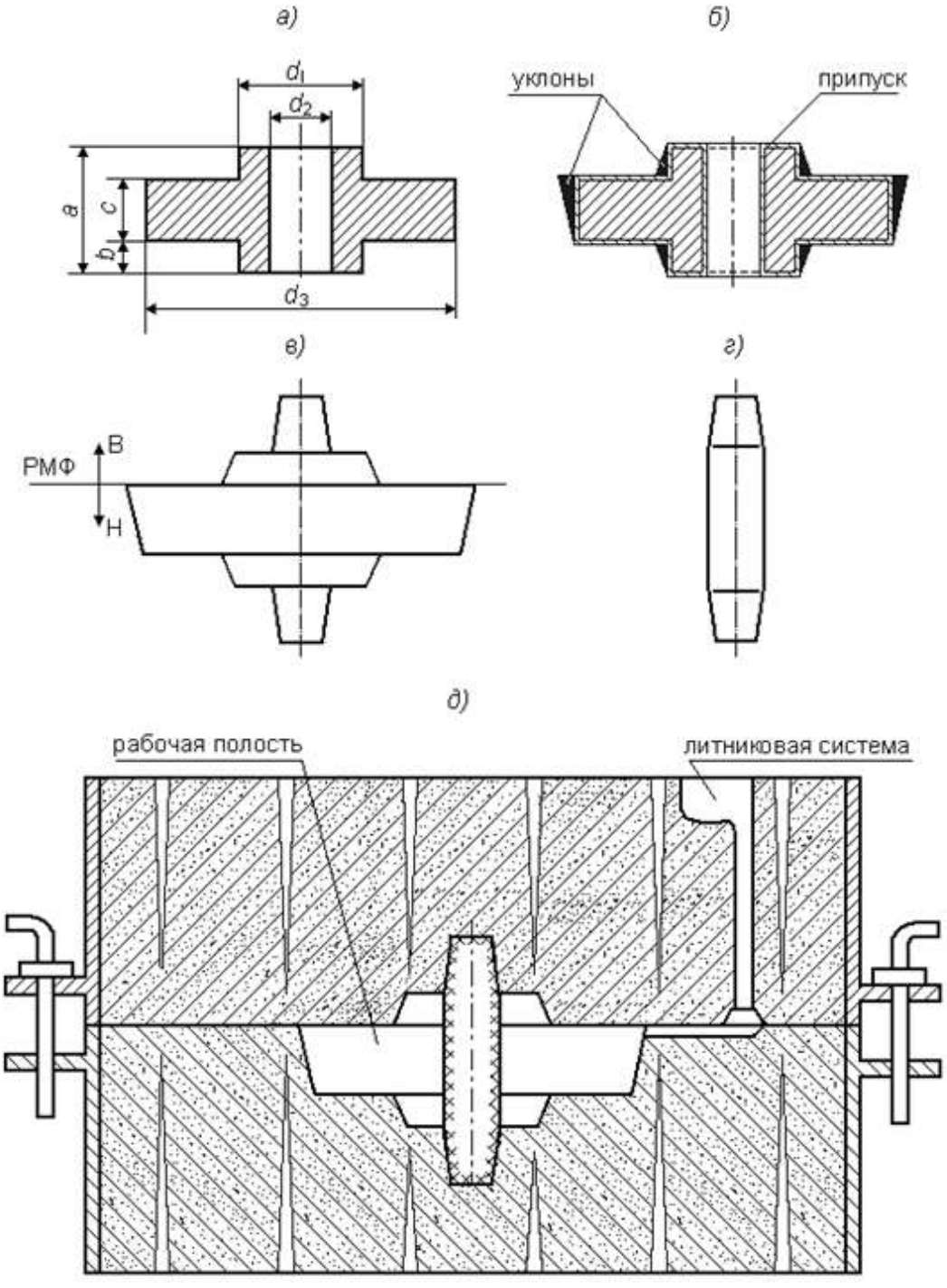



Рис.6.14. Пример выполнения задания
*а)* эскиз детали; *б)* эскиз отливки; *в)* эскиз модели;
*г)* эскиз стержня; *д)* вертикальный разрез литейной формы

3. Выбрать положение отливки в форме при заливке, определить конфигурацию модели и стержня (стержней), задать поверхность разъёма модели и формы с использованием правила параллельных лучей.

4. Изобразить эскиз отливки с учётом припуска на механическую обработку (припуск назначать только на поверхности, связанные размерами), формовочных уклонов и закруглений (рис. 6.14, *б*).

5. Изобразить эскиз модели, указать поверхность разъёма (РМФ), выделить стержневые знаки (рис. 6.14, *в*).

6. Изобразить эскиз стержня (стержней), с учётом уклонов стержневых знаков (рис. 6.14, *г*), продумать конструкцию стержневого ящика.

7. Изобразить вертикальный разрез литейной формы с указанием рабочей полости и литниковой системы (рис. 6.14, *д*).

Пример выполнения задания приведён на рис. 6.14.

## Примечания:

1. Формовка должна выполняться в двух опоках.

2. Не допускается применение напусков, т. е. назначение дополнительных объёмов металла для упрощения конфигурации деталей.

## Содержание отчета

1. Цель работы

2. Основные правила проектирования отливок.

3. Этапы конструирования разовой песчано-глинистой формы в соответствии с индивидуальным заданием.

4. Продольный и поперечный разрезы формы с присоединённой литниковой системой.

## Вопросы для самоконтроля

1. Назовите преимущества расположения отливки в форме с наименьшей высотой полости формы.

2. Что такое ликвация?

3. Для чего применяют правило параллельных лучей?

4. Назовите преимущества и недостатки конструкции литой детали, выполненной в соответствии с принципом направленного затвердевания.

5. Какие литые детали выполняются в соответствии с принципом одновременного затвердевания при охлаждении и почему?

6. В чём сущность метода вписанных окружностей?

7. Что такое галтель, и для чего применяют галтели?

8. Почему в форме должно быть как можно меньше стержней?

9. Что такое «болван», и для чего он применяется?

10. Что такое жеребейка, и для чего её применяют?

11. С какой целью задаются формовочные уклоны?

12. Что такое припуск на механическую обработку?

13. Что такое усадка?

14. Для чего применяются литейные знаки?

15. С какой целью применяется прибыль? Где она устанавливается?

# ЛИТЕРАТУРА

1. Глухов В. П., Тимофеев В. Л., Фёдоров В. Б., Чумичкин А. А. Технология конструкционных материалов. Компактный учебный курс: Учебное пособие для машиностроительных образовательных учреждений / Под общ. ред. В. Л. Тимофеева. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2008. 258 с.

2. Дальский А. М. и др. Технология конструкционных материалов. – М.: Машиностроение, 1992.

3. Кривандин В. А. Металлургические печи / В. А. Кривандин; профессор, доктор техн. наук. – Москва: Металлургия, 1992. 461 с.

4. Фетисов Г. П. и др. Материаловедение и технология металлов. – М.: Высшая школа, 2001.

5. Дриц М. Е., Москалёв М. А. Технология конструкционных материалов. – Высшая школа, 1990.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 «ПЛАВКА ЧУГУНА В ВАГРАНКЕ» ..... 3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 «ПРОИЗВОДСТВО СТАЛИ В ЭЛЕКТРОПЕЧАХ» ..... 10
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 ХОЛОДНАЯ ОБЪЕМНАЯ И ЛИСТОВАЯ ШТАМПОВКА ..... 19
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАЗОВОЙ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫВ ДВУХ ОПОКАХ ..... 30
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ ЛИТЬЯ . 36
(ЛИТЬЁ В КОКИЛЬ И ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ) ..... 36
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОТЛИВОК .. 44
ЛИТЕРАТУРА ..... 56




**Министерство образования и науки РФ**

**ФГБОУ ВПО**
**«Уральский государственный**
**горный университет»**

**Т. П. Глинникова, С. А. Волегов**

# Технология конструкционных материалов

## Лабораторный практикум по теме "*ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ* " для студентов направления бакалавриата: 15.03.01 - «Машиностроение», 15.03.02 - «Технологические машины и оборудование» (ТМО) и среднего профессионального образования 15.02.01 - «Монтаж техническая эксплуатация промышленного оборудования (по отраслям)» *очного и заочного обучения*

**Екатеринбург**
**2018**

Министерство образования и науки РФ

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Т. П. Глинникова, С. А. Волегов

# Технология конструкционных материалов

Лабораторный практикум
по теме "*ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ* "
для студентов направления бакалавриата:
15.03.01 - «Машиностроение»,
15.03.02 - «Технологические машины
и оборудование» (ТМО)
и среднего профессионального образования
15.02.01 - «Монтаж техническая эксплуатация
промышленного оборудования (по отраслям)»
очного и заочного обучения

Издание УГГУ

Екатеринбург, 2018

Г 54

Рецензент: *Г. Г. Кожушко*, д-р техн. наук, профессор кафедры ПТМР УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

Лабораторный практикум рассмотрен на заседании кафедры эксплуатации горного оборудования пятого декабря 2018 года (протокол № 4) и рекомендовано для издания в УГГУ.

Г 54 Технология конструкционных материалов: **Глинникова Т. П., Волегов С. А.** Лабораторный практикум по теме "ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ " для студентов направления бакалавриата: 15.03.01 - «Машиностроение», 15.03.02 - «Технологические машины и оборудование» (ТМО) и среднего профессионального образования 15.02.01 - «Монтаж техническая эксплуатация промышленного оборудования(по отраслям)» очного и заочного обучения / Т. П. Глинникова, С. А. Волегов. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2018. – 74с.

Руководство составлено для проведения лабораторных работ по дисциплине «Технология конструкционных материалов». В руководстве изложены краткие сведения об устройстве токарно-винторезных станков и методах обработки на них. Рассмотрен выбор инструмента в зависимости от обрабатываемой поверхности.

© Глинникова Т.П., Волегов С.А., 2018
© Уральский государственный горный университет, 2018

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1
# ИЗУЧЕНИЕ ТОКАРНО-ВИНТОРЕЗНОГО СТАНКА

## Цель работы

1. Ознакомиться с общим видом токарно-винторезного станка.
2. Изучить назначение всех кнопок и рукояток управления.
3. Рассмотреть и изучить назначение основных узлов станка.
4. Познакомиться с режущим инструментом.
5. Познакомиться с оснасткой станка.

## Краткие сведения о токарно-винторезных станках

Станки токарной группы имеют самое большое распространение на машиностроительных заводах и в ремонтных цехах, по сравнению с другими группами металлорежущих станков.

Токарные станки предназначены, главным образом, для обработки наружных и внутренних цилиндрических, конических и фасонных поверхностей, нарезания резьбы и обработки торцевых поверхностей деталей типа тел вращения с помощью разнообразных резцов, сверл, зенкеров, разверток, метчиков и плашек.

Основные параметры токарных станков – наибольший диаметр заготовки, обрабатываемой над станиной, и наибольшее расстояние между центрами. Важным параметром станка является также наибольший диаметр заготовки, обрабатываемой над поперечными салазками суппорта.

Токарно-винторезный станок является универсальным станком, предназначенным для эксплуатации в условиях единичного и мелкосерийного производств. Рассмотрим устройство этого типа станков на примере токарно-винторезного станка модели 16К20 (рис. 1.1).

Основными узлами станка являются станина *1*, передняя бабка *4*, шпиндель *5*, суппорт, коробка подач *3*, гитара сменных зубчатых колес *2*, задняя бабка *11*, механизм быстрого перемещения суппорта *14*.

Станина *1* служит для монтажа на ней основных узлов и частей станка. Она снабжена направляющими для продольного перемещения суппорта и задней бабки.

Передняя бабка *4* предназначена для размещения в ней коробки скоростей, с помощью которой изменяют частоту и направление

вращения шпинделя *5*.

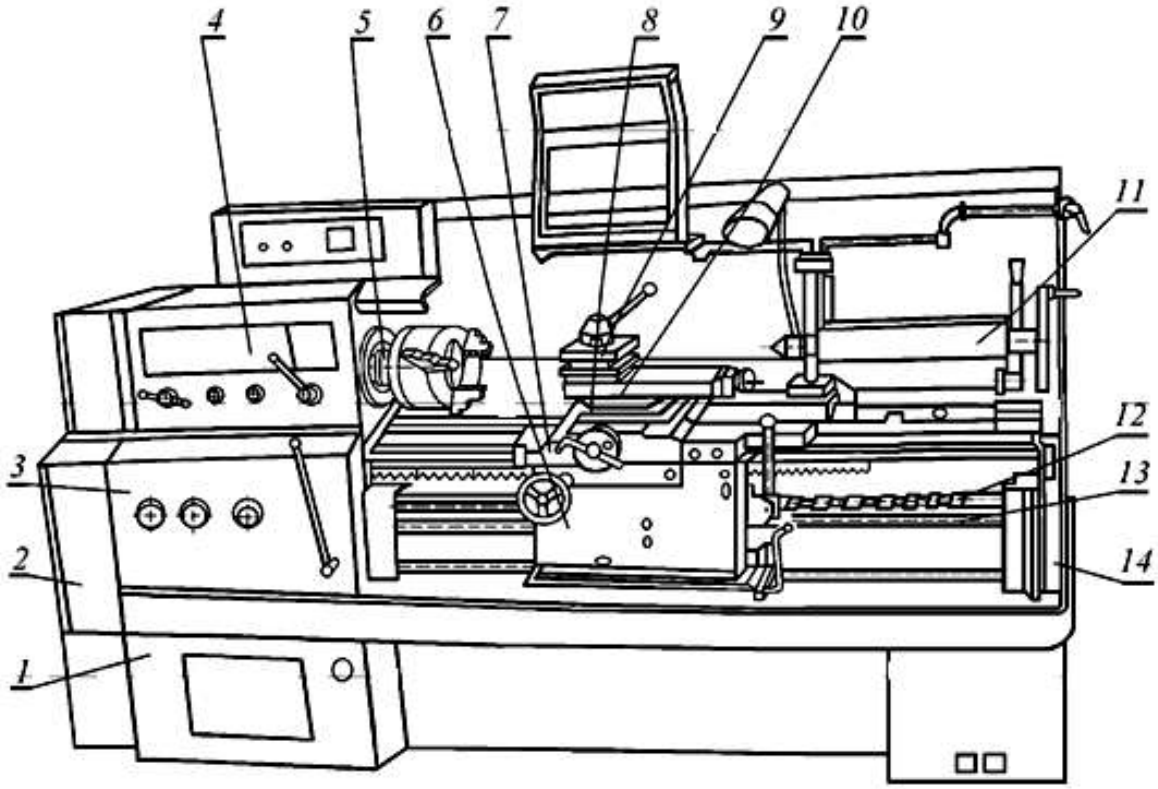



Рис. 1.1. Общий вид токарно-винторезного станка модели 16К20

На правый конец шпинделя, являющегося пустотелым валом, устанавливают различные приспособления для закрепления заготовки. На рис. 1.1 таким приспособлением является трехкулачковый самоцентрирующийся патрон.

Суппорт станка состоит из продольных *7* и поперечных *8* салазок, фартука *6*, верхнего суппорта *10* и четырехпозиционного поворотного резцедержателя *9*. В резцедержателе устанавливают и закрепляют резцы, которым вместе с суппортом сообщают движения продольной и (или) поперечной подач.

Коробка подач *3* предназначена для изменения скоростей продольного и поперечного движений подачи суппорта, с которым она соединена с помощью ходового винта *12* и ходового вала *13*. Передачу вращательного движения выходного вала коробки подач к механизмам суппорта через ходовой винт используют только при нарезании резьб. Для выполнения всех других видов токарных работ движение от коробки подач к суппорту поступает через ходовой вал.

Гитара сменных зубчатых колес *2* является звеном передачи движения от шпинделя станка к коробке подач и настраивается при нарезании точных резьб. Заменяя одни зубчатые колеса гитары дру-

гими, можно изменять величину подачи суппорта.

Заднюю бабку *11* используют в качестве дополнительной опоры заготовки при изготовлении валов с отношением длины к диаметру заготовки более четырех, а также для закрепления сверл, зенкеров, разверток, метчиков и плашек и сообщения им движения подачи при обработке центрального отверстия.

Привод быстрого перемещения *14* используют для сокращения непроизводительных затрат времени на вспомогательные передвижения суппорта. Механизм привода состоит из электродвигателя, вмонтированного в заднюю стойку станины, и клиноременной передачи, с помощью которой передается вращение на ходовой вал.

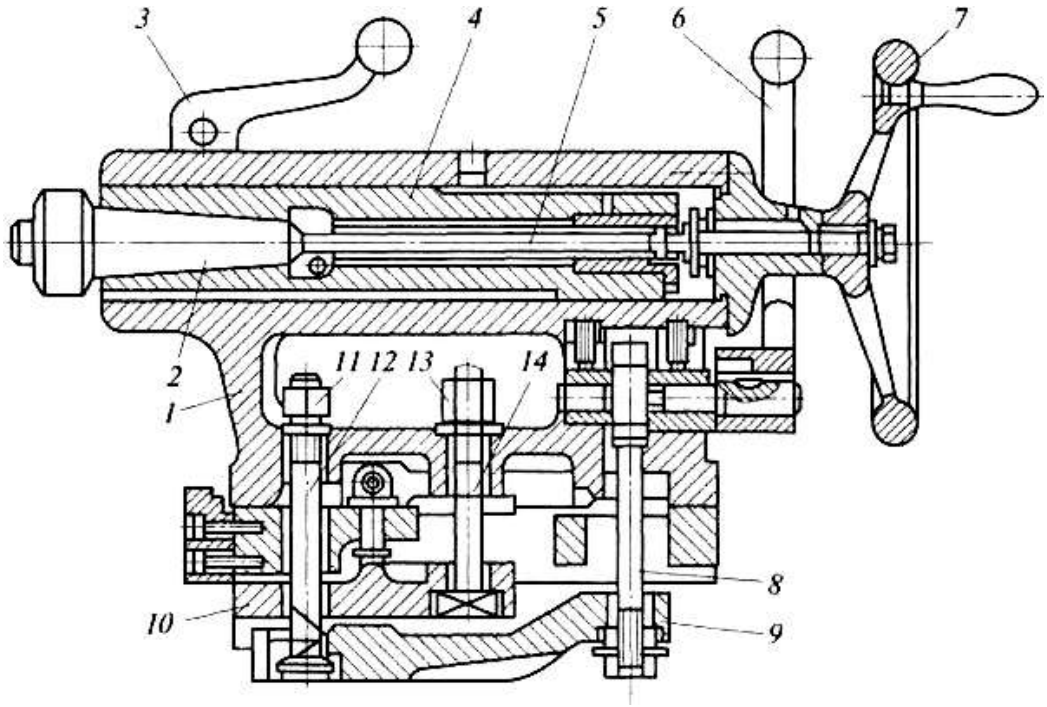



Рис. 1.2. Задняя бабка токарного станка:
*1* – корпус; *2* – центр; *3, 6* – рукоятки; *4* – пиноль; *5, 12* и *14* – винты;
*7* – маховик; *8* – тяга; *9, 10* – рычаги; *11, 13* – гайки

Устройство задней бабки показано на рис. 1.2. В корпусе *1* при вращении винта *5* маховиком *7* перемещается пиноль *4*, закрепляемая рукояткой *3*. В пиноли устанавливается центр *2* с коническим хвостовиком (или осевой инструмент). Задняя бабка перемещается по направляющим станка вручную или с помощью продольного суппорта. В рабочем неподвижном положении задняя бабка фиксируется рукояткой *6*, которая соединена с тягой *8* и рычагом *9*. Сила прижима рычага *9* тягой *8* к станине регулируется гайкой *11* и винтом *12*. Более жесткое крепление задней бабки производится с помощью гайки

*13* и винта *14*, который прижимает к станине рычаг *10*.

Для установки и закрепления заготовок на токарных станках используют различные приспособления (рис. 1.3).

Патроны подразделяют на простые и самоцентрирующиеся. Наибольший диаметр закрепляемой в патроне заготовки на станке модели 16К20 равен 400 мм.

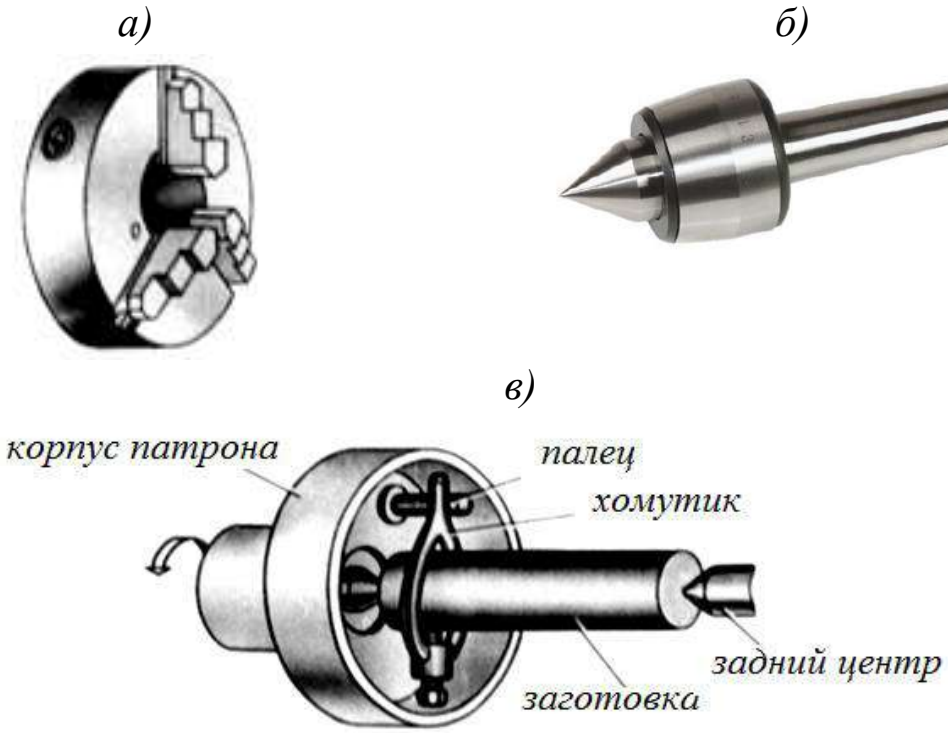



Рис. 1.3. Приспособления к токарным станкам:
*а* – трехкулачковый самоцентрирующийся патрон; *б* – центр вращающийся;
*в* – схема установки заготовки в центрах

Самоцентрирующиеся патроны (рис. 1.3, *а*) в большинстве случаев изготавливают трехкулачковыми и реже двухкулачковыми. Трехкулачковые самоцентрирующиеся патроны очень удобны в работе, так как все кулачки, закрепляющие заготовку, перемещаются по радиальным пазам одновременно и синхронно друг с другом к центру или от центра. Поэтому заготовка, имеющая цилиндрическую поверхность (наружную или внутреннюю), устанавливается и закрепляется в патроне так, что ее ось совмещается с осью шпинделя. Кроме того, в этом случае значительно сокращается время на установку и закрепление заготовки.

Несамоцентрирующие патроны изготовляют четырехкулачковыми. Каждый кулачок в них перемещается своим винтом независимо от остальных. Это позволяет устанавливать и закреплять в патронах заготовки цилиндрической и нецилиндрической форм.

При обработке заготовок длинных нежестких валов с соотношением длины к диаметру $L/D > 15$ для предотвращения их прогиба под действием сил резания, инерционных сил и сил тяжести используют неподвижные и подвижные люнеты.

Неподвижный люнет (рис. 4, *а*) монтируется на направляющие станины *1* с закреплением сухарем *2* и гайкой *3*. Заготовка *10* устанавливается между кулачками *6*, перемещаемыми от винтов *8* стойки *4*. Перед установкой верхнего кулачка необходимо открепить винт *11* и отвести крышку *7* относительно оси *5*. После выставления кулачков их требуется зафиксировать винтами *9*.

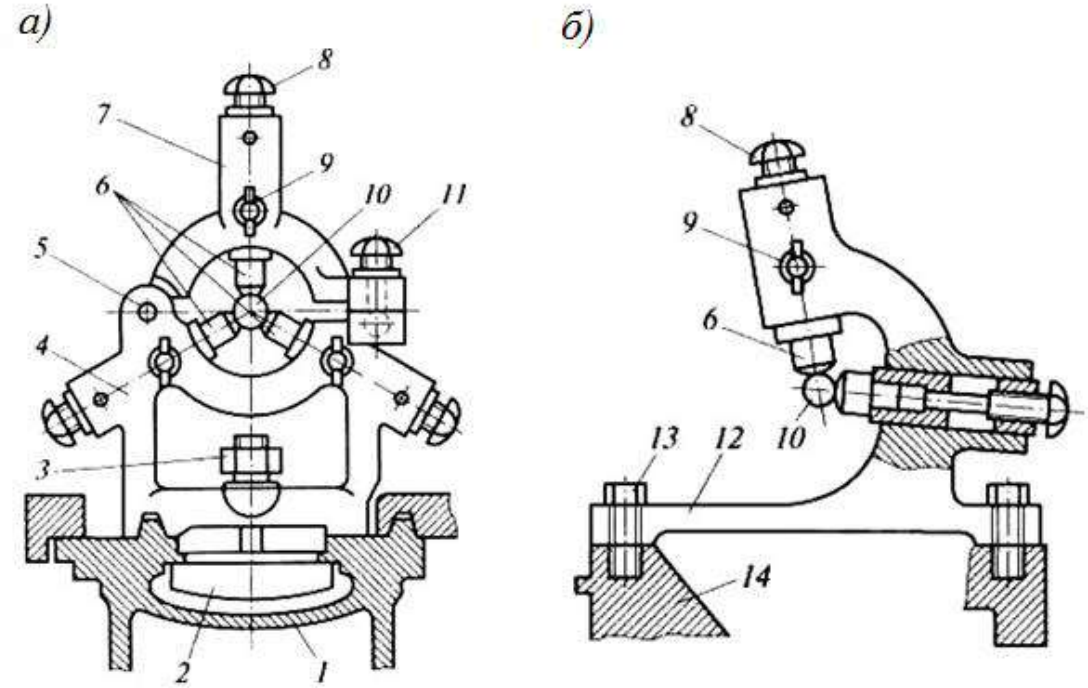



Рис. 1.4. Неподвижный (а) и подвижный (б) люнеты:
*1* – станина; *2* – сухарь; *3* – гайка; *4, 12* – стойки, *5* – ось; *6* – кулачки; *7* – крышка; *8, 9, 11, 13* – винты; *10* – заготовка; *14* – суппорт

Подвижный люнет (рис. 1.4, *б*) монтируется на суппорте *14* станка с закреплением стойки *12* винтами *13*. Люнет имеет два кулачка *6*, регулируемых винтами *8*. В процессе обработки подвижный люнет перемещается вместе с резцом, что позволяет расположить кулачки люнета в непосредственной близости от зоны резания и тем самым почти исключить прогиб заготовки *10*.

## Оборудование

1. Токарно-винторезный станок.
2. Патроны – поводковый, самоцентрирующийся трехкулачковый,

четырехкулачковый, токарные центры, люнеты.
3. Ключи для патрона и резцедержателя.
4. Резцы проходные и отрезные.
5. Заготовки для деталей.
6. Мерительный инструмент – штангенциркуль.
7. Плакат "Режущий инструмент и его применение".

## Задание по работе

1. Изучить устройство и управление токарно-винторезным станком.
2. Изучить режущий инструмент и его применение.
3. Составить отчет о проделанной работе.
4. Ответить на 3 контрольных вопроса.

## Порядок выполнения работы

1. Изучить правила техники безопасности при работе на токарном станке.
2. Изучив рекомендованную литературу, рассмотреть основные части станка и объяснить их назначение.
3. Ознакомиться с режущим инструментом, его установкой и назначением.
4. Ознакомиться с оснасткой станка, ее установкой и назначением.
5. Составить отчет о проделанной работе (Отчет выполняется на специальном бланке).

## Содержание отчета

На схеме станка обозначить основные узлы станка и рукоятки управления. Коротко описать назначение основных узлов станка.

Схема обработки детали (эскиз детали и резца в плане, с указанием углов резца в плане и в сечении, направлений главных движений, материала режущей части).

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислить основные узлы станка и их взаимное расположение.
2. Передняя бабка. Устройство и назначение.
3. Задняя бабка. Устройство и назначение.

4. Коробка подач. Устройство и назначение.
5. Фартук. Назначение рукояток.
6. Ходовой винт. Назначение.
7. Ходовой вал. Назначение.
8. Как вращательное движение ходового вала превращается в поступательное движение фартука?
9. Суппорт. Устройство и назначение.
10. Станина. Устройство.
11. Сверло центровочное. Назначение. Эскиз установки.
12. Зенкер. Назначение. Эскиз установки.
13. Развертка. Назначение. Эскиз установки.
14. Метчик машинный. Метчик ручной. Назначение и схема установки.
15. Плашка. Назначение.
16. Патрон трехкулачковый. Назначение.
17. Патрон четырехкулачковый. Назначение.
18. Установка детали в центрах.
19. Люнет подвижный, неподвижный. Назначение. Эскиз.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2
# ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОКАРНЫХ РЕЗЦОВ

**Цель работы**: практическое ознакомление с основными типами резцов, их конструкцией, способами крепления пластин; усвоение методики измерения и исследование геометрии токарных резцов.

## Краткие сведения о резцах

Резцы являются наиболее распространёнными инструментами в металлообрабатывающей промышленности. Они применяются при работе на токарных, револьверных, карусельных, расточных, строгальных, долбежных, станках, токарных автоматах и полуавтоматах, станках с ЧПУ и многоцелевых станках.

В зависимости от вида станка, конструкции резца, рода материала режущей части и характера работы резцы подразделяются на следующие типы (рис. 2.1):

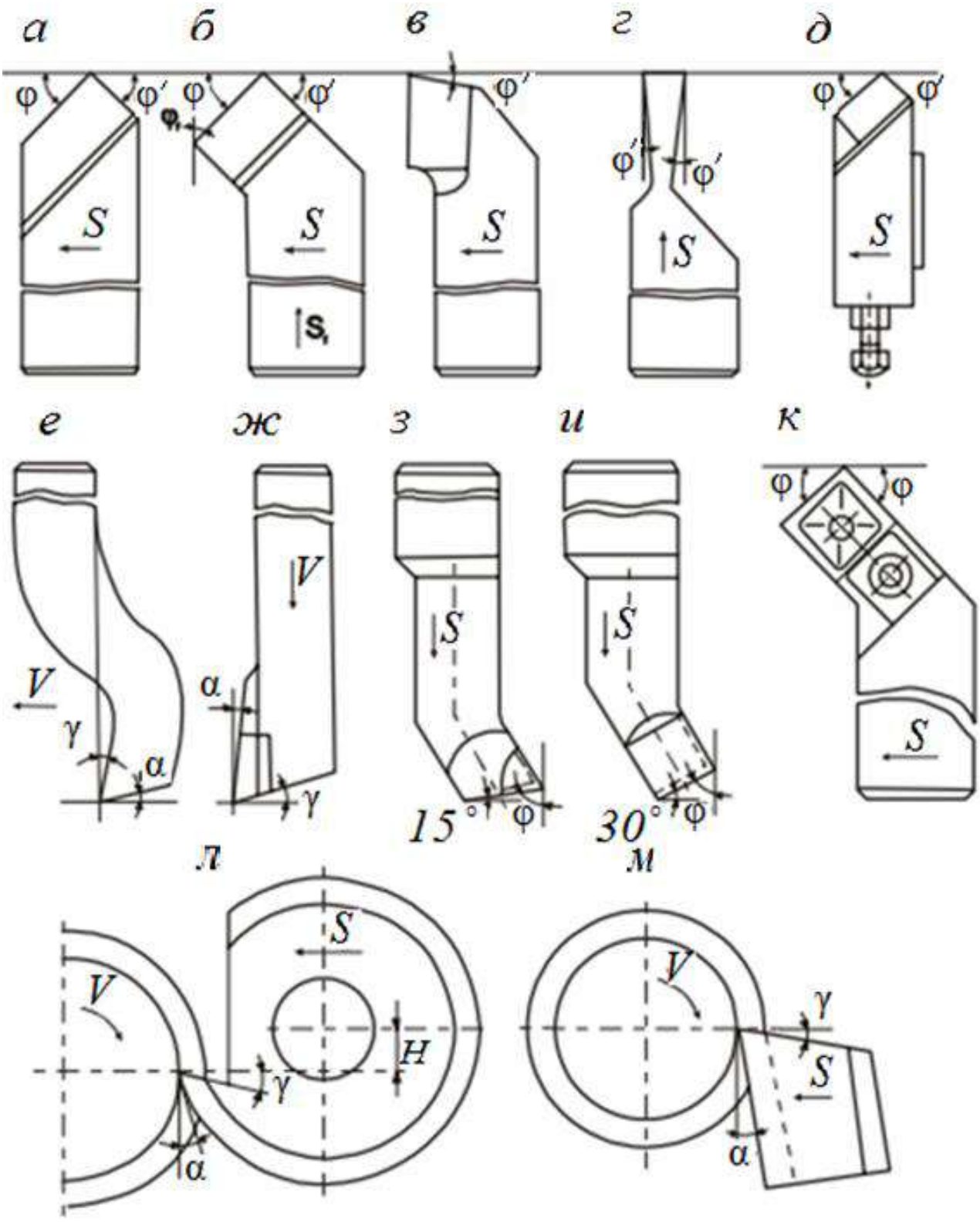



Рис. 2.1. Типы резцов: *а* – прямой проходной; *б* – отогнутый проходной; *в* – упорный подрезной; *г* – отрезной; *д* – автоматный; *е* – строгальный; *ж* – долбёжный; *з* – расточной для глухих отверстий; *и* – расточной для сквозных отверстий; *к* –

проходной с механическим креплением; *л* – фасонный круглый; *м* – фасонный призматический

1. по виду станков: а) токарные, б) строгальные, в) долбежные, г) расточные, д) резцы для автоматов и полуавтоматов, е) специальные;

2. по виду обработки: а) проходные, б) подрезные, в) отрезные, г) прорезные, д) резьбонарезные, е) фасонные;

3. по характеру обработки: а) черновые, б) чистовые, в) для тонкого точения;

4. по направлению подачи: а) правые, б) левые;

5. по конструкции головки: а) прямые, б) отогнутые, в) с механическим креплением пластинки;

6. по роду материала: а) из быстрорежущей стали, б) из твёрдого сплава, в) с пластинами из минералокерамики, г) из сверхтвёрдых материалов.

*Проходные* прямые и отогнутые резцы применяются для обработки наружных поверхностей. Для прямых резцов обычно главный угол в плане $\varphi = 45 – 60°$, а вспомогательный угол в плане $\varphi^1 = 15 – 20°$. У проходных отогнутых резцов углы $\varphi = 45°$. Эти резцы работают как проходные с продольным движением подачи и как подрезные с поперечным движением подачи (см. рис. 2.2, 2.3.)

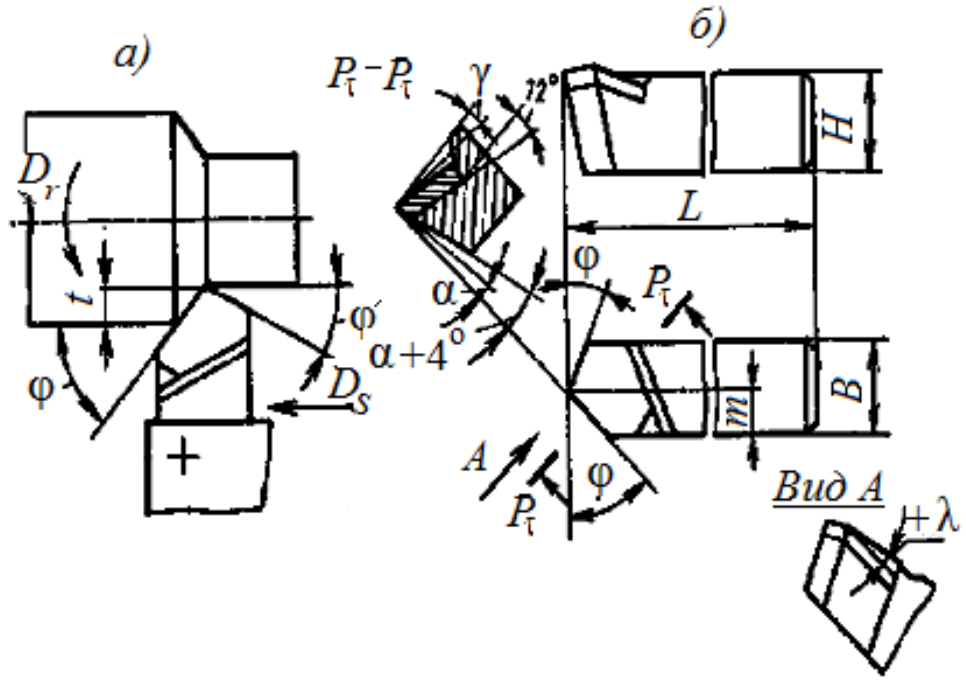



Рис. 2.2. Токарный прямой проходной резец:
*а*) схема точения, *б*) прямой проходной резец (геометрические параметры)

Для одновременной обработки цилиндрической поверхности и торцевой плоскости применяют *проходные упорные резцы* (см. рис. 2.4). Для них главный угол в плане φ = 90°. Эти резцы работают с продольным движением подачи.

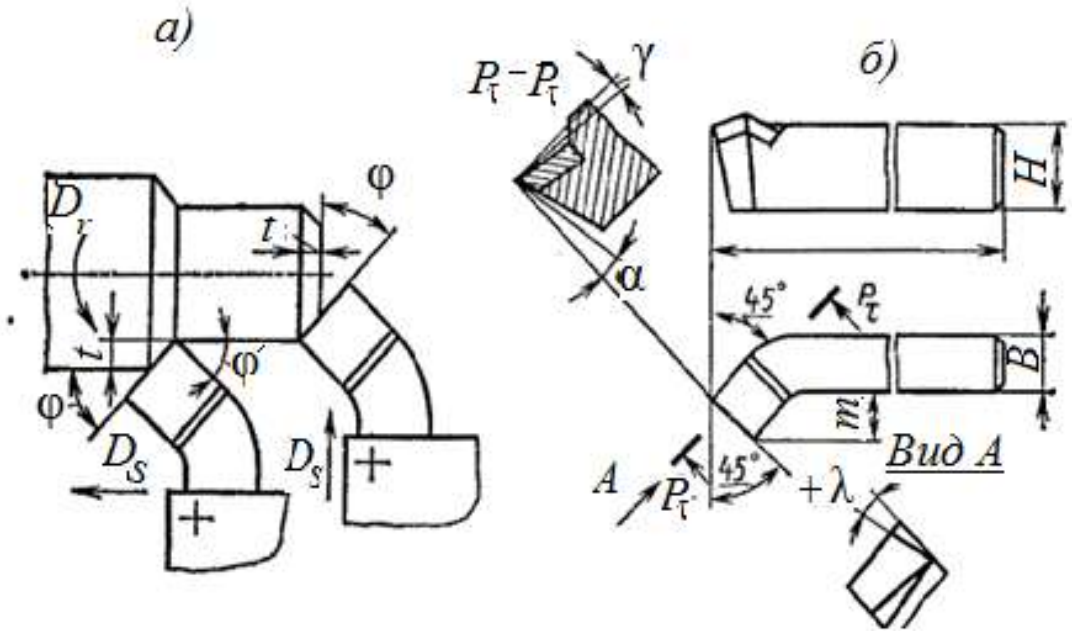



Рис. 2.3. Токарный проходной отогнутый резец:
*а*) схема точения; *б)* проходной отогнутый резец (геометрические параметры)

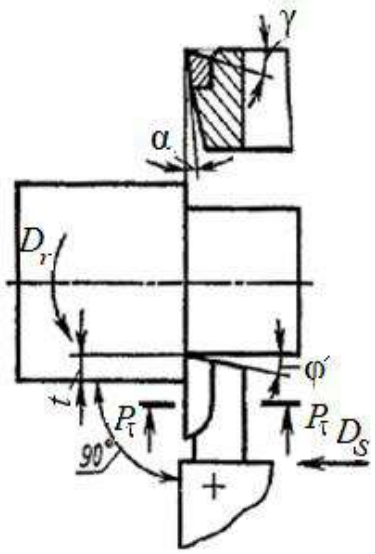



Рис. 2.4. Схема точения проходным упорным резцом

*Подрезные резцы* (см. рис. 2.5) применяют для подрезания торцов заготовок. Они работают с поперечным движением подачи инструмента по направлению к центру заготовки.

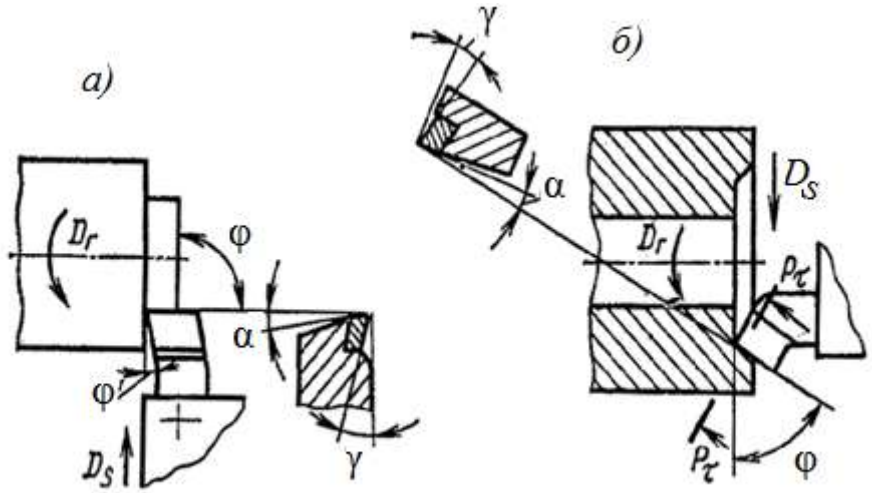



Рис. 2.5. Подрезные резцы:
*а*) движение подачи к центру заготовки; *б*) движение подачи от центра заготовки

*Расточные резцы* (см. рис. 2.6) применяют для растачивания отверстий. Используют два типа расточных резцов; проходные – для сквозного растачивания, упорные – для глухого растачивания. У проходных расточных резцов угол в плане φ = 45–60°, а у упорных – угол φ несколько больше 90°. Отрезные резцы применяют для разрезания заготовок на части, отрезания обработанной заготовки и для протачивания канавок. Эти резцы работают с поперечным движением подачи.

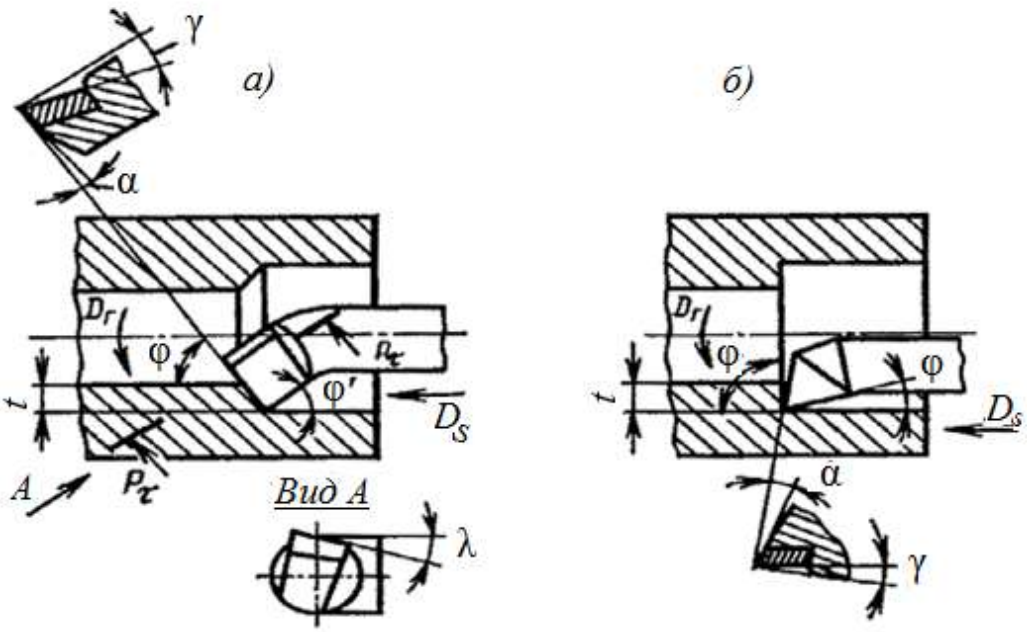



Рис. 2.6. Расточные токарные резцы:
а) для сквозных отверстий; б) для глухих отверстий

*Отрезной резец* (см. рис. 2.7) имеет главную режущую кромку, расположенную под углом φ = 90°, и две вспомогательные с углами φ = 1 ÷ 2°. У стандартных отрезных резцов ширина режущей кромки составляет 3 ÷ 10 мм.

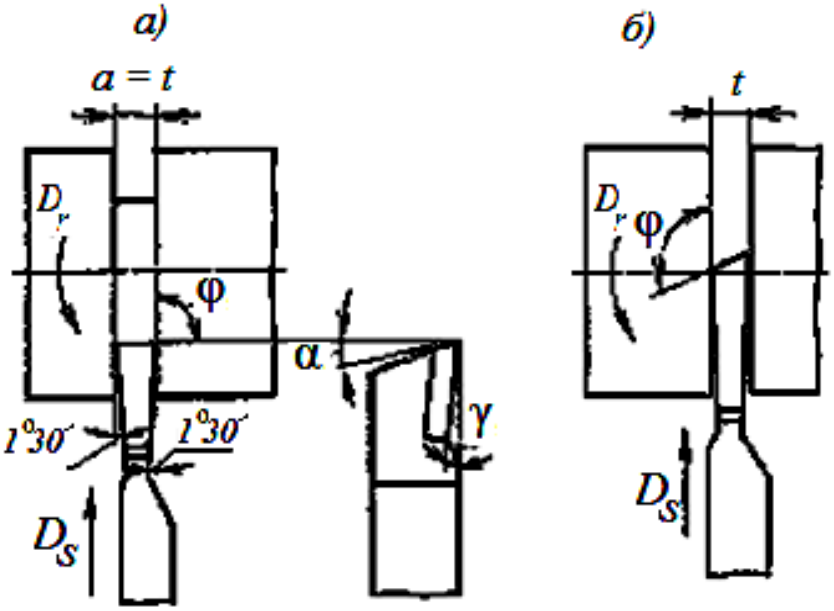



Рис. 2.7. Отрезные резцы:
*а)* с прямой режущей кромкой; *б*) с наклонной режущей кромкой

*Фасонные резцы* (см. рис. 2.8)применяют для обработки коротких фасонных поверхностей с длиной образующей линии до 30 – 40 мм. Форма режущей кромки фасонного резца соответствует профилю детали.

*Резьбовые резцы* (см. рис. 2.9) применяют для нарезания наружной и внутренней резьбы любого профиля. Форма режущих лезвий резьбовых резцов соответствует профилю и размерам поперечного сечения нарезаемых резьб. По конструкции различают резцы цельные, изготовленные из одной заготовки; составные с неразъемным соединением его частей; сборные с механическим креплением пластин или вставок.

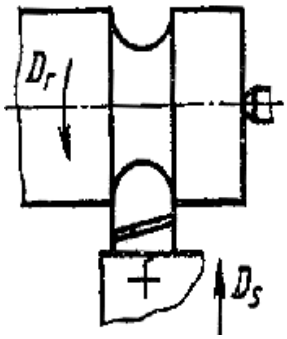



Рис. 2.8. Фасонный резец

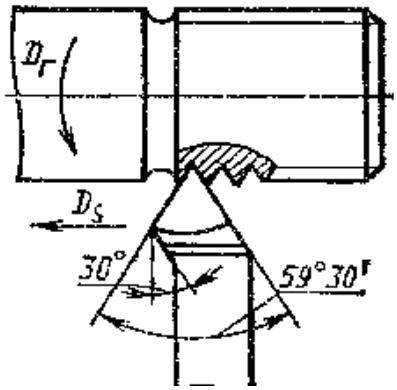



Рис. 2.9. Резьбовой резец

Резец состоит из головки и зажимной части. Головка является режущей частью резца, конструктивно она оформлена следующими элементами: передней поверхностью (гранью), двумя задними поверхностями (гранями), главным и вспомогательным режущими лезвиями (кромками) и вершиной ( рис. 2.10).

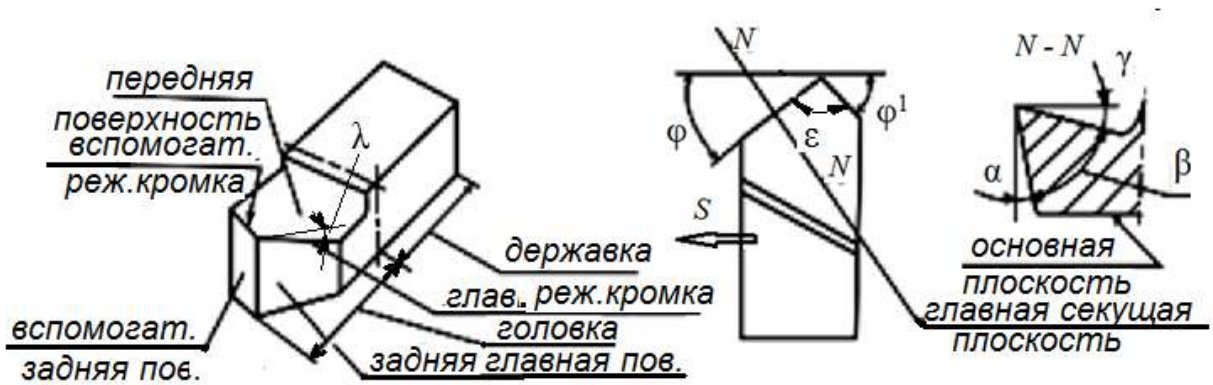



Рис. 2.10. Конструкция рабочей части резцов.

Тело головки резца имеет форму клина с углами γ, α и β. Взаимное расположение режущих кромок определяется углами φ, $\varphi^1$ и λ. Углы γ, α, β, φ, $\varphi^1$, ε и λ являются геометрическими параметрами режущего клина. Углы γ, α и β задаются и измеряются в главной секущей плоскости (в плоскости $N – N$, перпендикулярной к главной режущей кромке); углы φ, $\varphi^1$ и ε – в основной плоскости. Величины этих углов выбирают в зависимости от физико-механических свойств материала резца и обрабатываемого изделия.

Формы передней поверхности представлены на рис. 2.11.

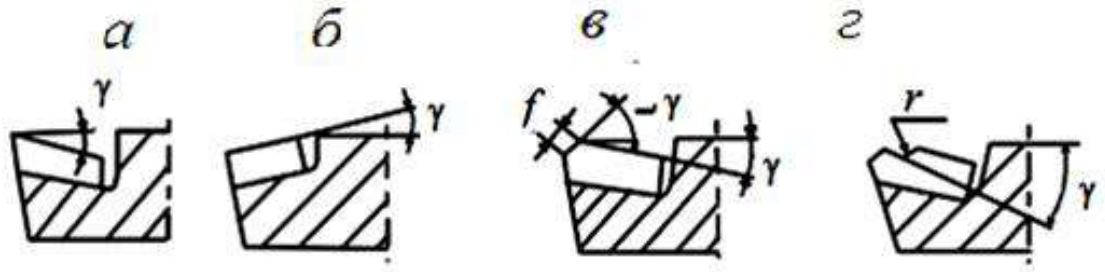



Рис. 2.11. Формы передней поверхности резцов:
*а* – плоская с положительным углом γ, *б* – плоская с отрицательным углом γ,
*в* – плоская с отрицательной фаской, *г* – с канавкой и отрицательной фаской.

При обработке трудно обрабатываемых материалов, черновой обработке литых заготовок для упрочнения режущей кромки и для предохранения её от выкраивания на передней поверхности резца выполняется ленточка с отрицательным углом, а при точении пластичных материалов, для обеспечения завивания и ломания стружки, на передней поверхности выполняется канавка вдоль главной режущей кромки или уступ на передней поверхности.

В качестве инструментального материала для изготовления режущей части резца используются пластины из твёрдого сплава различной формы, которые крепятся к держалке резца пайкой или механически.

В условиях автоматизированного производства широкое применение находят многогранные неперетачиваемые пластины (МНП) из твёрдого сплава.

Наибольшее распространение получили следующие способы крепления этих пластин: *а* – крепление клином, *б* – прихват сверху, *в* – качающийся рычаг, *г* – косой тягой, *д* – подтяжкой на базу (рис. 2.12). Крепёжная (зажимная) часть резца может иметь вид стержня прямоугольного, квадратного или круглого сечения.

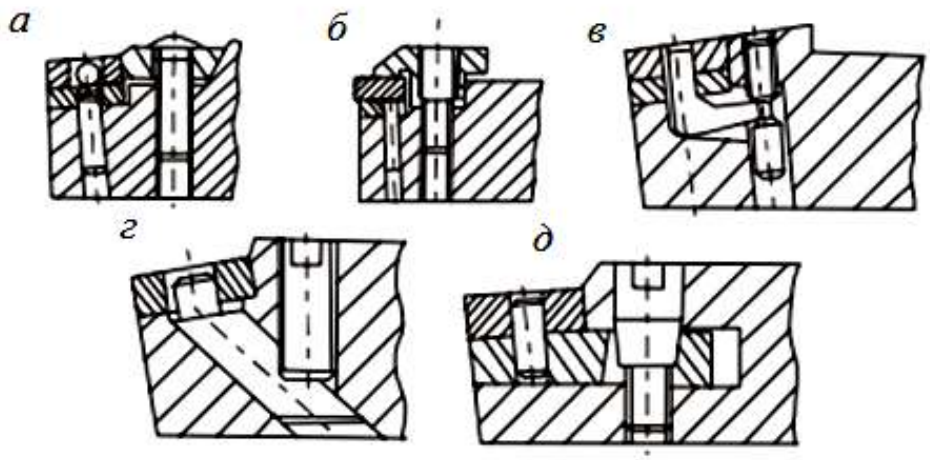



Рис. 2.12. Способы крепления неперетачиваемых пластин

Процесс обработки задаётся режимом резания. Элементами режима резания являются **скорость резания, подача и глубина резания**. Совокупность этих значений принято называть **режимом резания**. Режим резания выбирается в следующей последовательности:

- глубина резания – $t$,
- подача – $S$,
- скорость резания – $V$.

***Глубина резания*** – определяется как расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями заготовки, измеренное по нормали. Глубина резания измеряется в миллиметрах.

$$t = (D - d)/2$$ (при точении и рассверливании);

Глубина резания зависит от следующих факторов:

– величины припуска $a$ (слой металла, подлежащий удалению в процессе обработки);

– вида обработки (черновая или чистовая);

– мощности станка.

Глубина резания может быть равна припуску $t = a$, или $t = a / i$, если припуск снимается за несколько проходов ($i$ – количество ходов, за которое снимется весь припуск при данной глубине резания).

***Подача (S)*** – это перемещение заготовки или инструмента в направлении движения подачи за цикл движения резания.

При точении и сверлении подача задается в миллиметрах за 1 оборот (мм/об), при фрезеровании подача может быть задана в миллиметрах на зуб (мм/зуб), в миллиметрах в минуту (мм/мин), при строгании – в миллиметрах за двойной ход стола (мм/дв. ход).

Величина подачи зависит от требований к обработанной поверхности: шероховатости и точности поверхности – чем выше точность и чистота обработки, тем меньше величина подачи.

***Скорость резания (V)*** – скорость перемещения точки режущей кромки инструмента относительно заготовки. Скорость резания измеряют в метрах в минуту ***при всех видах обработки резанием***, кроме шлифования и полирования (метры в секунду).

Если главное движение резания является вращательным, то скорость резания определяется по формуле

$$V = \pi D n /1000,$$

где $D$ – диаметр заготовки, мм; $n$ – частота вращения заготовки, об/мин.

***К элементам процесса резания относится также основное технологическое время*** $T_o$, затрачиваемое непосредственно на обработку резанием данной поверхности (изменение формы и размеров заготовки).

Основное время определяется по формуле:

$$T_o = L\, i / S\, n\,,$$

где $L = l + l_1 + l_2$,

$l$ – длина обрабатываемой поверхности,

$l_1$ – величина врезания инструмента,

$l_2$ – величина перебега инструмента.

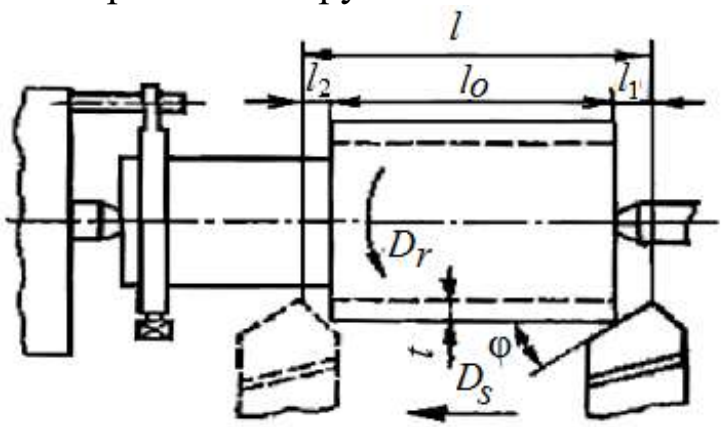



Рис. 2.13. Схема к расчёту $T_O$ при обработке цилиндрической поверхности

## Измерение конструктивных и геометрических параметров резца

Измерение геометрических параметров головки резца и габаритных размеров зажимной части производится универсальным или настольным угломером, штангенциркулем и металлической линейкой (рис. 2.14, 2.15 ).

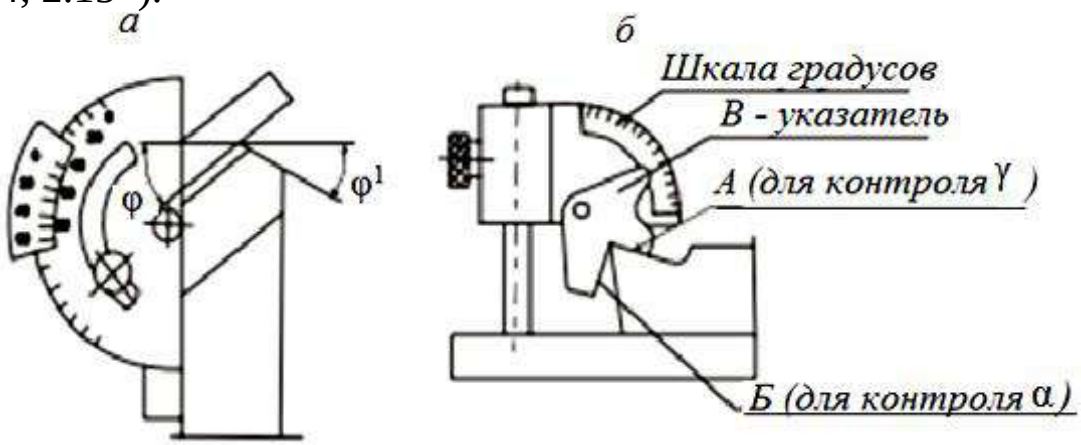



Рис. 2.14. Измерение геометрических параметров резца:

*а* – универсальным угломером, *б* – настольным угломером.

Для определения численного значения переднего и заднего углов и угла наклона режущей кромки при измерении настольным угломером пользуются выражением:

$$\gamma = 45° - x, \; \alpha = 90° - x,$$

где $x$ – показания на лимбе угломера. Результаты измерений заносят в таблицу.

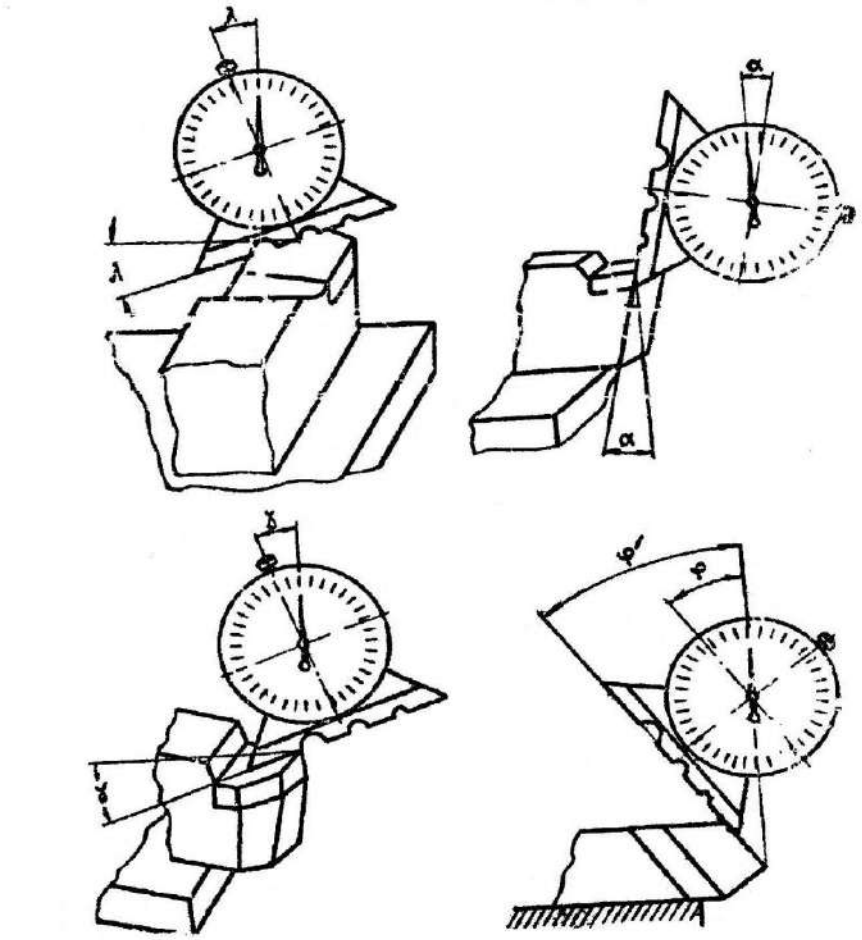


Рис. 2.15. Измерение геометрических параметров резца угломером

**Порядок выполнения работы**

1) Ознакомиться с основными типами резцов и их конструкцией.

2) Изучить приборы для измерения геометрических параметров режущего клина резцов.

3) Выполнить эскиз резца и нанести условные обозначения всех конструктивных размеров и геометрических параметров.

4) Измерить конструктивные и геометрические параметры 2–3 резцов и результаты измерений занести в протокол измерений.

5) Выполнить эскизы деталей сборного резца, с механическим креплением пластины (по указанию преподавателя).

## Содержание отчёта

1. Цель лабораторной работы.
2. Перечисление основных типов резцов, подготовленных для выполнения лабораторной работы.
3. Эскиз одного резца с указанием всех конструктивных и геометрических параметров.
4. Протоколы измерений в виде таблицы (см. бланк отчета).
5. Схема обработки поверхности данным резцом.
6. Расшифровка марки выбранного станка (см. бланк отчета).

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Резец проходной отогнутый правый. Углы в плане, назначение.
2. Материал режущей части резца.
3. Резец проходной отогнутый левый. Углы в плане, назначение.
4. Резец проходной, прямой, правый. Углы в плане, назначение.
5. Резец подрезной, отогнутый, правый. Углы в плане, назначение.
6. Резец отрезной. Углы в плане, назначение.
7. Резец проходной, упорный, правый. Углы в плане, назначение.
8. Резец резьбовой. Углы в плане, назначение.
9. Резец расточной для сквозных отверстий. Углы в плане.
10. Резец расточной для глухих отверстий. Углы в плане.
11. Назовите основные конструктивные элементы головки резца и геометрические параметры резца. Дайте определение углов.
12. Для каких работ назначаются проходные, подрезные и отрезные резцы и какими видами подач они работают?
13. Какие формы могут иметь зажимная часть и передняя поверхность резца?
14. В каких плоскостях задаются и измеряются геометрические параметры резца? .
15. Какие существуют способы крепления пластин из твёрдого сплава?

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3
# НАСТРОЙКА ТОКАРНО-ВИНТОРЕЗНОГО СТАНКА ДЛЯ ТОЧЕНИЯ НАРУЖНЫХ КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

**Цель работы:** знания характеристик конических поверхностей, технологических методов обработки конусов, основ наладки токарно-винторезного станка на обработку конусов, умения выбирать метод токарной обработки конической поверхности в зависимости от ее размеров, настраивать станок.

## Краткая теория

В технике часто используются детали с наружными и внутренними коническими поверхностями, например, конические шестерни, ролики конических подшипников. Инструменты для обработки отверстий (сверла, зенкеры, развертки) имеют хвостовики со стандартными конусами Морзе; шпиндели станков имеют конусную расточку под хвостовики инструментов или оправок и т. п.

Обработка деталей с конической поверхностью связана с образованием конуса вращения или усеченного конуса вращения.

*Конусом* называется тело, образованное всеми отрезками, соединяющими некоторую неподвижную точку с точками окружности в основании конуса.

Неподвижная точка называется *вершиной конуса*.

Отрезок, соединяющий вершину и любую точку на окружности, называется *образующей конуса.*

*Осью конуса* называется перпендикуляр, соединяющий вершину конуса с основанием, а образующийся отрезок прямой является *высотой конуса*.

Конус считается *прямым* или *конусом вращения*, если ось конуса проходит через центр окружности в его основании.

Плоскость, перпендикулярная оси прямого конуса, отсекает от него меньший конус. Оставшаяся часть называется *усеченным конусом вращения*.

Усеченный конус характеризуется следующими элементами (рис. 3.1):

- $D$ и $d$ – диаметры и большего и меньшего оснований конуса;
- $l$ – высота конуса, расстояние между основаниями конуса;

– *угол конуса* 2α – угол между двумя образующими, лежащими в одной плоскости, проходящей через ось конуса;
– *угол уклона конуса* α – угол между осью и образующей конуса;
– *уклон* У, тангенс угла уклона У = tg α = (*D* – *d*)/(2*l*), который обозначается десятичной дробью (например: 0,05; 0,02);
– *конусность* – определяется по формуле: *k* = (*D* – *d*)/*l*, и обозначается с использованием знака деления (:) (например, 1:20; 1:50 и т. д.).
–

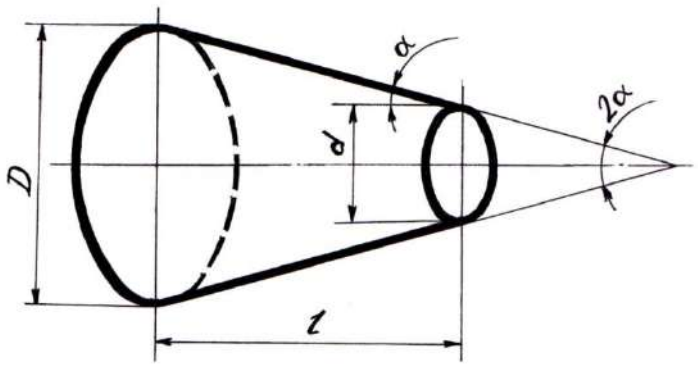


Рис. 3.1. Элементы конуса

Конусность численно равна удвоенному уклону У.

Перед размерным числом, определяющим уклон, наносят знак ∠, острый угол которого направлен в сторону уклона. Перед числом, характеризующим конусность, наносят знак ⧼, острый угол которого должен быть направлен в сторону вершины конуса.

В массовом производстве на станках-автоматах для точения конических поверхностей используются копировальные линейки на один неизменный угол наклона конуса, который может изменяться только при переналадке станка с другой копировальной линейкой.

В единичном и мелкосерийном производстве на станках с ЧПУ точение конических поверхностей с любым углом конуса при вершине осуществляется подбором соотношения скоростей продольной и поперечной подачи. На станках, не оснащенных ЧПУ, обработка конических поверхностей может быть произведена четырьмя способами, перечисленными ниже.

## Способы обработки конических поверхностей

### *1. Широким резцом*

При обработке валов часто встречаются переходы между обрабатываемыми поверхностями, имеющие коническую форму, а на

торцах обычно снимают фаску. Если длина конуса не превышает 25 мм, то его обработку можно производить широким резцом (рис. 3.2).

Угол наклона режущей кромки резца в плане должен соответствовать углу уклона конуса на обрабатываемой детали. Резцу сообщают подачу в поперечном или продольном направлениях.

Следует учитывать, что при обработке конуса резцом с режущей кромкой длиной более 10–15 мм могут возникнуть вибрации, уровень которых тем выше, чем больше длина обрабатываемой детали, меньше ее диаметр, меньше угол наклона конуса. В результате вибраций на обрабатываемой поверхности появляются следы, и ухудшается ее качество. Это объясняется ограниченностью жесткости системы: станок – приспособление – инструмент – деталь (СПИД). При обработке широким резцом жестких деталей вибрации могут отсутствовать, но при этом возможно смещение резца под действием радиальной составляющей силы резания, что приводит к нарушению настройки резца на требуемый угол уклона.

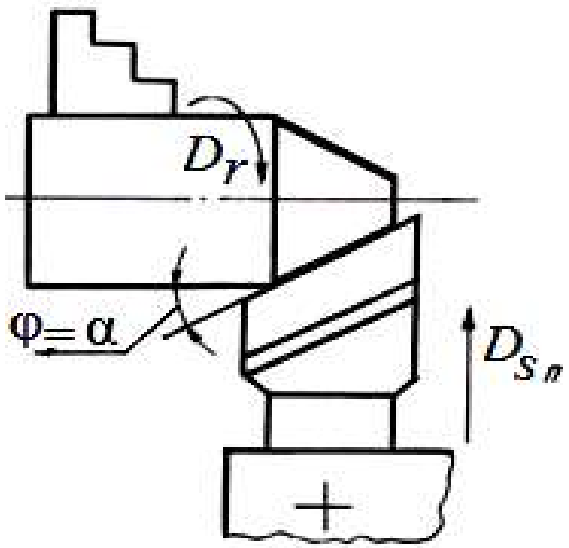



Рис. 3.2. Схема точения конуса широким резцом

*Достоинства метода:*

1. Простота настройки.
2. Независимость угла уклона α от габаритов заготовки.
3. Возможность обработки как наружных, так и внутренних конических поверхностей.

*Недостатки метода:*

1. Ручная подача.

2. Ограниченность длины образующей конуса длиной режущей кромки резца (10 – 12 мм). При увеличении длины режущей кромки резца возникают вибрации, приводящие к формированию волнистости поверхности.

***2. Поворотом верхних салазок суппорта***

Конические поверхности с большими уклонами можно обрабатывать при повороте верхних салазок суппорта с резцедержателем на угол α, равный углу уклона обрабатываемого конуса (рис. 3.3).

Поворотная плита суппорта вместе с верхними салазками может поворачиваться относительно поперечных салазок, для этого освобождают гайку винтов крепления плиты. Контроль угла поворота, с точностью до одного градуса, осуществляется по делениям поворотной плиты. Положение суппорта фиксируют зажимными гайками. Подача производится вручную рукояткой перемещения верхних салазок.

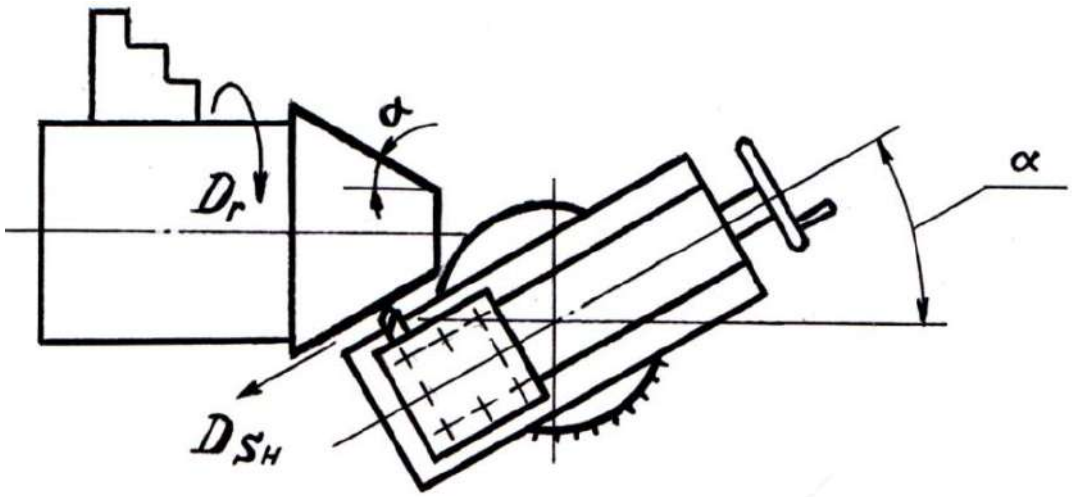



Рис. 3.3. Схема точения конуса с поворотом верхних салазок

Указанным способом обрабатывают конические поверхности, длина которых соизмерима с длиной хода верхних салазок (до 200 мм).

*Достоинства метода:*

1. Простота настройки.
2. Независимость угла уклона α от габаритов заготовки.
3. Обработка конуса с любым углом уклона.
4. Возможность обработки как наружных, так и внутренних конических поверхностей.

*Недостатки метода:*

1. Ограничение длины образующей конуса.
2. Ручная подача.

*Примечание: Некоторые токарные станки (16К20, 16А30) имеют механизм передачи вращения на винт верхних салазок суппорта. На таком станке независимо от угла поворота можно получить автоматическую подачу верхних салазок.*

*3.**Смещением корпуса задней бабки станка***

Конические поверхности большой длины с α = 8 – 10° можно обрабатывать при смещении задней бабки, величина которого определяется следующим образом (рис. 3.4):

$$H = L \cdot \sin \alpha,$$

где $H$ – величина смещения задней бабки; $L$ – расстояние между опорными поверхностями центровых отверстий.

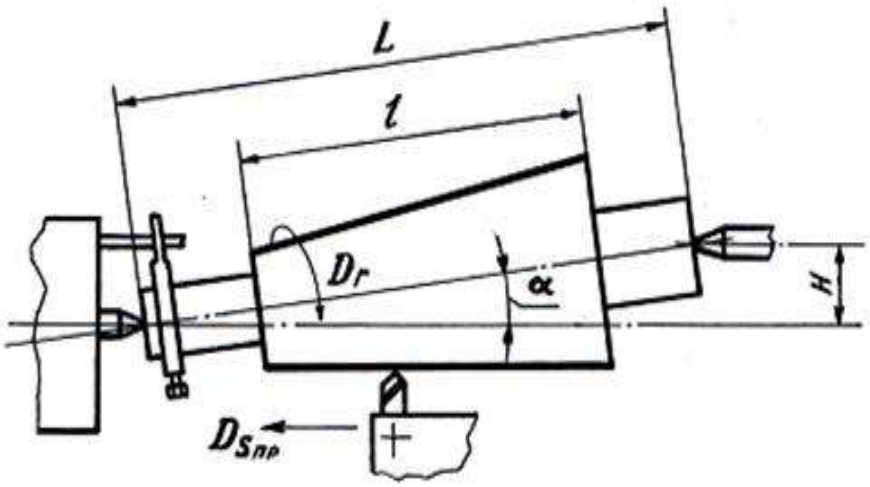



Рис. 3.4. Схема точения конуса смещением корпуса задней бабки

Из тригонометрии известно, что для малых углов синус практически равен тангенсу угла. Например, для угла 7º синус равен 0,120, а тангенс – 0,123. Способом смещения задней бабки обрабатывают заготовки с малым углом уклона, поэтому можно считать, что sin α = tg α. Тогда

$$H = L \cdot \text{tg}\ \alpha = L(D - d)/2l.$$

Заготовку устанавливают в центрах. Корпус задней бабки при помощи винта смещают в поперечном направлении так, что заготовка становится «на перекос». При включении подачи каретки суппорта резец, перемещаясь параллельно оси шпинделя, будет обтачивать ко-

ническую поверхность.

Величину смещения задней бабки определяют по шкале, нанесенной на торце опорной плиты со стороны маховика, и риске на торце корпуса задней бабки. Цена деления на шкале обычно 1 мм. При отсутствии шкалы на опорной плите величину смещения задней бабки отсчитывают по линейке, приставленной к опорной плите. Положение задней бабки для обработки конической поверхности можно определить по готовой детали. Готовую деталь (или образец) устанавливают в центрах станка и заднюю бабку смещают до тех пор, пока образующая конической поверхности не окажется параллельной направлению продольного перемещения суппорта.

Для уменьшения разбивки центровых отверстий целесообразно использовать шариковые центры. Вращение заготовке передается поводковым патроном и хомутиками.

*Достоинства метода:*

1. Возможность автоматической подачи.
2. Получение заготовок, соизмеримых по длине с габаритами станка.

*Недостатки метода:*

1. Невозможность обработки внутренних конических поверхностей.
2. Невозможность обработки конусов с большим углом ($\alpha \geq 10^{o}$). Допускается смещение задней бабки на ±15мм.
3. Невозможность использования центровых отверстий в качестве базовых поверхностей.
4. Зависимость угла α от габаритов заготовки.

***4. С помощью копировальной (конусной) линейки***

Распространенной является обработка конических поверхностей с применением копировальных устройств (рис.3.5).

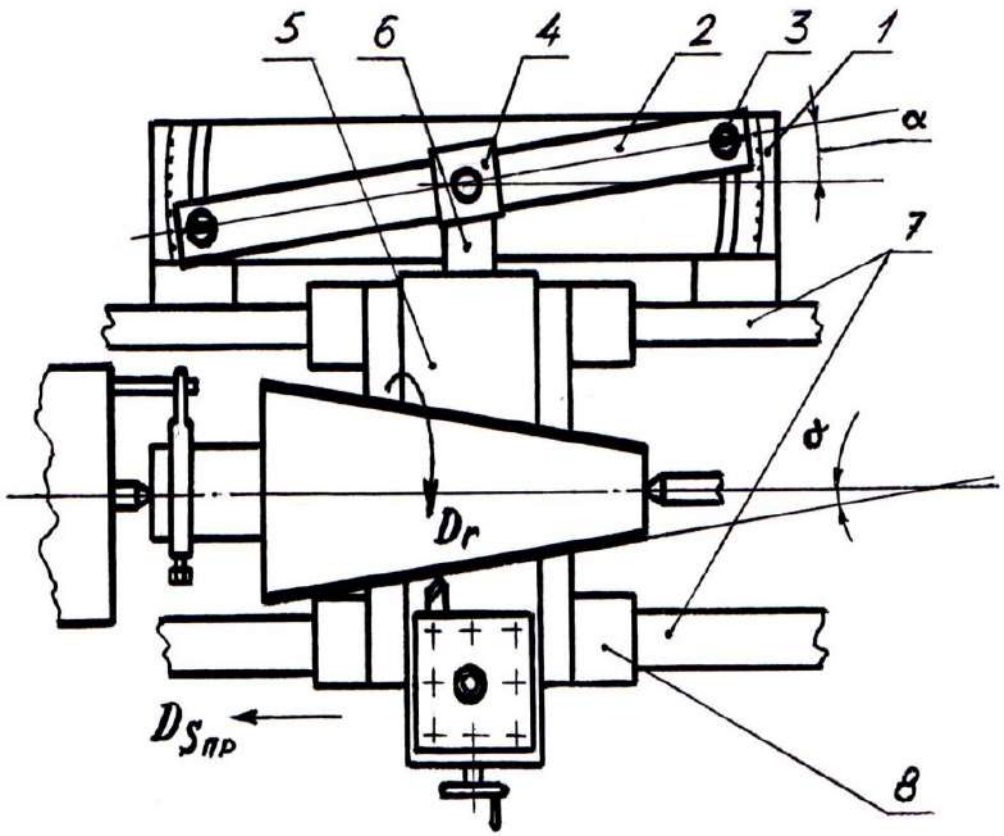



Рис. 3.5. Схема точения конуса с помощью копировальной (конусной) линейки

К станине станка крепится плита *1* с копировальной линейкой *2*, по которой перемещается ползун *4*, соединенный с поперечной кареткой верхнего суппорта *5* станка тягой *6*. Для свободного перемещения суппорта в поперечном направлении необходимо отсоединить винт поперечной подачи. При перемещении продольного суппорта *8* по направляющим станины *7* резец получает два движения: продольное от суппорта и поперечное от копировальной линейки *2*. Величина поперечного перемещения зависит от угла поворота копировальной линейки *2*. Угол поворота линейки определяют по делениям на плите *1*, фиксируют линейку болтами *3*. Подачу резца на глубину резания производят рукояткой перемещения верхних салазок суппорта.

Способ обеспечивает высокопроизводительную и точную обработку наружных и внутренних конусов с углом уклона до 20º.

*Достоинства метода:*

1. Механическая подача.
2. Независимость угла уклона конуса α от габаритов заготовки.
3. Возможность обработки как наружных, так и внутренних поверхностей.

*Недостатки метода:*

1. Ограничение длины образующей конуса длиной конусной линейки (на станках средней мощности – до 500 мм).

2. Ограничение угла уклона шкалой копировальной линейки.

Для обработки конусов с большими углами уклона сочетают смещение задней бабки и наладку по конусной линейке. Для этого линейку поворачивают на максимально допустимый угол поворота α′, а смещение задней бабки рассчитывают как при обточке конуса, у которого угол уклона равен разности между заданным углом α и углом поворота линейки α′, т. е.

$$H = L \cdot \mathrm{tg}\,(\alpha - \alpha').$$

## Порядок выполнения работы

1. Изучить устройство и кинематическую схему данной модели токарно-винторезного станка.

2. По кинематической схеме коробки скоростей данного станка определить число частот вращения, передаваемое на шпиндель станка, найти механизм перебора, определить, во сколько раз механизм перебора понижает частоту вращения шпинделя.

3. Ознакомиться с эскизом изготавливаемой детали. Рассчитать угол поворота верхних салазок. Выбрать резцы для обработки данной детали. Установить верхние салазки суппорта в соответствии с рассчитанным углом, обточить конусную поверхность при заданном режиме.

## Содержание отчета

Отчет оформляется после выполнения работы на станке. Отчет выполняется на бланке. *В отчете указывается следующее:*

1. Расположение механизма перебора (на схеме станка) и его передаточное отношение.

2. Количество частот вращения шпинделя.

3. На эскизе обрабатываемой детали указать, резцы, которыми обрабатываются различные поверхности.

4. Привести необходимые расчеты (угол поворота верхних салазок, скорость и глубина резания).

5. Углы резца в плане, углы в сечении, материал режущей части (на эскизе).

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сколько частот вращения у данной модели станка?
2. Устройство и назначение задней бабки.
3. Устройство и назначение суппорта.
4. Геометрия режущей части резца при точении конусов.
5. Какие существуют способы обработки конусов?

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4
# НАСТРОЙКА ТОКАРНО-ВИНТОРЕЗНОГО СТАНКА НА НАРЕЗАНИЕ РЕЗЬБЫ

**Цель работы:** освоить нарезание метрической резьбы плашками и метчиками: научиться выбирать режим резания и настраивать станок для нарезании резьбы.

## Краткая теория

Нарезание наружной и внутренней треугольной крепежной резьбы метчиками и плашками на станках токарной группы и других станках – один из высокопроизводительных способов обработки.

На винторезном станке нарезают наружные и внутренние резьбы резцами различного профиля и шага: трапецеидальные, треугольные, прямоугольные и др. На заданный стандартный шаг резьбы станок настраивается рукоятками, на коробке подач в соответствии с таблицами, прикрепленными к станку. Для нарезания специальных резьб и резьб повышенной точности нужное передаточное отношение настраивается сменными зубчатыми колесами гитары.

Если для нарезания однозаходной резьбы станок настраивают на шаг резьбы $P$, то для нарезания многозаходной резьбы станок необходимо настроить на ход резьбы $H = kP$, где $k$ – число заходов.

Многозаходные резьбы нарезают с помощью специальных устройств, обеспечивающих поворот заготовки вокруг своей оси на заданный угол, равный 360º, при неподвижном ходовом винте.

Резьбу нарезают за один или несколько проходов инструмента.

Нарезание резьбы резцами производится на токарно-винторезных станках, имеющих ходовой винт с разъемной гайкой, гитару сменных колес, коробку подач и реверсивный механизм. На

станке можно нарезать различные резьбы – наружные и внутренние, метрические и дюймовые, правые и левые, однозаходные и многозаходные, крепежные и грузовые; по форме профиля – треугольные, прямоугольные, трапецеидальные и др.

Перед нарезанием резьбы заготовку обтачивают (растачивают) до определенного диаметра, который при нарезании резьб метчиками и плашками должен быть несколько меньше или больше наружного диаметра резьбы, что объясняется наличием упругих и пластических деформаций, возникающих в материале заготовки. Выбор диаметра заготовки производится по таблицам.

## Порядок выполнения работы

1. Нарезание наружной резьбы плашкой (рис. 4.1):

а) установить и закрепить заготовку в патроне станка;

б) установить рукоятки коробки скоростей в положение, соответствующее 450 об/мин (или ближайшее меньшее);

в) обточить заготовку под заданную резьбу (установить диаметр по таблице), обточить фаску;

г) проконтролировать полученный размер;

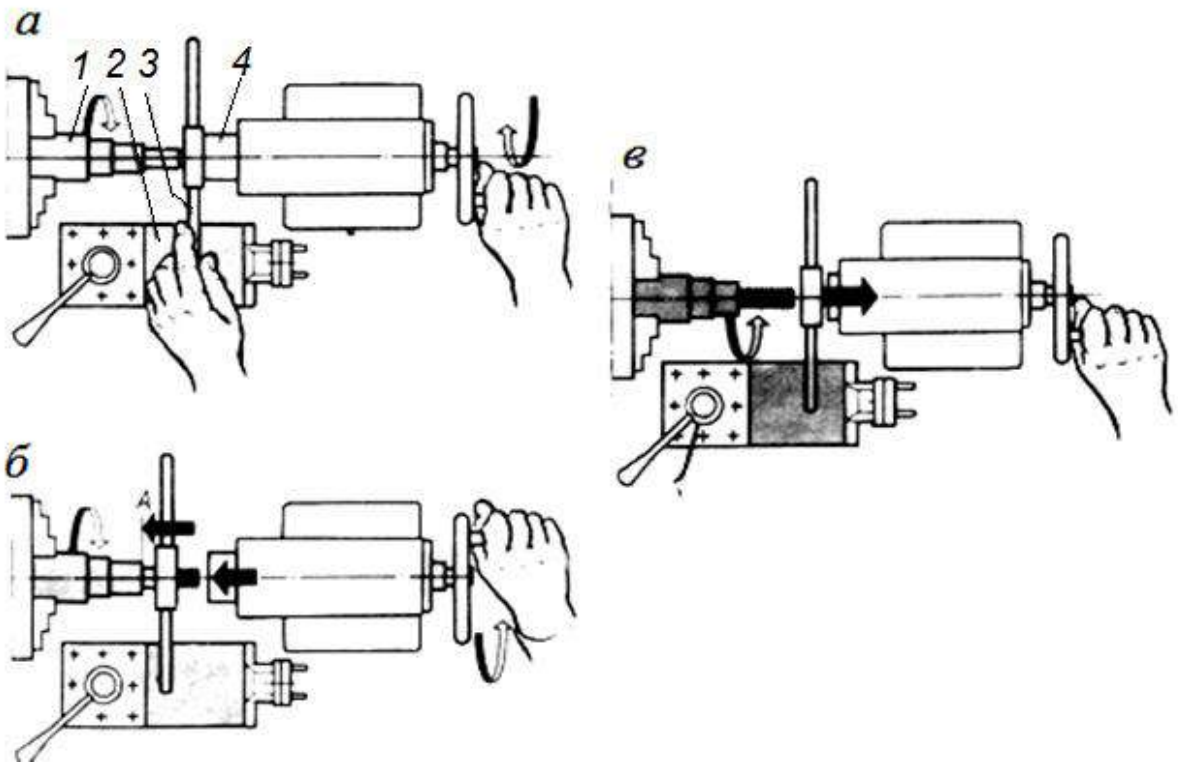



Рис. 4.1. Схема нарезания резьбы плашкой
*1* – заготовка; *2* – упорная планка; *3* – плашка; *4* – пиноль

д) установить плашку в вороток, который вместе с плашкой прижимается пинолью задней бабки к заготовке, упирая одну из рукояток воротка в суппорт станка, установить рукоятки коробки скоростей в положение, соответствующее рассчитанной *скорости резания для нарезания резьбы* (ближайшее меньшее);

е) включить станок и нарезать резьбу;

ж) нарезанную резьбу проконтролировать.

2. Нарезание наружной резьбы метчиком (рис. 4.2):

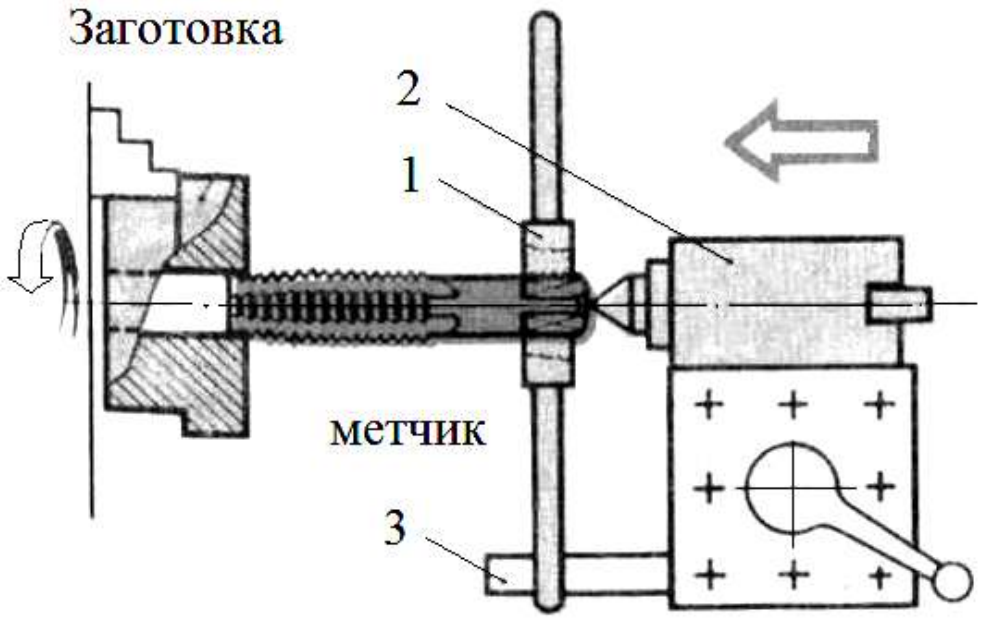



Рис. 4.2. Схема нарезания резьбы метчиком
*1* – вороток; *2* – державка с центром; *3* – упорная планка

а) установить и закрепить заготовку в патроне станка;

б) установить рукоятки коробки скоростей в положение, соответствующее рассчитанной скорости резания (ближайшая меньшая);

в) сверлить отверстие под заданную резьбу (определить диаметр по таблице);

г) установить хвостовик метчика в вороток с квадратным отверстием, ввести заборную часть метчика в отверстие заготовки перемещением пиноли задней бабки, нарезать резьбу вручную;

д) нарезанную резьбу проконтролировать.

## Содержание отчета

Отчет оформляется после выполнения работы на станке. Отчет выполняется на бланке. В отчете указывается следующее:

1. Схема нарезания резьбы.

2. Расположение механизма перебора (на схеме станка) и его передаточное отношение.

4. Частота вращения шпинделя.

5. Привести эскиз обрабатываемой детали с указанием резцов используемых для обработки различных поверхностей и привести необходимые расчеты (скорость резания и глубина резания).

6. Привести эскиз резца с указанием углов в плане и в сечении, материал режущей части резца.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой специальный резьбовый инструмент применяется для нарезания резьб?
2. Что используют для нарезания нестандартных резьб и профилей больших размеров?
3. Что такое шаг резьбы?
4. Что такое однозаходная резьба?
5. Что такое многозаходная резьба?
6. Что такое дюйм, и как определяется шаг дюймовой резьбы?
7. Какой угол профиля метрической резьбы?
8. Какой угол профиля дюймовой резьбы?
9. Геометрия метчика. Назначение канавок на метчике.
10. Почему диаметр заготовки под резьбу меньше, чем диаметр резьбы?
11. Чем контролируются резьбы?

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5
# НАСТРОЙКА ТОКАРНО-ВИНТОРЕЗНОГО СТАНКА НА НАРЕЗАНИЕ РЕЗЬБЫ РЕЗЦОМ

**Цель работы.** Изучение способов настройки станка и приёмов резания резьбы резцом на токарно-винторезном станке (ТВС).

Нарезать метрическую наружную резьбу с помощью резьбового резца по заданному чертежу и рассчитать количество проходов при заданной глубине резания. Определить скорость резания, при заданной частоте вращения шпинделя.

## Краткая теория

Резьбовые соединения в современном машиностроении играют одну из главных ролей для скрепления и фиксации узлов машин и приспособлений. Специальные резьбовые инструменты (лерки, метчики) используются для нарезания стандартных резьб и профилей небольших диаметров. Для нарезания нестандартных резьб и профилей больших размеров используют токарно-винторезные станки. По шагу резьбы подразделяются на **метрические**, **дюймовые**, **питчевые**.

***Шаг резьбы*** – это расстояние между соседними гребешками или впадинами одной и той же винтовой линии. Шаг и основные параметры метрической резьбы измеряются в долях метра. Шаг дюймовой резьбы определяется количеством ниток на дюйм. У питчевой резьбы шаг измеряется в питчах ($p$"), что соответствует величине $p" \times \pi$, мм. У модульной резьбы шаг измеряется модулем ($m$), что соответствует величине $m" \times \pi$, мм.

**По профилю** различают следующие типы резьб: *треугольные*, в том числе *метрические*, у которых угол при вершине равен 60° (рис. 5.1, *а*), и *дюймовые*, у которых угол при вершине равен 55°

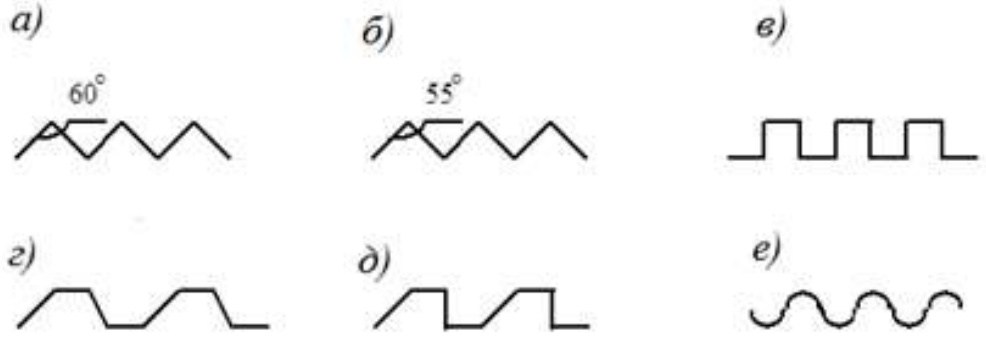



Рис. 5.1. Различные по профилю типы резьбы

(рис. 5.1, *б*); *прямоугольные* (рис. 5.1, *в*); *трапецеидальные*, или упорные (рис. 5.1, *г, д*) и *круглые* (рис. 5.1, *е*).

**По числу заходов** различают однозаходные и многозаходные резьбы, а по направлению захода винтовой линии – левые и правые.

Для нарезания резьбы требуемого шага токарный станок настраивается таким образом, чтобы при повороте шпинделя с заготовкой на один оборот, резец переместился на шаг нарезаемой резьбы.

Рассмотрим кинематическую цепь передачи движения с оси шпинделя до резца (рис. 5.2). Связь начального и конечного движений кинематической цепи представляет собой баланс кинематической цепи (или, просто баланс). Уравнение баланса кинематической цепи имеет вид:

$$1 \text{ об.шп.} \cdot i_{тр} \cdot i_{г} \cdot i_{кп} \cdot t_{хв} = t_{р} \qquad (1)$$

где 1 об. шп. – один оборот шпинделя;

$i_{тр}$ – передаточное отношение трензеля (*трензель* – механизм изменения направления вращения вала подач, или реверса);

$i_{г}$ – передаточное отношение гитары сменных шестерён $i_{г} = \frac{a}{b} \cdot \frac{c}{d}$;

$i_{кп}$ – передаточное отношение коробки подач;

$t_{хв}$ – шаг ходового винта;

$t_{р}$ – шаг резьбы.

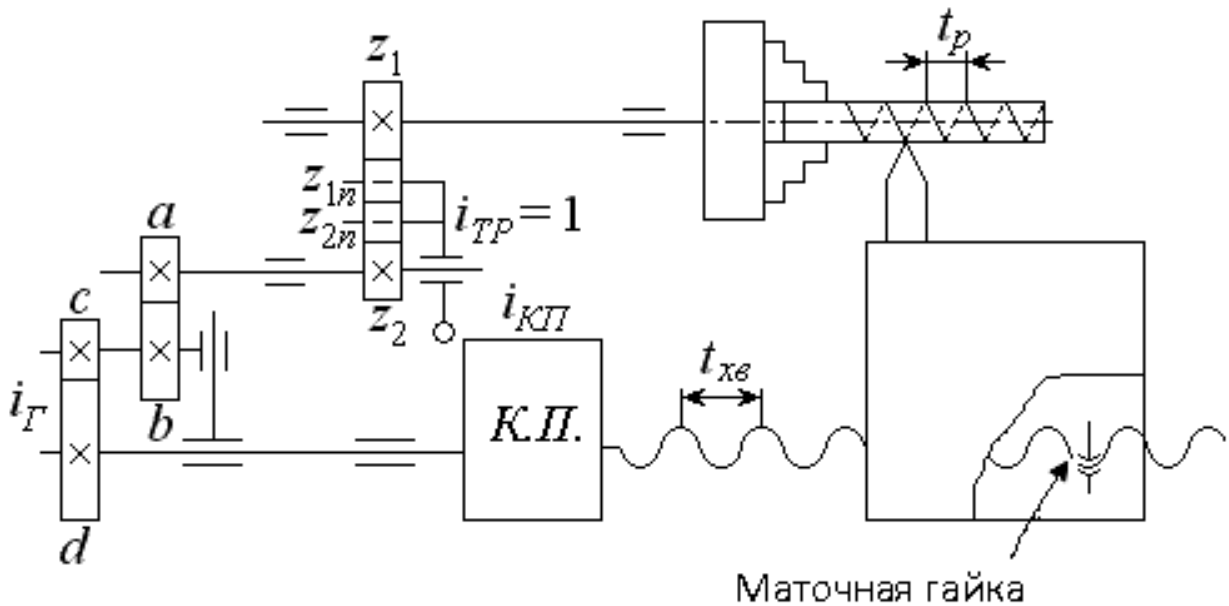



Рис. 5.2. Кинематическая цепь ТВС при нарезании резьбы

Если принять передаточные отношения трензеля и коробки подач равными единице ($i_{тр} = 1$; $i_{кп} = 1$), тогда формула (1) примет вид:

$$i_{г} = \frac{t_{р}}{t_{хв}}. \qquad (2)$$

Передаточное отношение гитары можно изменить используя набор сменных шестерён. Существуют следующие наборы сменных зубчатых колёс:

1. «чётный» набор, содержащий зубчатые колёса с числом зубьев, кратным двум: 20, 22, 24, …, 118, 120;
2. «пятковый» набор, содержащий зубчатые колёса с числом зубьев, кратным пяти: 20, 25, 30, …, 115, 120.

Для нарезания дюймовых резьб в каждом из наборов присутствует дополнительная шестерня со 127 зубьями.

Линейные перемещения суппорта при нарезании резьб осуществляются с помощью ходового винта, потому что винт не даёт проскальзывания и обеспечивает высокую точность перемещения резьбового резца. Хотя на станке присутствует ходовой валик, обеспечивающий такие же продольные перемещения, но цепь передачи движения с помощью ходового валика включает фрикционные муфты, которые не гарантируют точности перемещения резца. Передача движения от ходового винта к суппорту производится с помощью разъёмной маточной гайки, состоящей из двух половин (см. рис. 5.2).

***Настройка гитары сменных шестерён***

Преобразование передаточного отношения гитары в равное ему, но с числами, соответствующими числам зубьев колёс, производится с помощью следующих приёмов:

1) разложением числителя и знаменателя на простые кратные множители;
2) группировкой произведения двух независимых дробей;
3) проверкой полученных пар шестерен на сцепляемость зубьев.

***Условия сцепляемости*** сменных колёс во избежание задевания промежуточными колёсами соседних валов:

$$a + b \geq c + 15 \text{ зубьев};$$
$$c + d \geq b + 15 \text{ зубьев}.$$

Коэффициент «15 зубьев» в неравенствах учитывает радиус посадочного места шестерни.

Распространённые в машиностроении токарно-винторезные станки средней мощности имеют шаг ходового винта, равный 12 мм.

***Пример:***

Нарезать резьбу $t_р = 6$ мм, если $t_{хв} = 12$ мм. Подобрать сменные зубчатые колёса гитары и проверить их на сцепляемость.

По формуле (2) находим передаточное отношение гитары колес:

$$i_г = \frac{t_р}{t_{хв}} = \frac{6}{12} = \frac{1}{2}.$$

Разложим числитель и знаменатель на простые сомножители:

$$i_г = \frac{1}{2} = \frac{6}{12} = \frac{2 \cdot 3}{3 \cdot 4}.$$

Умножим сомножители числителя и знаменателя на одно и то же число:

$$i_г = \frac{2 \cdot 3}{3 \cdot 4} = \frac{2 \cdot (10) \cdot 3 \cdot (15)}{3 \cdot (10) \cdot 4 \cdot (15)}.$$

Сгруппируем произведения двух независимых дробей:

$$i_г = \frac{20 \cdot 45}{30 \cdot 60} = \frac{20}{30} \cdot \frac{45}{60}.$$

Откуда имеем: $$i_г = \frac{a}{b} \cdot \frac{c}{d} = \frac{20}{30} \cdot \frac{45}{60}.$$

Значит, числа зубьев колёс $a = 20;\ b = 30;\ c = 45;\ d = 60$.

*Найденные числа зубьев колёс не должны повторяться, так как в наборе имеется только по* ***одной*** *шестерне с определённым числом зубьев!!!*

Проверим, выполняются ли условия сцепляемости:

$$a + b = 20 + 30 = 50 \geq c + 15 = 45 + 15 = 60;$$

$$50 \geq 60.$$

Первое условие не соблюдается.

Исправить это можно следующим образом: если переставить местами сомножители, то дробь не изменится.

Запишем следующим образом:

$$i_г = \frac{a}{b} \cdot \frac{c}{d} = \frac{45}{30} \cdot \frac{20}{60},$$

затем снова проверим выполнение условий сцепляемости:

$$a+b=45+30=75\geq c+15=20+15=35;$$
$$75\geq 35;$$
$$c+d=20+60=80\geq b+15=30+15=45;$$
$$80\geq 45.$$

Условия выполняются, значит, подбор произведён правильно.

Такая настройка ведётся на станках, у которых либо отсутствует коробка подач, либо она – простейшая (с $i_{кп}=\frac{1}{2};\frac{1}{4};\frac{1}{8}$).

Современные станки имеют коробки подач с большой разрешающей способностью, что даёт возможность нарезать резьбу с шагом от десятых долей до нескольких миллиметров, при этом гитара сменных шестерён состоит всего из четырёх шестерён. Настройка на нарезание резьбы сводится к проверке последовательности сменных шестерён гитары и к установке рукояток коробки подач в определённое положение согласно настроечной таблице (табл. 5.1).

Современные станки имеют коробки подач с большой разрешающей способностью, что даёт возможность нарезать резьбу с шагом от десятых долей до нескольких миллиметров, при этом гитара сменных шестерён состоит всего из четырёх шестерён. Настройка на нарезание резьбы сводится к проверке последовательности сменных шестерён гитары и к установке рукояток коробки подач в определённое положение согласно настроечной таблице (см. табл. 5.1).

Таблица 5.1

**Настроечная таблица станка 1616**

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *A* | I | \| | / | \| | / | \| | \ | \| | \| | \ | \ |
| *B* | II | \| | \| | / | \| | / | / | / | \ | \ | / |
| *C* | III | \| | \| | / | / | / | \ | / | / | \ | \| |
| *D* | IV | \| | / | \ | \ | / | \| | \| | \ | / | \| |
| $t_р$, мм | | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 |
| *B* | I | \ | \| | \ | \| | \ | / | \ | \ | / | / |
| *A* | II | \| | \| | / | \| | / | / | / | \ | \ | / |
| *C* | III | \| | \| | / | / | / | \ | / | / | \ | \| |
| *D* | IV | \| | / | \ | \ | / | \| | \| | \ | / | \| |
| $t_р$, мм | | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 |
| *A* | I | \| | / | \| | / | \| | \ | \| | \| | \ | \ |
| *B* | II | \| | \| | / | \| | / | / | / | \ | \ | / |
| *D* | III | / | / | \ | \ | \ | \| | \ | \ | \| | / |
| *C* | IV | \| | / | \ | \ | / | \| | \| | \ | / | \| |
| $t_р$, мм | | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 | 11 | 12 |

### *Пример использования таблицы*

Находим нужный шаг нарезаемой резьбы, например 3 мм. По настроечной таблице (находится на коробке подач станка) устанавливаем сменные шестерни *A, B, C, D* в необходимой последовательности. Определяем по таблице положение рукояток I, II, III, IV, соответствующее шагу нарезаемой резьбы $t_р = 3$ мм, и переключаем рукоятки КП в нужное положение. Станок настроен для нарезания резьбы.

## Приёмы нарезания треугольной резьбы

При нарезании резьбы происходит изменение внешних размеров резьбы (подъём резьбы) за счёт деформации и течения металла по направлению к свободному краю профиля. Поэтому номинальный наружный размер под резьбу следует несколько уменьшать, а внутренний – увеличивать в зависимости от пластических свойств материала и размеров профиля резьбы.

На выходе резьбы (рис. 5.3) делается канавка *1* шириной до трёх шагов резьбы и глубиной немного больше высоты профиля или предусматривается на такой же длине «сбег» резьбы.

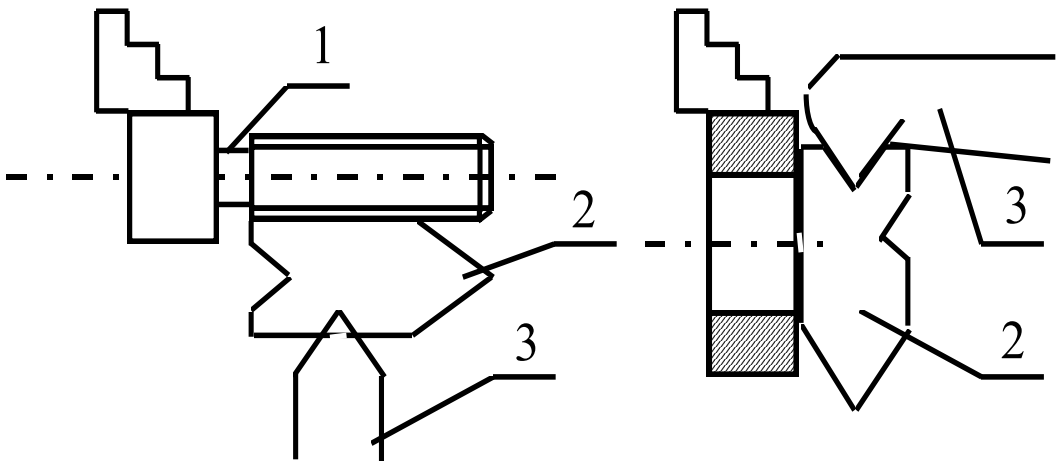



Рис. 5.3. Установка резца по шаблону

Установка резца *3* должна производиться точно по высоте центр*о*в станка во избежание искажения профиля резьбы, а ориентирование его по отношению к заготовке делается по шаблону *2* (см. рис. 5.3). По этому же шаблону проверяется точность заточки профиля резца.

Резьба нарезается за несколько проходов, число которых зависит от размеров резьбы. Схема нарезания резьбы резцом приведена

на рис. 5.4. Например, для резьбы с шагом 2 – 3 мм делается 7 – 10 проходов. Последние три прохода – чистовые, выполняются при уменьшающейся глубине врезания.

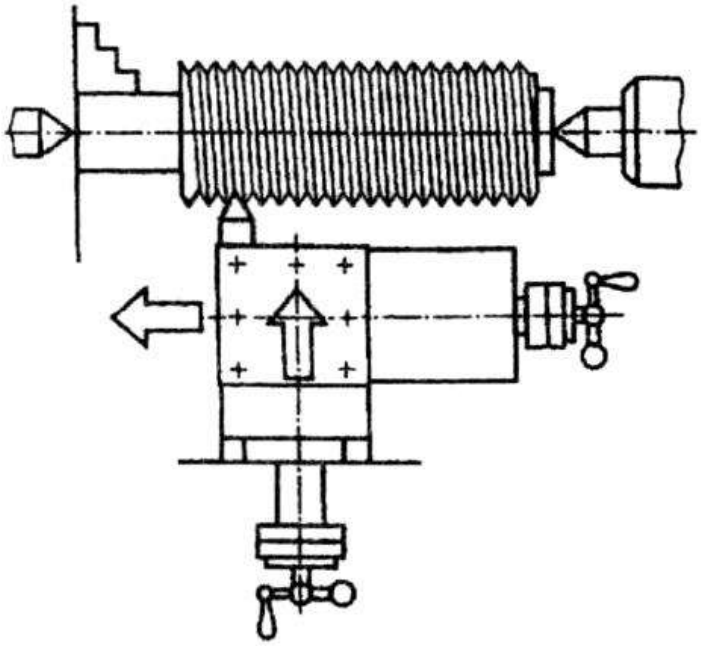


Рис. 5.4. Схема нарезания резьбы резцом

## Материалы и оборудование

Цилиндрическая заготовка (низкоуглеродистая сталь марки Ст3), штангенциркуль, резьбовые резцы, резьбомер, токарно-винторезные станки типа 1А61, 1616.

## Задания для индивидуальной работы

По варианту задания (табл. 5.2) рассчитать сменные шестерни и проверить на условие сцепляемости, если $t_{хв}$ = 12 мм.

Таблица 5.2

**Варианты заданий**

| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $t_р$, мм | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 | 5,5 | 6 | 6,5 | 7 | 7,5 |

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теорией нарезания резьб.
2. Выполнить расчет шестерен по варианту, заданному преподавателем (табл. 2).

3. С помощью учебного мастера произвести настройку гитары шестерен и станка для одного из расчётных заданий и изготовить резьбу:

а) установить и закрепить заготовку;

б) установить рукоятки коробки скоростей в положение, соответствующее рассчитанной скорости резания (или ближайшее меньшее);

в) обточить заготовку под требуемый размер резьбы (табл. 5.3), обточить фаску, проточить канавку для выхода резьбового резца;

г) настроить токарно-винторезный станок на заданный шаг нарезаемой резьбы;

д) рассчитать по заданной скорости резания частоту вращения шпинделя;

е) установить резец на требуемую глубину резания для первого прохода (0,3 … 0,5 мм) по лимбу поперечной подачи суппорта;

ж) сделать первый ход, включив станок и разъемную гайку ходового винта; при втором и последующих ходах глубину резания уменьшить на 0,3 … 0,1 мм, относительно глубины резания первого хода;

з) нарезанную резьбу проконтролировать.

Таблица 5.3

**Основные размеры метрической резьбы**

| Диаметр резьбы, мм | Шаг, *P,* мм | Диаметр стержня, мм | |
|---|---|---|---|
| | | наибольший | допуск |
| 3,0 | 0,5 | 2,94 | - 0,06 |
| 4,0 | 0,7 | 3,92 | - 0,08 |
| 5,0 | 0,8 | 4,92 | - 0,08 |
| 6,0 | 1,0 | 5,92 | - 0,08 |
| 8,0 | 1,25 | 7,90 | - 0,10 |
| 10,0 | 1,5 | 9,90 | - 0,10 |
| 12,0 | 1,75 | 11,88 | - 0,12 |
| 14,0 | 2,0 | 13,88 | - 0,12 |
| 16,0 | 2,0 | 15.88 | - 0,12 |

Скорость резания выбирают в зависимости от обрабатываемого сплава, материала, из которого изготовлен инструмент, диаметра и шага резьбы. При нарезании резьбы метчиками в заготовках из стали, рекомендуется скорость резания 12 м/мин, а из чугуна, бронзы и алюминия – 4 … 20 м/мин. При нарезании резьбы плашками реко-

мендуются следующие скорости резания: для стали – 3 ... 4 м/мин, для чугуна и бронзы – 2 … 3 м/мин, для латуни – 9 … 15 м/мин. Обработку ведут с охлаждением.

## Содержание отчета

Отчет оформляется до выполнения работы на станке на бланке.

*В отчете указывается следующее:*

а) эскизы обрабатываемых деталей (на картах эскизов);

б) на картах эскизов изобразить инструмент, которым обрабатывается поверхность под резьбу, диаметр заготовки, глубина резания, скорость резания, частота вращения шпинделя;

в) указать на картах эскизов инструмент, которым нарезается резьба, диаметр заготовки под резьбу, глубину резания, количество ходов и величину подачи при нарезании резьбы резцом, частоту вращения шпинделя, скорость резания при нарезании резьбы; определить основное технологическое время;

г) на эскизах инструмента, использованного в работе, указать значения углов и материал режущей части;

д) представить готовую деталь.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой инструмент применяется для нарезания резьб?
2. На каких станках нарезаются резьбы резцом?
3. Назначение ходового винта и разъемной гайки.
4. Геометрия резьбового резца.
5. Какой специальный резьбовый инструмент применяется для нарезания резьб?
6. Что используют для нарезания нестандартных резьб и профилей больших размеров?
7. Что такое шаг резьбы?
8. Что такое однозаходная резьба?
9. Что такое многозаходная резьба?
10. Что такое дюйм, и как определяется шаг дюймовой резьбы?
11. Какой угол профиля метрической резьбы?
12. Какой угол профиля дюймовой резьбы?
13. Запишите и расшифруйте уравнение кинематического баланса.
14. Какие существуют наборы зубчатых колёс?
15. Что такое “четный” набор?
16. Что такое “пятковый” набор?
17. Каков диапазон чисел зубьев зубчатых колёс в наборе?

18.Для чего нужна дополнительная шестерня со 127 зубьями?
19.Почему при нарезании резьб используется ходовой винт, а не валик?
20.Что такое маточная гайка?
21.Что такое условие сцепляемости?

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6
# ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОСЕВОГО ИНСТРУМЕНТА

**Цель работы**: практическое ознакомление с основными типами осевого инструмента – свёрл, зенкеров и разверток, их конструктивными особенностями и геометрическими параметрами, с методикой измерения их геометрии.

## Краткие сведения о свёрлах

Свёрла предназначены для сверления отверстий в сплошном металле, для рассверливания уже имеющихся отверстий, для рассверливания конических углублений. Точность обработки 11–12 квалитет, шероховатость поверхности $Rz = 40$ мкм.

*Различают следующие типы свёрл: спиральные с цилиндрическим и коническим хвостовиком, центровочные, перовые, ружейные, кольцевого сверления и другие* (рис. 6.1).

Конструктивно сверло имеет форму цилиндрического стержня с рабочей и зажимной частями (рис. 6.1*а*). На рабочей части расположены два режущих зуба, имеющих форму клина (рис. 6.2). Передняя поверхность клина, по которой сходит стружка, представляет собой линейчатую конволютную винтовую поверхность. Задняя поверхность, обращенная к поверхности заготовки, может быть конической, винтовой или плоской.

Процесс резания выполняется режущими кромками (лезвиями): двумя главными, поперечной (в центральной части сверла, на неё приходится 40 % работы) и двумя вспомогательными, шириной $f = 0{,}5 \ldots 3$мм. Вспомогательные кромки формируют поверхность отверстия, не имея задних углов ($\alpha = 0$). Это цилиндрические ленточки, направляющие сверло в отверстие. Режущая способность сверла определяется его геометрическими параметрами: углами $\gamma$, $\alpha$, $2\varphi$, $\varphi^1$, $\psi$.

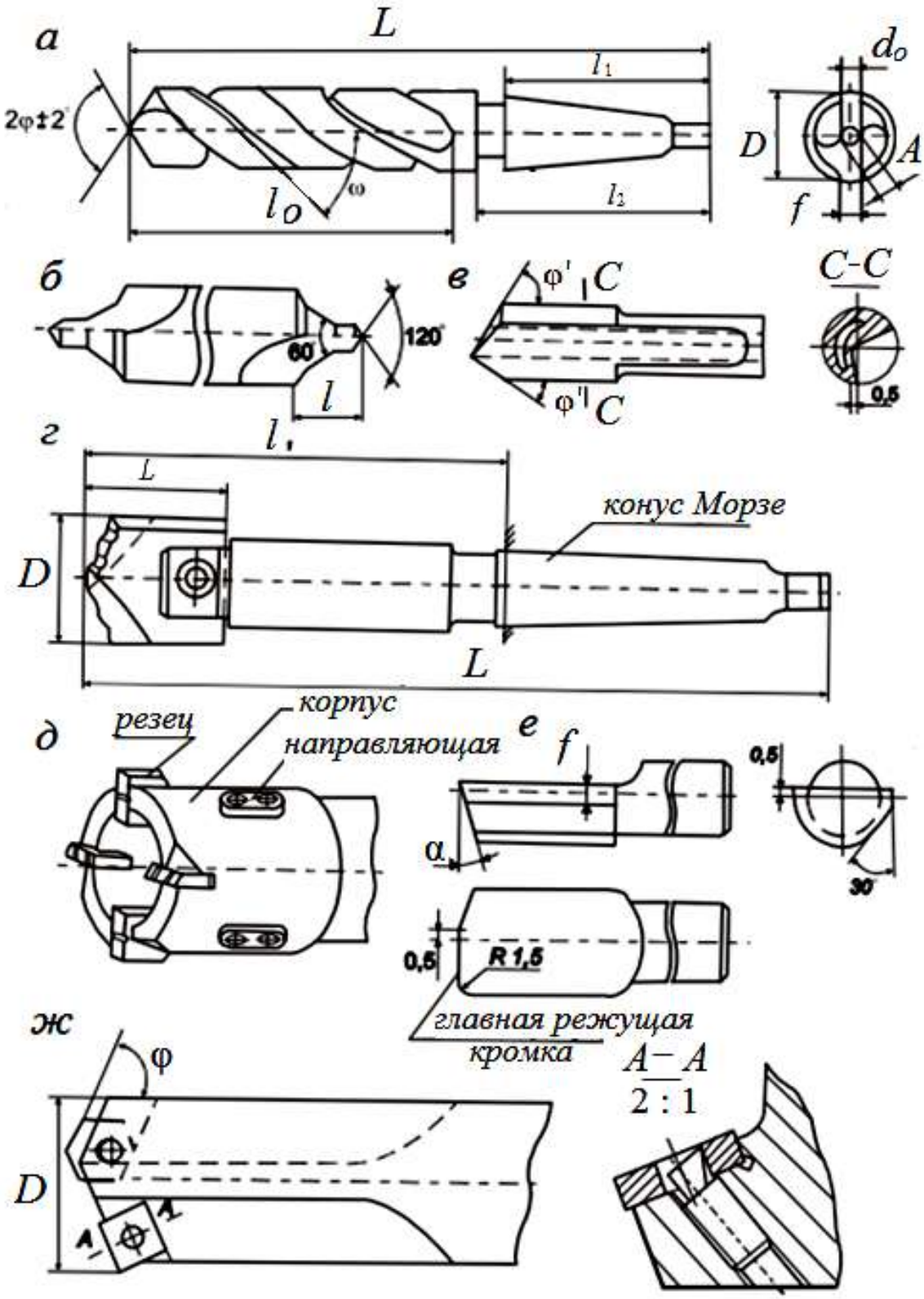



Рис. 6.1. Типы свёрл:
*а* – спиральные; *б* – центровое; *в* – ружейное; *г* – паровое сборное с пластиной из быстрорежущей стали; *д* – кольцевое; *е* – однокромочное пушечное; *ж* – сборное с МНП

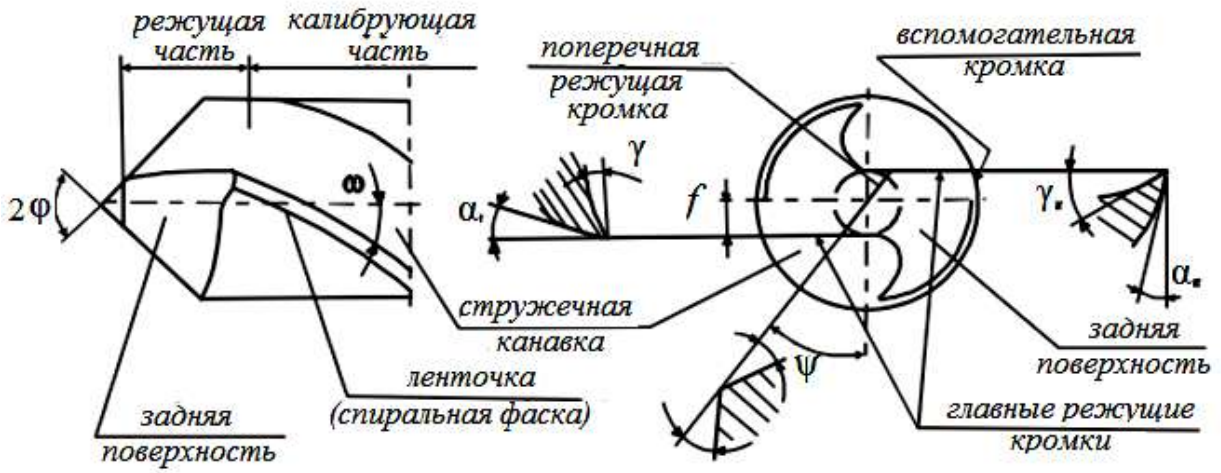



Рис. 6.2. Рабочая часть сверла

На направляющей части имеются глубокие винтовые канавки, по которым удаляется от режущих лезвий и отводится стружка. С увеличением угла наклона этих канавок отвод стружки улучшается, но снижается прочность сверла.

Зажимная часть имеет форму цилиндрического или конического хвостовика, служит для закрепления сверла и передачи крутящего момента.

В процессе резания свёрла изнашиваются по передним и задним поверхностям (главным и вспомогательным). Интенсивнее изнашиваются по уголкам (место перехода главной режущей кромки во вспомогательную режущую кромку). Восстановление режущих способностей свёрл осуществляется переточкой по главной задней поверхности. В зависимости от метода заточки сверла, задняя поверхность может иметь вид участка конической поверхности, винтовой поверхности или плоскости.

## Измерение конструктивных и геометрических параметров сверла

В работе используются: набор свёрл, универсальный угломер, штангенциркуль, микрометр, установка для измерения заднего угла сверла (рис. 6.3).

Установка состоит из стола *1*, на котором размещены оптической головки *2*, стойки *3* с индикатором *4* и микрометрического винта *5*. Для измерения спада затылка сверло *8* с помощью переходных конусов устанавливается в конусе делительной головки. Индикатор помещается в центр сверла.

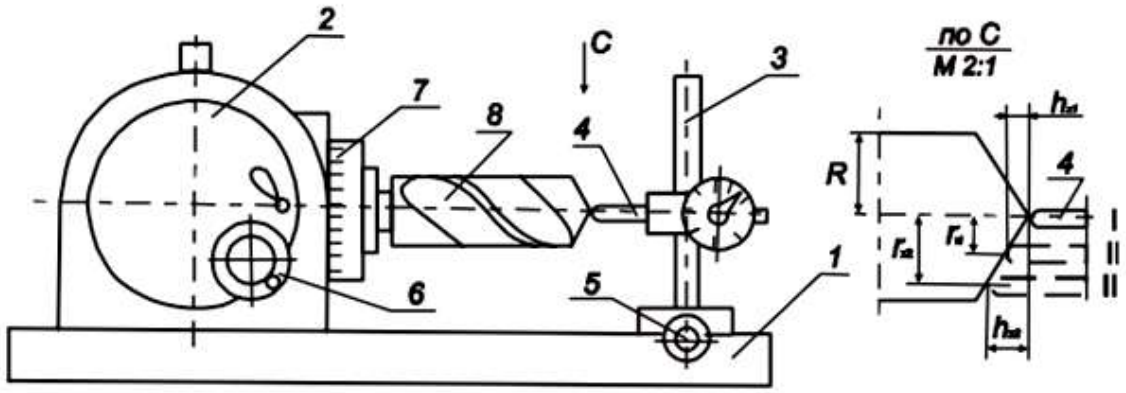



Рис. 6.3. Установка для измерения заднего угла сверла.

Ход ножки индикатора должен быть выбран полностью. После этого микрометрическим винтом отводят индикатор от центра сверла на величину, равную (2; 4; 6 мм), и устанавливают стрелку индикатора на «0». Маховиком *6* поворачивают сверло на некоторый угол $\tau_x$ (он может принимать любое значение в интервале 10 ... 30°), который фиксируется по лимбу *7*. На индикаторе *4* отмечают падение затылка на расстоянии 4; 6; 8; 10 мм от центра сверла.

Задний угол сверла на любом расстоянии от оси определяется по формуле:

$$\mathrm{tg}\alpha_x = \frac{180\, h_x}{\pi r_x \tau_x},$$

где $h_x$ - величина спада затылка сверла, измеряется индикатором 4;

$r_x$ - радиус сверла, на котором измеряется спад затылка;

$\tau_x$ - угол поворота сверла при измерении спада затылка.

Подставляя величины ( $h_{x1}$, $r_{x1}$, $\tau_{x1}$) в формулу, определяют значения заднего угла $\alpha_1$. Затем увеличивают значение $r_x$ до 6; 8 мм и получают новые значения α и γ.

По полученным данным строят график изменения заднего угла по длине режущей кромки (график функции $\alpha = f(R)$)

Передний угол в осевом направлении на тех же диаметрах определяется по формуле

$$\mathrm{tg}\gamma_x = \frac{r_x \mathrm{tg}\omega}{R\sin\varphi},$$

где, $r_x$ -радиус, на котором определяется задний угол; $R$ - наружный радиус сверла; ω- угол наклона винтовой канавки сверла, определяется угломером по отпечатку, полученному путём прокатывания сверла по бумаге.

По полученным значениям переднего угла строят график изме-

нения его по длине режущей кромки (график функции $\alpha = f(R)$).

## Порядок выполнения работы

1) Ознакомиться с основными типами свёрл.
2) Изучить приборы для измерения геометрии сверла.
3) Изучить методику измерения геометрии сверла.
4) Выполнить эскиз спирального сверла и указать все его конструктивные элементы и геометрические параметры.
5) Измерить задние углы в трех - четырех точках режущей кромки.
6) Рассчитать передние углы на режущей кромке сверла в тех же точках.
7) Выполнить эскиз режущего клина на режущей и калибрующей частях развёртки и указать значение геометрических параметров.
8) Построить графики измерения переднего и заднего углов сверла по длине режущей кромки.

## Краткие сведения о зенкерах и развертках

Зенкеры предназначаются для увеличения диаметров цилиндрических отверстий, исправления оси отверстия, обработки цилиндрических и конических углублений, а также торцевых поверхностей.

Точность отверстия после обработки зенкером увеличивается до 9-10-го квалитета, а шероховатость снижается до $Rz$ =20 мкм. Припуск под зенкерование составляет до 4-5 мм.

По конструкции их можно разделить: а) хвостовые – цельные, оснащённые пластинками твердого сплава, и сборные; б) зенковки для обработки цилиндрических и конических углублений; в) цековки для обработки торцевых поверхностей (рис. 3.1).

Хвостовые зенкеры по конструкции аналогичны свёрлам, но имеют 3-4 режущих зуба, увеличенный диаметр сердцевины, т.к. снимают меньше металла с отверстия, не имеют поперечной режущей кромки.

Развёртки, предназначены для окончательной обработки отверстий, снимают тонкие слои металла. Точность обработки по 7-9-му квалитету, шероховатость поверхности может достигать $Ra$ = 1,25... 0,63 мкм (рис. 3.2). В практике встречаются разнообразные типы развёрток: а) цилиндрические; б) конические; в) ручные; г) машинные цельные и сборные; д) конические под конус Морзе, под

метрический конус и с конусностью 1:30 и меньше; е) разжимные (регулируемые).

Развёртка – это многозубый инструмент. Рабочая часть ее состоит из заборной (режущей) с углом φ и калибрующей частей.
Нагрузка на зуб очень мала, объём стружки также мал, поэтому стружечные канавки небольшие. Передний угол режущих клиньев принимается равным нулю, и процесс резания сходен со скоблением. Для сохранения прочности зуба задние углы α = 6...10°.

Для того, чтобы микрометром можно было замерить диаметр калибрующей части, число зубьев развёртки всегда делается чётным

Крепежная часть должна обеспечить соосность развёртки и обрабатываемого отверстия. Поэтому её закрепляют в самоустанавливающихся патронах.

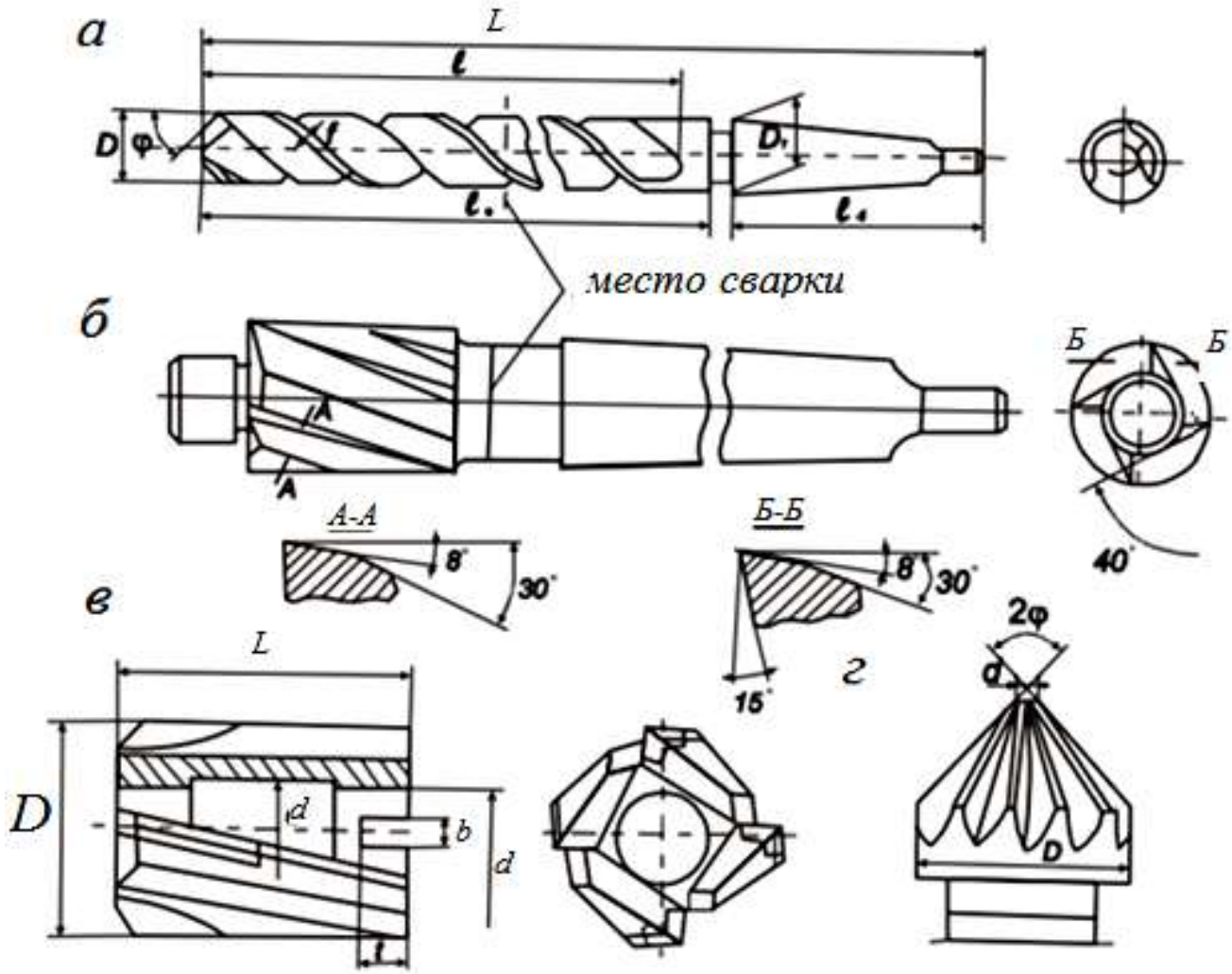



Рис. 6.4. Типы зенкеров:
*а* - с коническим хвостовиком; *б* - зенковка цилиндрическая;
*в* – насадная; *г* - зенковка коническая

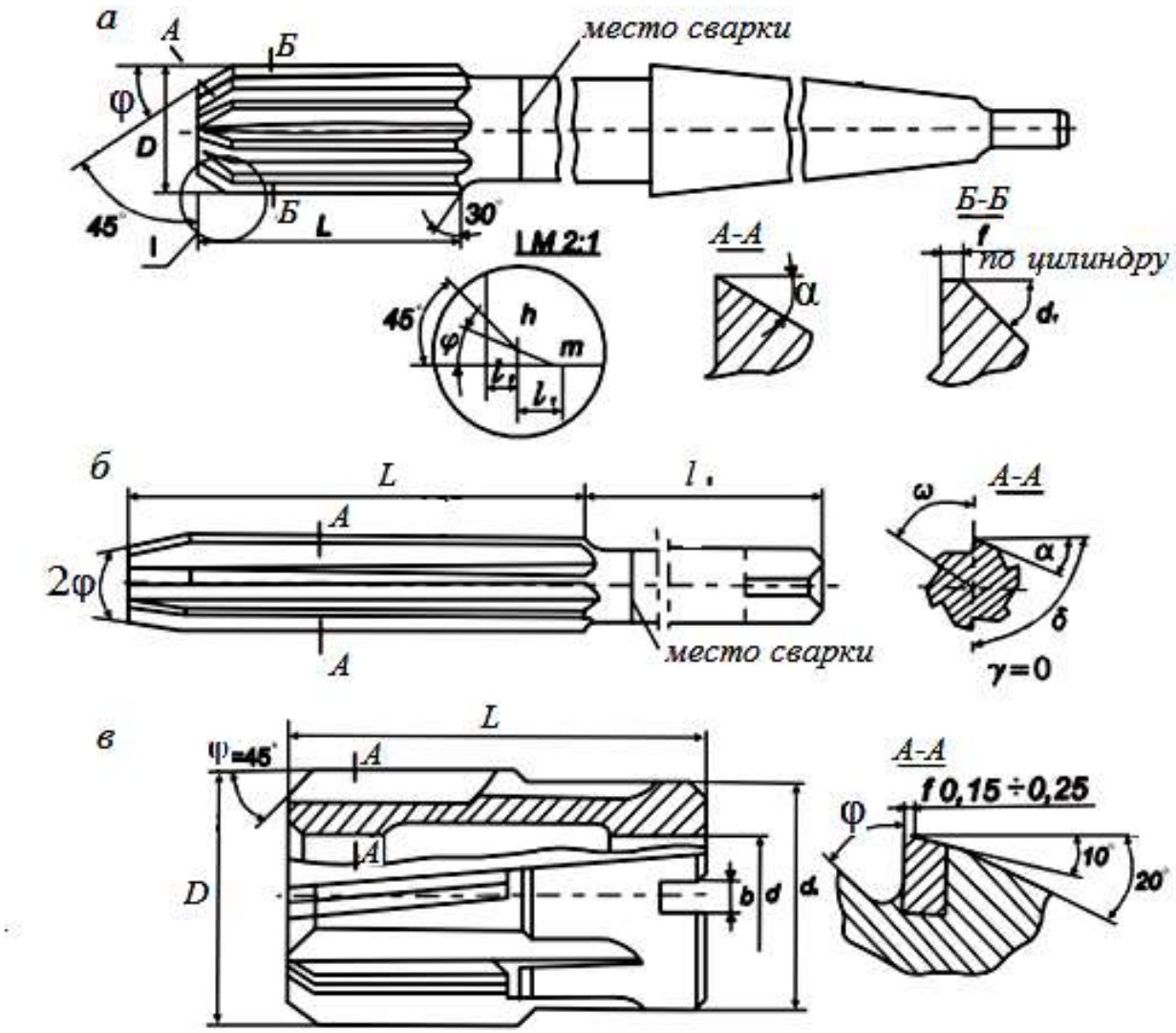



Рис. 6.5. Развёртки:
*а* - цилиндрическая машинная, *б* - цилиндрическая ручная, *в* - насадная машинная.

Машинные и ручные развёртки различаются рабочей и хвостовой частями. В машинных развёртках рабочая часть короткая $L = (1{,}2 – 1{,}5)D$, где $D$ – диаметр развёртки, у ручных – $L \approx 50$. Угол в плане φ у машинных развёрток принимается равным 15 – 45°, в ручных развёртках φ = 1,5 ... 5° – для лучшего направления и центрования.

У машинных развёрток хвостовик оформлен в виде конуса с лапкой, а у ручных он короткий, цилиндрический с квадратом (рис. 6.5).

Развёртка выполняется с прямыми и винтовыми зубьями. Последние обеспечивают более высокое качество обработанной поверхности, лучше центрируются, могут применяться для обработки не сплошных цилиндрических поверхностей. Для повышения качества

обработки поверхностей (устранения огранки) зубья развёртки располагаются с переменным окружным шагом.

В работе используются: штангенциркуль, микрометр, универсальный угломер, набор зенкеров и разверток.

## Порядок выполнения работы

1) Ознакомиться с основными типами осевого инструмента и их конструкцией.

2) Изучить инструменты для измерения геометрических и конструктивных элементов осевого инструмента.

3) Выполнить эскиз выданного инструмента, указать все его размеры и геометрические параметры.

4) Произвести замеры основных элементов инструмента

## Содержание отчёта

Отчет выполняется на бланке. В отчете указывается следующее:

1. Цель работы.
2. Перечисление основных видов осевого инструмента.
3. Эскиз инструмента.
4. Таблица с результатами измерения конструктивных элементов и геометрических параметров инструмента (см. бланк отчета).
5. Таблица с результатами измерения величин заднего и переднего углов (см. бланк отчета).
6. Привести схему обработки данным инструментом.
7. Указать один станок для выполнения обработки данным инструментом. Модель станка расшифровать.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назначение и основные типы свёрл.
2. Назовите рабочие поверхности режущего клина сверла, режущие кромки и укажите их назначение.
3. Как отводится стружка от режущих кромок сверла?
4. Какие формы может иметь задняя поверхность сверла и в каких типах свёрл она применяется?
5. Как измеряется задний угол сверла?
6. Какими величинами определяется задний угол сверла в рассматриваемой точке?

7. Назначение и основные типы зенкеров.
8. Назначение и основные типы развёрток;
9. Как крепится развёртка на станке?
10. Почему стружечные канавки развёртки делаются мелкими?
11. Почему зубья развёртки выполняются чётными?
12. Каковы преимущества развёрток с винтовыми зубьями?
13. Чем конструктивно ручная развёртка отличается от машинной?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7
## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФРЕЗ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

**Цель работы:** ознакомление с основными типами фрез, их конструктивными элементами и геометрическими параметрами.

### Краткие сведения о фрезах

Фрезы являются одним из самых распространенных инструментов, применяемых для обработки плоскостей, пазов, уступов, разрезки металла. По конструкции, способу крепления и назначению различают следующие виды фрез: *насадные и концевые* (рис. 7.1, *в*); *цилиндрические* (рис. 7.1, *а*), *конические (угловые) и дисковые* (рис. 7.1, *б, г*); *с прямыми, винтовыми и наклонными зубьями*; *острозаточные и затылованные* (рис. 7.1, *д*); *отрезные и пазовые и др.*

Фреза – многозубый инструмент, корпус которого может иметь форму стержня, втулки или диска. Фрезы в форме стержня устанавливаются в шпиндель станка коническим хвостовиком. Передаваемый фрезе крутящий момент зависит от сил трения на конусе. Эти фрезы называют хвостовыми или концевыми. Фрезы типа втулки или диска насаживают отверстием на специальную оправку, поэтому их называют *насадными*. Крутящий момент такой фрезе передает шпонка.

*Концевые фрезы* применяют для обработки уступов и глубоких пазов. Их изготовляют с 3 – 6 зубьями. Разновидностью концевых фрез являются шпоночная, концевая фреза и фреза для Т – образных пазов. Отличительными особенностями конструкции шпоночной фрезы являются наличие ленточки на цилиндрической части и число зубьев, равное двум.

*К насадным фрезам* относятся цилиндрические, торцевые и дисковые. Ими обрабатывают открытые плоскости, неглубокие пазы простой и сложной формы.

Каждый зуб фрезы представляет собой отдельный резец, рабочая часть которого имеет форму клина. Его передняя поверхность - плоскость, задняя поверхность (спинка) в зависимости от назначения может быть *острозаточенной* или *затылованной* (рис. 7.2).

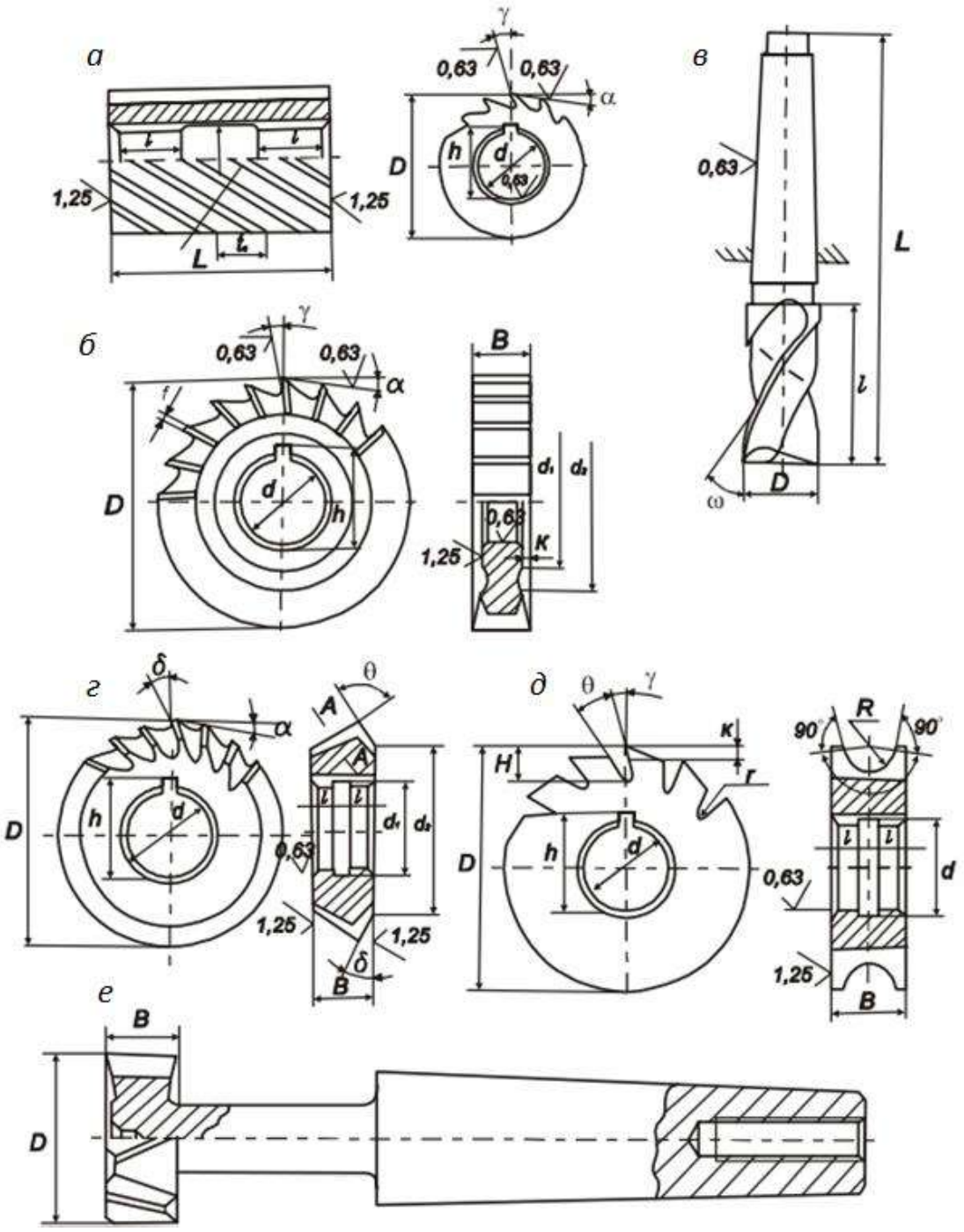



Рис. 7.1. Фрезы общего назначения:
*а* – цилиндрическая,*б* – дисковая трёхсторонняя, *в* – шпоночная, *г* – угловая, *д* – фасонная (затылованная), *е* – для Т-образных пазов

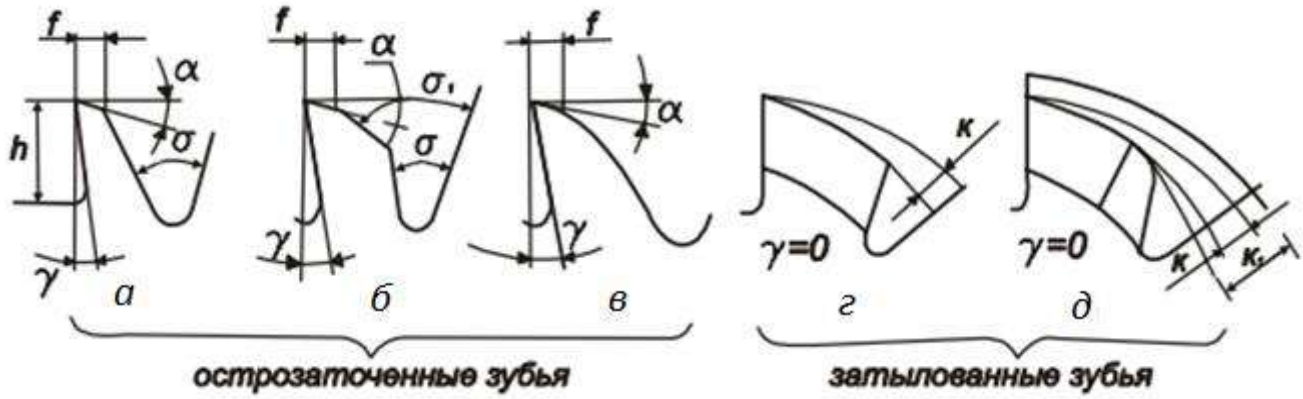



Рис. 7.2. Формы зубьев фрез

В острозаточенных фрезах спинка зуба может иметь одну из трёх форм: одно-, двухугловую или параболическую (рис. 7.2 *а, б, в*). Первая форма зуба обладает невысокой прочностью и применяется для чистовых и мелкозубых фрез. Вторая и третья формы имеют усиленную спинку и используются в черновых крупнозубых фрезах.

Фрезы, у которых режущее лезвие (кромка) имеет сложный фасонный профиль, выполняются затылованными. Задняя поверхность режущего клина оформлена на них по спирали Архимеда (рис. 7.2, *г, д*). Такая форма позволяет сохранить профиль зуба при переточках. Затылованные фрезы выполняются с одним (*г*) или двойным (*д*) затылованием. С двойным затылованием изготовляются фрезы чистовые, спинка зубьев которых шлифуется. Прошлифовать весь затылок зуба технологически невозможно, так как при выходе шлифовальный круг заденет соседний зуб. Поэтому второе затылование выполняется для того, чтобы нешлифованная часть зуба по размерам была меньше шлифованной, расположенной в начале зуба, а шлифовальный круг имел свободный выход. Эти фрезы, как правило, не имеют переднего угла ($\gamma = 0$), но при черновых работах допускается изготовление их с положительным передним углом. В этом случае точность обработки снижается.

Между зубьями фрезы расположены канавки, в которых собирается стружка. Размеры канавки должны обеспечить свободное размещение стружки. Поэтому для черновых работ, когда снимаются слои толщиной 3-8 мм, объём стружечной канавки должен быть больше, чем при чистовом фрезеровании.

Износ зуба фрезы происходит в основном по задней поверхности и по уголкам. Для восстановления режущей способности зуба надо удалить изношенный слой. Переточка остро заточенных фрез

производится по задней поверхности, а затылованных – по передней, так как задняя имеет сложный профиль.

## Измерение конструктивных и геометрических параметров фрезы

В работе используются: инструментальная плита, угломер Бабчинцера, штангенциркуль, набор фрез.

Измерение геометрических параметров зуба остро заточенных фрез угломером Бабчинцера показано на рис. 7.3.

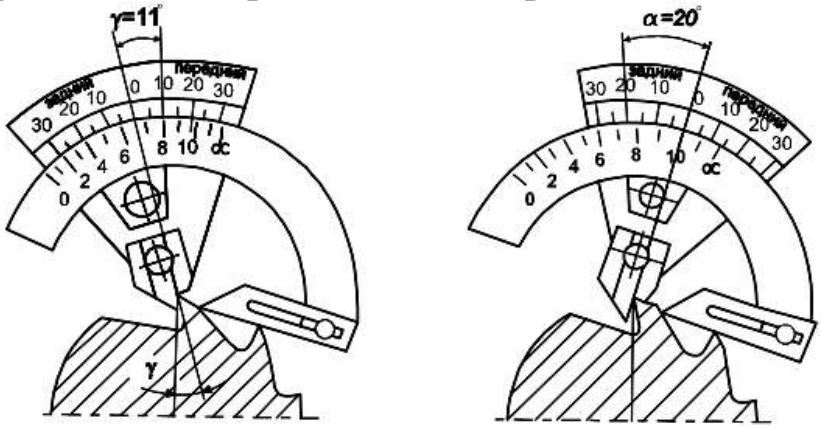



Рис. 7.3. Положение угломера при замере углов режущего зуба фрезы.

## Порядок выполнения работы

1) Ознакомиться с основными типами фрез и их конструкцией.

2) Изучить инструменты для измерения геометрических и конструктивных элементов фрез.

3) Выполнить эскиз фрезы и указать все размеры и геометрические параметры.

4) Произвести замеры основных элементов фрезы

## Содержание отчёта

Отчет выполняется на бланке. В отчете указывается следующее:

1. Цель работы.
2. Перечислить основные типы фрез.
3. Эскиз фрезы с указанием всех параметров.
4. Таблица результатов измерений (см.бланк отчета).
5. Эскиз форм спинки зуба острозаточенной и затылованной фрез.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите основные типы фрез и укажите их назначение.
1. В чём отличие концевой фрезы от насадной?
2. Чем конструктивно отличаются фрезы для черновых и чистовых работ?
3. Каковы отличительные особенности концевой шпоночной фрезы?
4. Назовите геометрические параметры режущего клина – фрезы (острозаточенной и затылованной).
5. Назовите конструктивные формы профиля спинки острозаточенных зубьев и укажите их назначение.
6. Назовите конструктивные формы профиля задней поверхности затылованных фрез и укажите их назначение.
7. Как изнашиваются фрезы и по каким поверхностям перетачиваются?

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8
# ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКТА МЕТЧИКОВ

**Цель работы**: исследование конструкции метчиков, усвоение методики измерения основных конструктивных элементов и геометрических параметров.

## Краткие сведения о метчиках

В современном машиностроении широко применяются резьбовые соединения. Нарезка резьбы на внутренней поверхности отверстия выполняется специальным режущим инструментом метчиком. Разнообразие физико-механических свойств современных конструкционных материалов обусловило необходимость создания различных конструктивных форм этих инструментов.

По конструкции различают следующие виды метчиков: а) ручные (комплектные); б) машинные; в) гаечные; г) калибровочные; д) конические; е) плашечные; ж) маточные; з) сборные; и) специальные: с винтовыми стружечными купавками, бесканавочные, переменной жесткости, с коррегированным профилем, с прерывистой резьбой (шахматное расположение витков), с бочкообразными зубьями, твердосплавные, с внутренним отводом стружки, резьбонарезные головки, раскатники и др.

Рассмотрим применение наиболее распространённых метчиков.

Гаечные метчики применяются для нарезки резьбы в гайках. Они имеют длинную хвостовую часть, на которой после нарезки резьбы этим метчиком собираются гайки. Хвостовик может быть прямой или изогнутой формы. Метчики с прямым хвостовиком применяются на многошпиндельных гайконарезных станках периодического действия, метчики с изогнутыми хвостовиками на одношпиндельных гайконарезных станках непрерывного действия.

Машинные метчики используются для нарезания резьбы на станках. Метчики для цилиндрических резьб имеют короткие рабочую и хвостовую части. Для фиксации метчика в патроне станка на хвостовой части имеются кольцевая выточка и квадрат.

Ручные метчики применяются для нарезки резьбы вручную. Для облегчения резания их выпускают в комплекте (по два-три) для работы поочередно. Метчики комплекта имеют разные по величине диаметры и профиль резьбы. Полный профиль имеет только чистовой метчик. Каждый метчик маркируется: резьба, точность, материал.

Ввиду малой скорости резания при резьбонарезании, для изготовления метчика применяются углеродистые, легированные и быстрорежущие стали и в некоторых случаях твёрдые сплавы.

В конструкции любого метчика имеются две части: *рабочая и хвостовик* (рис. 8.1).

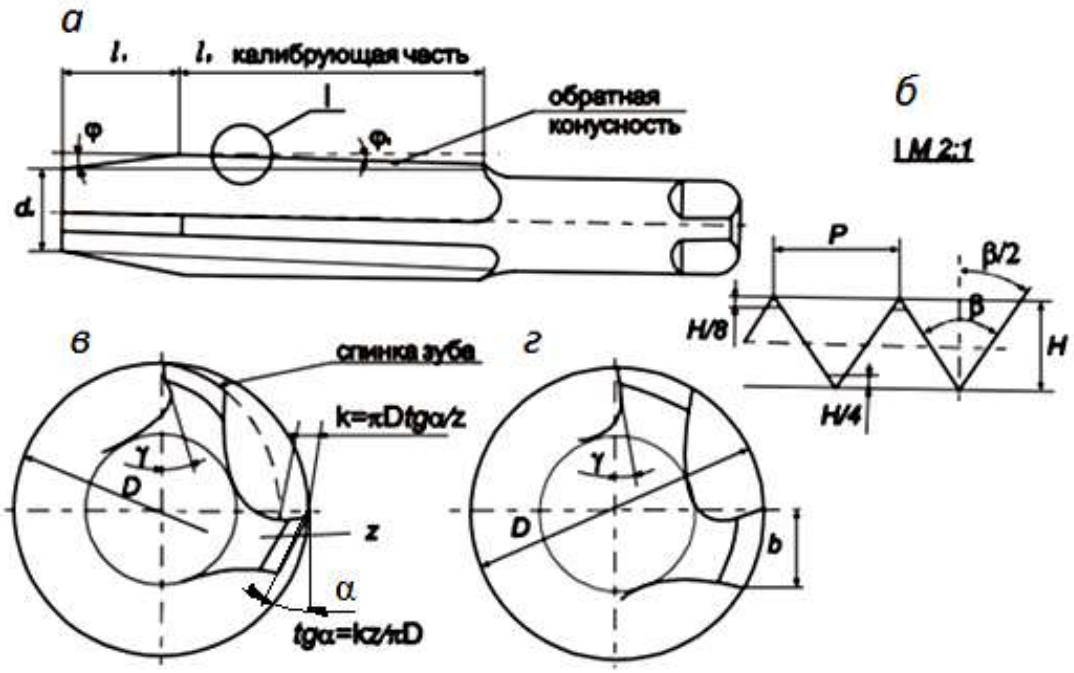



Рис. 8.1. Метчик:
*а* – общий вид; *б* – профиль резьбы; *в* – профиль спинки зуба на заборной части; *г* – профиль спинки зуба на калибрующей части

Рабочая часть состоит из заборной и калибрующей. Заборная часть, имеющая угол заборного конуса φ, выполняет процесс резания, а калибрующая направляет (затягивает) метчик в отверстие и зачищает резьбу, служит резервом для переточки. Хвостовая часть заканчивается квадратом, с помощью которого метчику передаётся крутящий момент.

Процесс резания метчиком может выполняться по цилиндрической (генераторной) или конической (профильной) схеме, в зависимости от конструктивного оформления заборной части. Цилиндрическая схема резания применяется, как правило, в комплектных ручных и машинных метчиках. Особенность работы состоит в том, что за один оборот метчика каждый зуб срезает своей вершиной плоскую стружку толщиной $a$ = 0,02 … 0,15 мм. Режущая кромка, в этом случае, представляет собой прямую линию. Коническая схема используется при нарезании резьбы в конических отверстиях. В этом случае процесс резания на зубьях заборного конуса происходит не только по вершине, но и по боковым сторонам зуба, что усложняет процесс резания и отвод стружки в стружечную канавку.

Зубьям на заборной части придаются передний – γ и задний – α углы (рис. 8.1, *в*). Величина переднего угла назначается с учётом обрабатываемого материала, задний угол зависит от типа метчика (табл. 8.1).

Таблица 8.1

**Углы режущего клина метчика**

| Обрабатываемый материал | Передний угол, γ, град. | Тип метчика | Задний угол, α, град. |
|---|---|---|---|
| Чугун. бронза, твердая сталь | 0 – 5 | Ручной | 6 – 8 |
| Латунь. Сталь средней твердости | 8 – 10 | Гаечный и машинный | 10 – 12 |
| Сталь мягкая и вязкая | 12 – 15 | Метчик для легких сплавов: – глухих отв. | 3 – 4 |
| Легкие сплавы | 20 – 30 | – сквозных | 5 - 6 |

Зубья на калибрующей части метчиков общего назначения не имеют заднего угла и спинка зуба выполняется по цилиндру (рис. 8.1 *г*). Для уменьшения трения на калибрующей части диаметр метчика по направлению к хвостовику уменьшается (обратный конус φ ) на величину 0,01 – 0,08 мм и на 100 мм длины (рис. 8.1).

Профиль канавки между зубьями (перьями) определяет характер

размещения стружки, прочность метчика и форму передней поверхности режущего клина.

Изнашивание метчиков происходит в основном по задней поверхности. Признаком износа является ухудшение чистоты нарезаемой резьбы. Перетачиваются метчики по передней поверхности.

## Измерение конструктивных и геометрических параметров метчика

Для измерения метчика применяются: штангенциркуль – для определения линейных размеров; угломер – для измерения геометрических параметров зуба; микрометр резьбовой для измерения среднего диаметра; специальный прибор с индикатором – для определения заднего угла и биения зубьев метчика на заборной и калибрующей частях, штангенрейсмас – для измерения высоты центров.

1. Наружный диаметр $d$ измеряется между двумя диаметрально противоположными точками, расположенными на вершинах резьбы метчика в начале калибрующей части.

2. Внутренний диаметр $d_1$ измеряется между точками впадин резьбы в начале калибрующей части метчика.

3. Средний диаметр $d_2$ является основной величиной, характеризующей степень точности метчика. Величину среднего диаметра измеряют между двумя диаметрально противоположными точками вершины и впадины резьбы (рис. 8.2), используя соответствующие наконечники для микрометра (призму и конус).

4. Угол в плане φ замеряют угломером.

5. Обратная конусность на калибрующей части метчика $\varphi_1$ может быть определена так: надо измерить резьбовым микрометром средний диаметр метчика в двух местах, как показано на рис. 8.3.

Величину обратной конусности на длине 100 мм можно рассчитать по формуле:

$$\mathrm{tg}\varphi = \frac{d' - \mathrm{d}''}{2l},$$

где $d'$ и $d''$ – средние диаметры метчика в положениях I и II; $\ell$ -расстояние по оси между диаметрами $d'$ и $d''$.

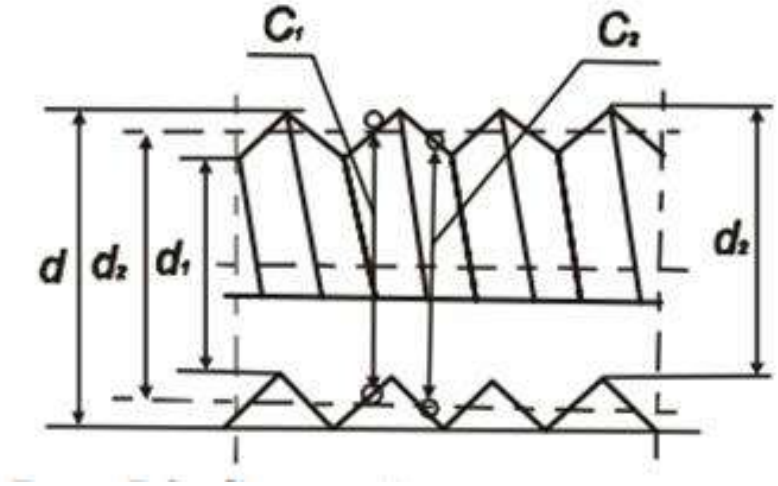



Рис. 8.2. Средний диаметр метчика.

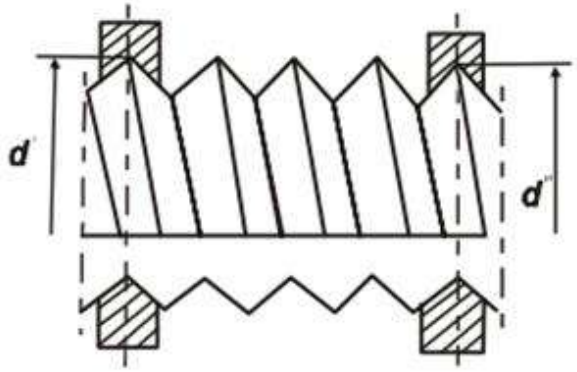



Рис. 8.3. Схема измерения обратной конусности.

6. Для контроля величины заднего угла на режущей и калибрующей частях, метчик устанавливается в центрах специального прибора. Поворачивая метчик вокруг его оси, определяют спад затылка зуба $K_1$ по ширине пера $b$ , которая измеряется штангенциркулем (рис. 8.4). Величину заднего угла рассчитывают:

$$\mathrm{tg}\alpha = K_1/b \ .$$

7. Толщина стружки, снимаемая одним зубом метчика, работающего по цилиндрической схеме резания, зависит от числа зубьев метчика и величины угла φ: $a = P/z\ \mathrm{tg}\varphi$, где $P$ – шаг резьбы.

8. Передний угол γ рассчитывается по результатам измерения штангенрейсмасом высоты положения передней поверхности метчика $M$, установленного в центрах относительно высоты центра $H$ (рис. 8.5).

$$\gamma = \arcsin\frac{2h}{d} = \arcsin\frac{2(H-M)}{d}\ .$$

9. Остальные линейные размеры, показанные на рис. 8.1, измеряются штангенциркулем

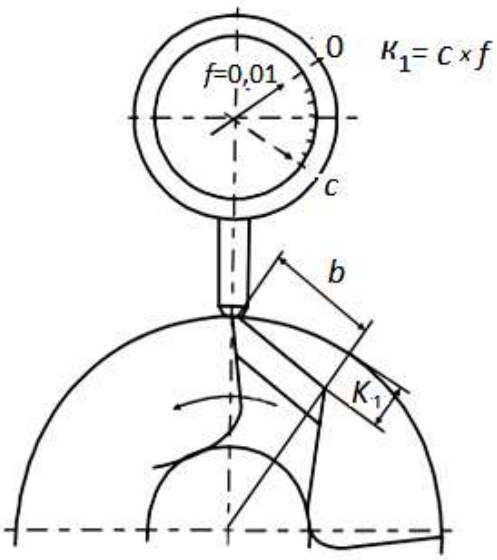



Рис. 8.4. Схема измерения заднего угла

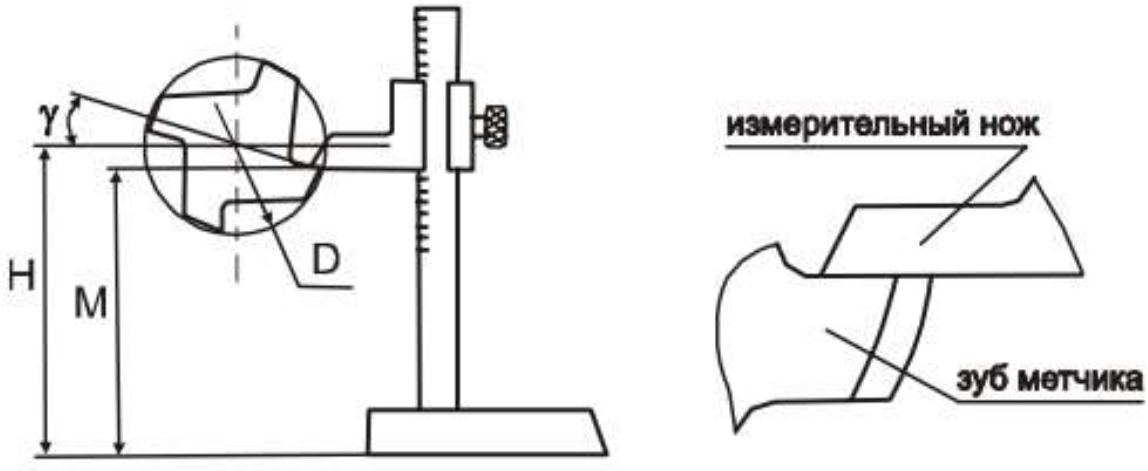



Рис. 8.5. Схема измерения переднего угла.

## Порядок выполнения работы

1) Ознакомиться с типовыми конструкциями резьбонарезных инструментов.

2) Изучить приборы для измерения метчиков.

3) Измерить конструктивные и геометрические параметры комплекта метчиков.

4) Обработать экспериментальные данные и внести их в протокол лабораторной работы.

5) Сопоставить полученные результаты со справочными данными и сделать вывод о классе точности метчика; дать рекомендации, для какого материала следует его применять.

## Содержание отчёта

Отчет выполняется на бланке. В отчете указывается следующее:

1. Цель работы.

2. Чертёж метчика (проставить числовые значения всех размеров, указанных на рис. 8.1).

3. Таблица расчётных данных.

4. Указать маркировку ручного метчика № 1 и 2.

5. Указать в каком материале рекомендуется нарезать резьбу исследуемым метчиком?

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие типы метчиков применяются в машиностроении?

2. Чем конструктивно различаются гаечные, ручные и машинные метчики?

3. Каковы основные части метчика, их назначение?

4. Какую форму имеет режущая кромка метчика?

5. Какие схемы резания возможны в метчике и в чём их различие?

6. Какая схема резания применяется в комплектных метчиках?

7. Все ли зубья метчика имеют задний угол?

8. От каких факторов зависит величина переднего и заднего углов? Как замерить углы $\gamma$ и $\alpha$ ?

9. Для чего на калибрующей части метчика выполняется обратный конус? Как замерить величину обратной конусности?

10. Из каких материалов изготавливаются метчики?

11. Как изнашиваются и перетачиваются метчики?

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9
# ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЗУБОРЕЗНОГО ДОЛБЯКА

**Цель работы:** а) исследование конструкции зуборезного долбяка; б) усвоение методики измерения конструктивных элементов и геометрических параметров; в) изучение маркировки зуборезных инструментов.

## Краткие сведения о зуборезных долбяках

Нарезание зубьев на цилиндрических заготовках выполняется на зубодолбежных станках мод. 514, 5В12 и др. В качестве режущего используется специальный инструмент – зуборезный долбяк. Его конструкция определяется особенностью процесса нарезания: на станке воспроизводится зацепление двух цилиндрических колёс, из которых одно является изделием, а второе – режущим инструментом (рис. 9.1). По внешнему виду зуборезный долбяк похож на цилиндрическое зубчатое колесо (рис. 9.2). Каждый зуб имеет три режущих кромки: одну на вершине зуба (1) и две боковые (2). Для образования режущего клина на его зубьях выполняются передние γ и задние α углы.

Задний угол на вершине режущей кромке придает долбяку вид конического колеса, у которого высота головки зуба (разность между наружным диаметром и делительным цилиндром) измеряется от $h_1$ до $h_i$. После каждой переточки высота головки зуба будет уменьшаться.

Если у нового долбяка высота головки зуба $h_1$, то после первой переточки – $h_2$, после второй – $h_3$ и т. д. (см. рис. 9.2 ). Такое отклонение высоты головки зуба от некоторой расчётной величины называется высотной коррекцией. Можно сделать вывод: задний угол на вершинной режущей кромке создает высотную коррекцию зубьев долбяка.

На боковых режущих кромках также выполняются задние углы α δ, чтобы исключить трение боковой поверхности зуба долбяка о боковую поверхность зуба изделия (рис. 9.3). Наличие боковых углов приводит при переточках к уменьшению толщины зуба долбяка от $S$ до $S_i$. Иными словами, задний боковой угол создает коррекцию по толщине зуба.

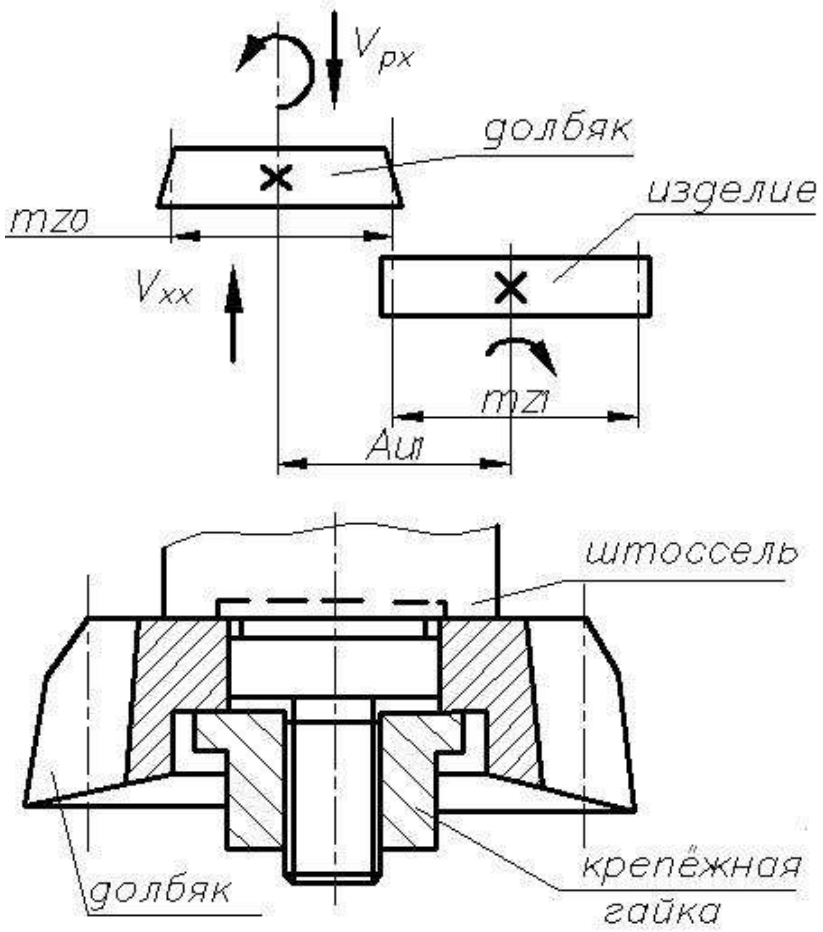



Рис . 9.1. Схема работы и крепления зуборезного долбяка

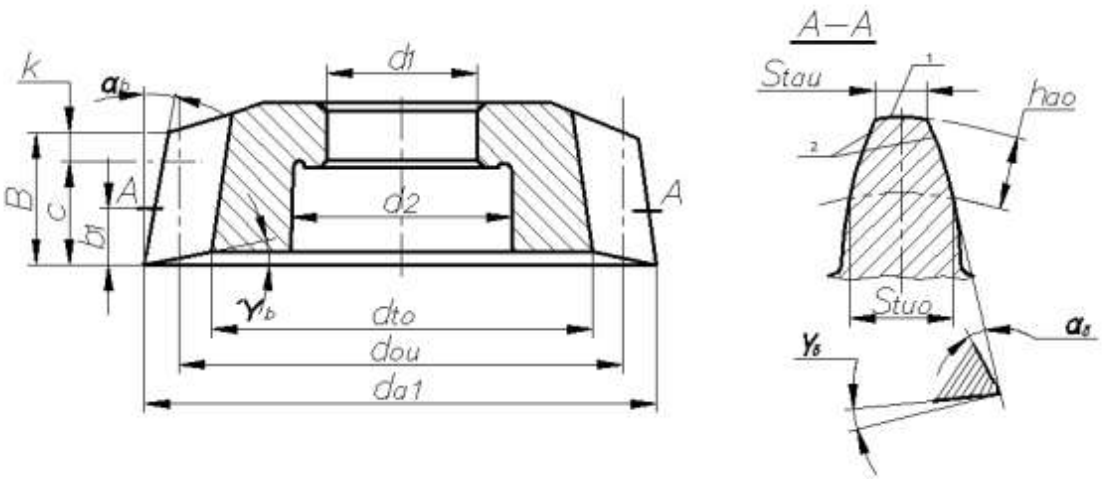



Рис. 9.2. Зуборезный долбяк

Передний и задний углы создают отклонение профиля зуба долбяка от теоретического и приводят к изменению профильного угла. Расчётный профильный угол зуба долбяка должен быть равен 20°, а

углы $\gamma_b$ и $\alpha_b$ вносят коррекцию, и действительный угол будет равен:

$$\mathrm{tg}\alpha_u = \mathrm{tg}\alpha/(1 - \mathrm{tg}\gamma_b\,\mathrm{tg}\alpha_b)\,.$$

Таким образом, наличие углов $\gamma_b$ и $\alpha_b$ приводит к коррекции зуба долбяка по высоте головки, по толщине зуба и профильному углу. Поэтому зуборезный прямозубый долбяк представляет собой корригированное зубчатое колесо.

Для расчёта долбяка одно из торцевых сечений А-А (перпендикулярное к оси) принимают за исходное. В нём параметры зуба долбяка $S_{tau}$, $S_{tuo}$ $h_{ao}$ , $\alpha_b$ равны параметрам зуба инструментальной рейки. Это сечение называется исходным, или расчётным. Оно расположено на расстоянии $b_1 = y_1/\mathrm{tg}\alpha_b$ от вершины зуба нового долбяка. Величина $b_1$ называется исходным расстоянием. Принято считать, что в сечениях, расположенных слева от исходного, зубья имеют положительную коррекцию (высота головки зуба больше стандартного значения: $h_a$ =1,25$m$, ($h_{\text{ou}}$ 1, >$h_{\text{ao}}$), а справа – отрицательную ($h_{\text{ou}}$ 2, > $h_{\text{ao}}$).

По мере затупления долбяк перетачивают только по передней поверхности, снимая каждый раз слой металла толщиной $\Delta$ до 0,5 мм. Наибольшая величина стачивания определяется прочностью оставшегося тела зуба $K$ и высотой головки зуба долбяка: $C = B - K$ (рис. 9.2). Величина $K$ приводится в табл. 9.1.

Долбяки изготавливают из высококачественной быстрорежущей стали , карбидная неоднородность которой не выше 3–4 баллов. Учитывая специфику настройки зубодолбежного станка, в маркировке долбяка указывают: модуль, число зубьев, номинальный диаметр делительного цилиндра, профильный угол зубчатого зацепления, материал, класс точности, завод-изготовитель, номер долбяка.

Таблица 9.1

**Зависимость величины *K* от модуля**

| Номинальный модуль m, мм | Номинальный диаметр делительного цилиндра $d_{ou}$, мм | Ширина полностью изношенного долбяка *K*, мм |
|---|---|---|
| 1,75 – 2,5 | 75 | 5 |
| 2,75 – 4,5 | 75 | 6,5 |
| 1,75–2,5 | 100 | 100 |
| 2,75 – 4,0 | 4,5 | 5,5 |

## Измерение конструктивных и геометрических параметров зуборезного долбяка

Для измерения долбяка в лабораторной работе применяются штангенциркуль и универсальный угломер.

Для исследования конструкции долбяка необходимо выполнить эскиз долбяка, замерить или рассчитать и проставить на эскизе размеры, показанные на рис. 9.2, 9.3. При выполнении расчёта принять:

1) высоту головки зуба $h_{au} = m\,f$, где $f = 1{,}25$, если $m < 2{,}5$ мм, и $f = 1{,}3$, если $m > 2{,}5$ мм;

2) толщину зуба по делительному цилиндру $S_{tuo} = 0{,}5\pi\, m$;

3) наружный диаметр $d_{a1}$ – замером; $d = d + 2\,h_{au}$, $d_{ou} = mz_o$;

4) исходное расстояние $b_1 = y_1/tg\alpha_b$; $y_1 = 0{,}5\,(d_{a1} - d_a)$;

5) предельный размер стачивания $C = B + K$.

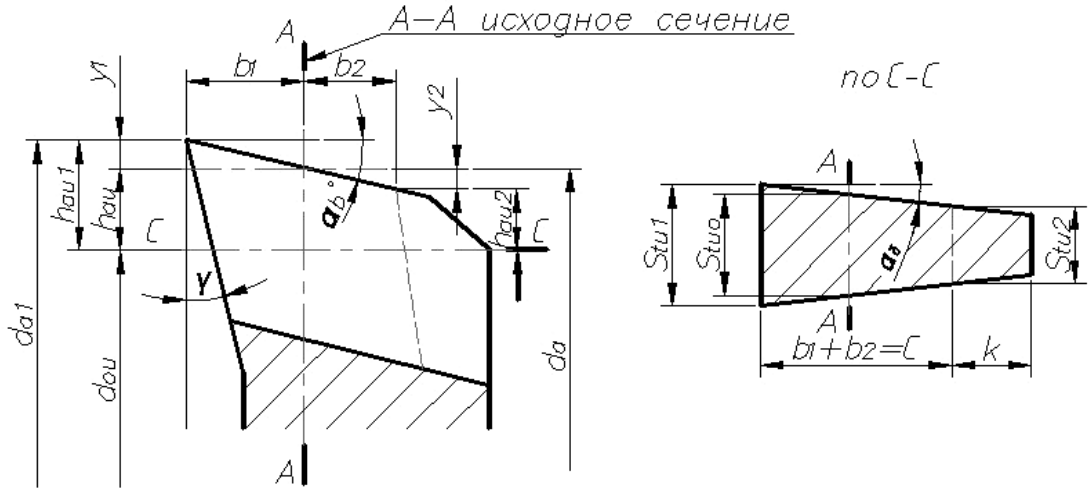



Рис 9.3. Основные конструктивные размера зуба

6) отрицательное смещение исходного сечения $b_2 = C - b_1$;

7) параметры зуба долбяка по передней поверхности (нового):

а) высоту головки $h_{au} = h_{au} + y_1$;

б) толщину зуба $S_{tu1} = S_{tu0} + 2b_1 tg\alpha_\delta$; $\alpha_\delta$ – замером.

## Порядок выполнения работы

1) Изучить приборы для измерения.

2) Измерить габаритные размеры долбяка.

3) Измерить геометрические параметры зуба долбяка.

4) Обработать экспериментальные данные и занести в отчёт о

лабораторной работе.

5) Изучить маркировку зуборезных инструментов.

## Содержание отчёта

1. Эскиз долбяка и профиля зуба со всеми размерами (см. рис. 9.2, рис. 9.3).

2. Таблица расчётных данных (табл. 9).

3. Заключение о качестве зубьев, нарезанных новым и предельно сточенным долбяком, сопоставление возможных величин бокового и радиального зазора в зубчатой передаче, нарезанной исследуемым долбяком.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каким методом нарезают зубья на зубодолбёжном станке?
2. Сколько режущих кромок имеет каждый зуб долбяка?
3. Назовите углы резания долбяка, покажите рабочие поверхности.
4. Какой параметр зуба долбяка изменяется под влиянием заднего угла на вершинной режущей кромке?
5. Какой параметр зуба долбяка изменяется под влиянием заднего угла на боковой режущей кромке?
6. Почему профильный угол долбяка не соответствует стандартным значениям 20°?
7. Какое сечение долбяка называется исходным?
8. Что показывает величина исходного расстояния?
9. Как изменяется высота головки зуба в зоне слева и справа от исходного сечения?
10. По какой поверхности перетачиваются зубья долбяка?
11. Из каких материалов изготавливаются долбяки?
12. Какие параметры входят в маркировку долбяка?

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10
# ИЗУЧЕНИЕ СХЕМ РЕЗАНИЯ ПРИ ПРОТЯГИВАНИИ

**Цель работы:**

а) изучение конструкции протяжек для внутреннего протягивания;

б) изучение схем резания протяжек;

в) освоение методики измерения геометрических параметров зубьев протяжки.

## Краткие сведения о протяжках

В массовом и крупносерийном производствах для обработки внутренних и наружных поверхностей применяются протяжки. Резание протяжками идёт на низких скоростях – 10–24 м/мин. В работе участвует от 3 до 20 зубьев одновременно, поэтому производительность процесса протягивания в 2–5раз превышает производительность таких видов обработки, как развёртывание, зенкерование, фрезерование, строгание.

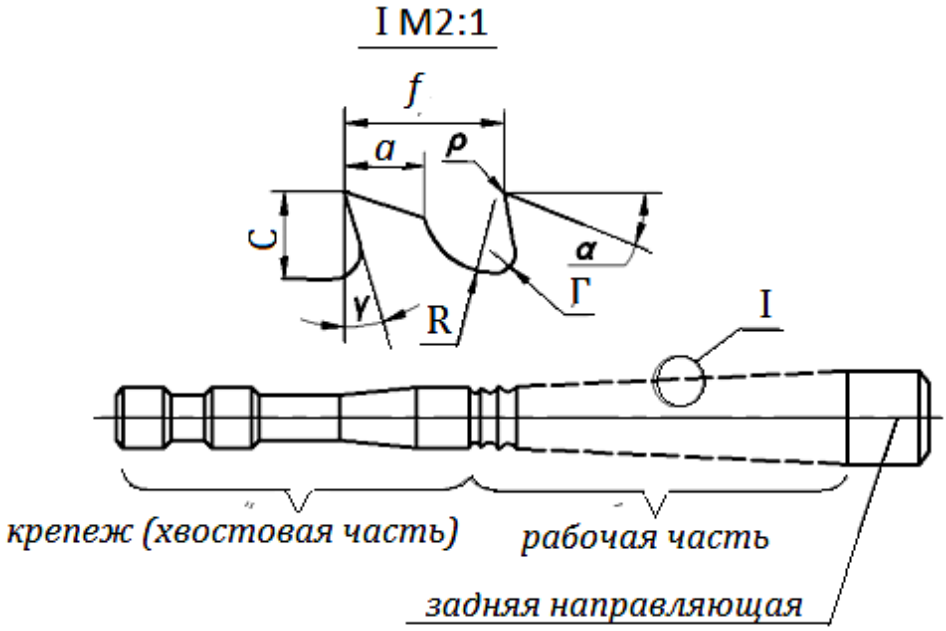



Рис. 10.1. Круглая протяжка

Протяжка состоит из крепёжной и рабочей частей (рис. 10.1). Форма крепёжной части определяется способом соединения протяжки с рабочим механизмом станка и регламентируется ГОСТ 16158-701.

На рабочей части расположены режущие зубья. Высота каждого

зуба различна и возрастает по направлению к задней направляющей.

Разность высот двух смежных зубьев определяет подачу:

$$S_z = D_i - D_{i-1}.$$

Таким образом, протяжка сама обеспечивает подачу, и протяжные станки не имеют механизма подач.

Режущие зубья по назначению делятся на черновые, чистовые и калибрующие, которые имеют различную высоту в зависимости от вида подачи. Черновые зубья работают с наибольшей подачей, а калибрующие, которые производят только зачистку поверхности, не имеют подачи. Все калибрующие зубья выполняются одинаковыми по высоте.

Между зубьями протяжки расположены стружечные канавки, в которых размещается снятая зубом стружка.

При обработке широких поверхностей ($B > 10$ мм) и отверстий на задней поверхности режущего клина делаются стружкоразделительные канавки. Они делят широкую стружку на узкие полоски для лучшего её завивания и размещения между зубьями протяжки. Калибрующие зубья таких канавок не имеют, так как резание не производят. Форма зубьев протяжки показана на рис. 10.1.

Различают *три основных схемы резания*: *профильную* (одинарную), *генераторную* (ступенчатую) и *прогрессивную* (групповую).

Профильная схема резания (рис. 10.2) характеризуется следующими особенностями:

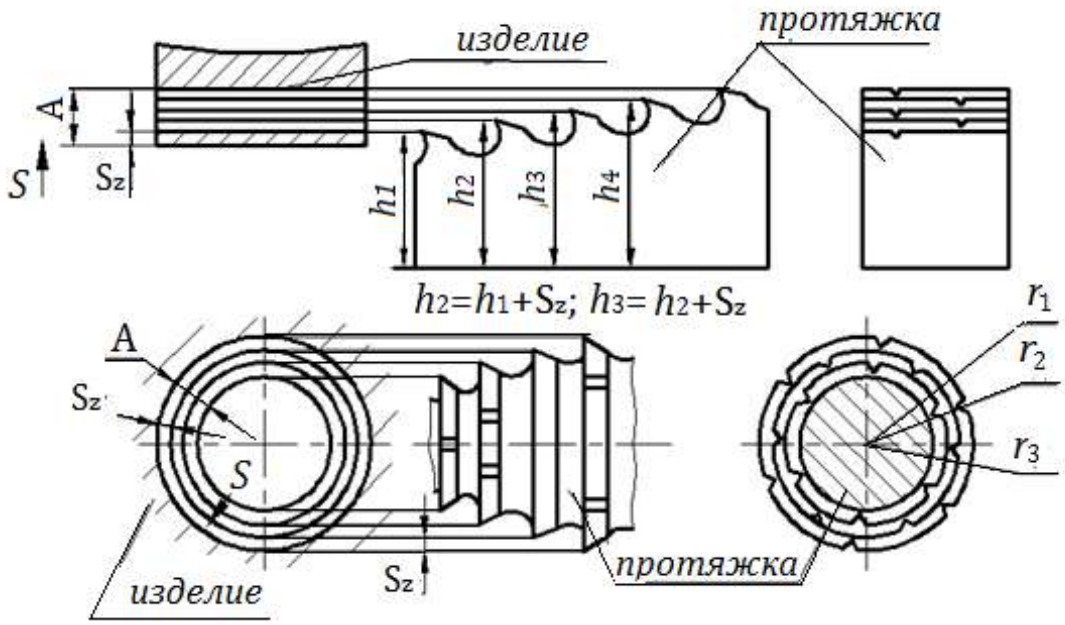



Рис. 10.2. Протяжки профильной схемы резания

1) направление подачи перпендикулярно обрабатываемой поверхно-

сти.

2) на задней поверхности этих зубьев выполняются мелкие стружкоразделительнные канавки ($b$ = 0,6-1-1,2 мм, $h$ = 0,4-0,8 мм), которые располагаются в шахматном порядке. Там, где на зубьях имеется канавка, металл не снимается (нет режущей кромки), а следующий зуб должен снять двойной слой металла: тот, что не снял предыдущий зуб, и тот, что должен снять. Это приводит к местным перегрузкам и неравномерной нагрузке на зуб. Кроме того, мелкие канавки на боковых сторонах не имеют задних углов. В результате при резании по этим поверхностям возникает значительное трение, возрастает усилие протягивания.

3) каждый зуб протяжки по высоте делается большим предыдущего на величину подачи. Размеры последнего зуба определяют размеры обрабатываемой поверхности. Эта схема резания характеризуется не равномерностью нагрузки на зуб.

**Генераторная** схема резания (рис. 10.3) назначается при обработке боковых сторон *1*, *2* шпоночного паза в отверстии.

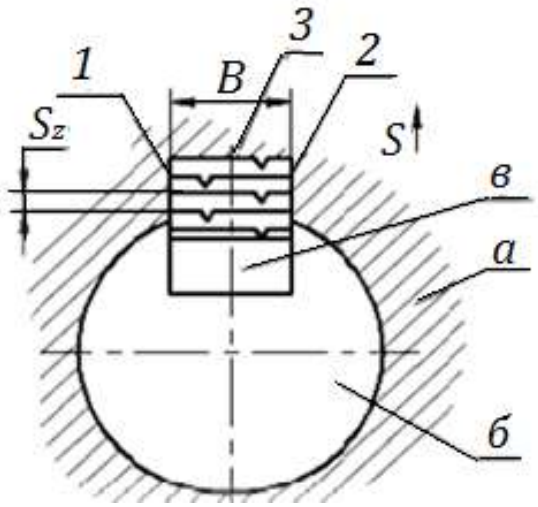



Рис. 10.3. Протяжка генераторной схемы резания:
*а* – изделие*; б* – направляющая втулка; *в* – протяжка

Основные признаки этой схемы резания:

1) Направление подачи параллельно обрабатываемой поверхности.

2) Все зубья протяжки выполняются одинаковой ширины по отношению к обрабатываемым поверхностям *1*, *2*. Каждый зуб оставляет на поверхности риску-след своего движения. В образовании профиля боковых сторон шпоночного паза участвуют все зубья протяжки, поэтому шероховатость, поверхности будет большой.

3) Если $B$ > 10 мм, то на зубьях выполняются мелкие стружкоразде-

лительные канавки, как и при профильной схеме резания.

**Групповая** схема резания (рис. 10.4) имеет следующие отличия:

1) Все зубья протяжки делятся на группы по 2 - 4 зуба. Высота (диаметр) зубьев, входящих в группу, одинакова. Подача осуществляется путём увеличения высоты зубьев каждой последующей группы.

2) Направление подачи: между зубьями в группе – параллельное обрабатываемой поверхности (генераторная схема), а между группами-перпендикулярное обрабатываемой поверхности (профильная схема).

3) На зубьях выполняются широкие и глубокие стружкоразделительные канавки в форме лунок (выкружек) или трапеций. Там, где расположена такая канавка в зубе, металл не снимается. Этот оставшийся на поверхности металл удаляется следующим зубом группы, имеющим такую же высоту, что и предыдущий.

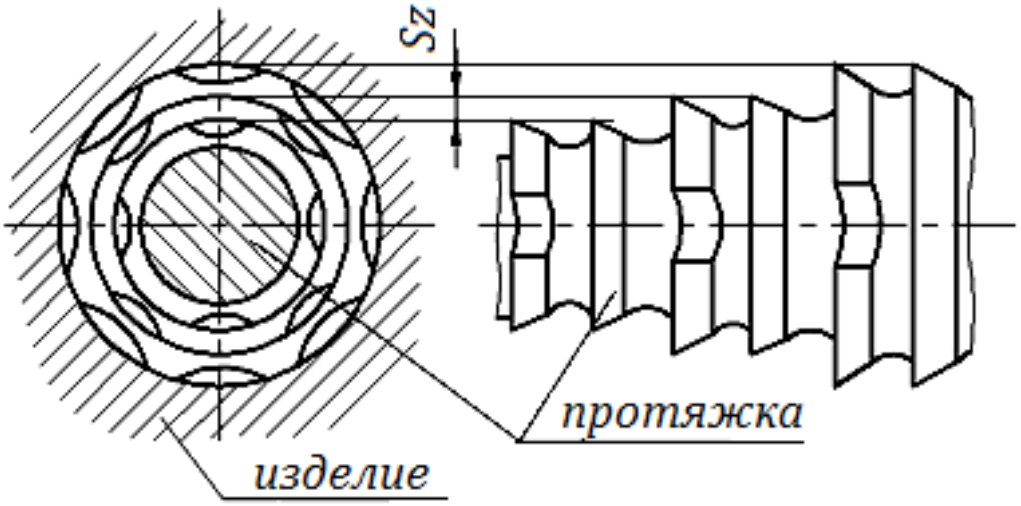



Рис. 10.4. Протяжная групповая схема резания

При групповых схемах резания условия работы протяжек улучшаются, зубья нагружены равномерно, широкие стружкоразделительные канавки имеют задние углы на боковых сторонах. Все это позволяет работать с большими подачами. Генераторную и групповую схемы резания рекомендуется применять только для черновых зубьев.

Протяжки для внутреннего протягивания перетачиваются по передней поверхности, чтобы значительно не уменьшался диаметр (высота зуба). Протяжки для наружного протягивания перетачиваются по задней поверхности. Уменьшение высоты зуба компенсируется прокладками, клиньями, которые располагаются под основанием

протяжки.

## Измерение конструктивных и геометрических параметров протяжки

Для измерения в лабораторной работе применяются: штангенциркуль, микрометр, угломер 2УРИ (конструкции М. И. Бабчинцера).

Штангенциркулем определяют габаритные размеры протяжки: длину, размеры зажимной части.

Микрометром измеряют высоту каждого зуба протяжки.

Протяжки зажимают в универсальной стойке и замеряют высоту от опорной поверхности до вершины зуба или диаметры зубьев.

Угломером 2УРИ измеряют геометрические параметры рабочих зубьев протяжки. Положение угломера при замере показано на рис. 10.5.

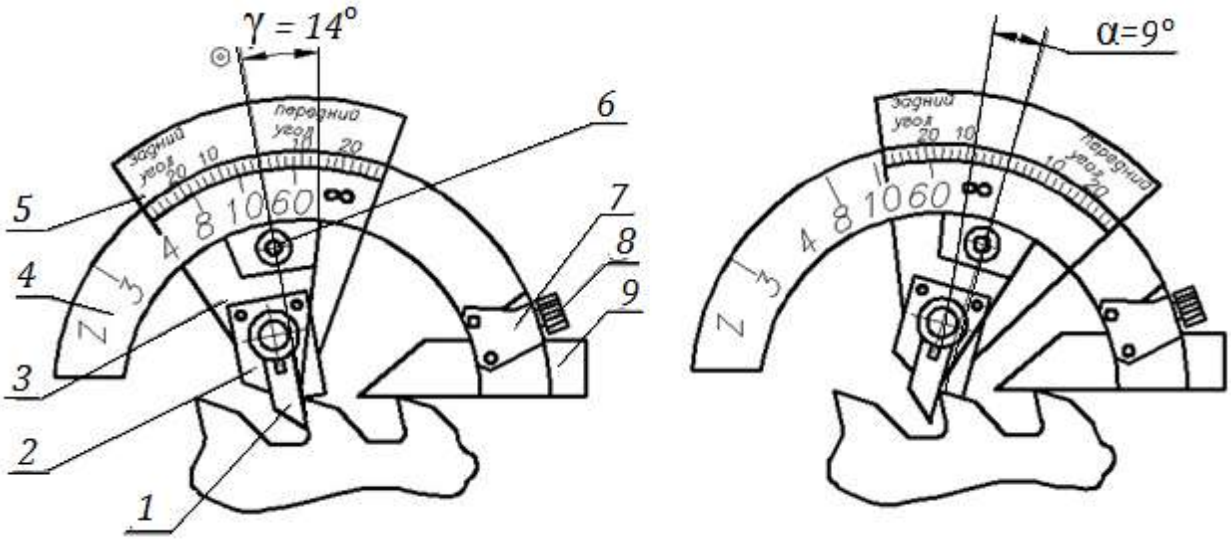



Рис. 10.5. Контроль углов протяжки угломером типа 2 УРИ

## Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию протяжки.
2. Замерить габаритные параметры протяжки и зуба.
3. Установить схему резания протяжек.

## Содержание отчёта

1. Эскиз протяжки с габаритными размерами.
2. Результаты измерений диаметров (высоты) всех зубьев протяжки, подача на каждый зуб, оформляют в виде таблицы 10.1.

3. Чертеж зуба в двух проекциях с линейными и угловыми размерами.

4. Схема резания исследуемой протяжки с перечислением её основных признаков:

- тип схемы резания;
- признаки.

Таблица 10.1

**Геометрические параметры протяжки**

| Номер зуба | 1 | 2 | 3 | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Диаметр (высота), мм | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Подача, мм/зуб | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Тип зуба: черновые | | | чистовые | | | | | | | | | калибрующие | | | | | | |

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему при низких скоростях резания протягивание обеспечивает высокую производительность труда?
2. Почему в протяжном станке нет механизма подач?
3. Чем различаются черновые, чистовые и калибрующие зубья?
4. Каково назначение стружкоразделительных канавок?
5. Перечислите три основных признака протяжек профильной схемы резания.
6. Почему при профильной схеме резания нельзя назначить большую подачу на зуб? В чём недостаток этой схемы резания?
7. Перечислите три основных признака протяжек, работающих по генераторной схеме резания.
8. В чём недостаток протяжек с генераторной схемой резания?
9. Перечислите три основных признака групповой схемы резания?
10. На каких зубьях рекомендуется назначать генераторную и групповую схемы резания?
11. Какими параметрами характеризуется зуб протяжки?
12. Как перетачивают протяжки для внутреннего и наружного протягивания после затупления?
13. Почему протяжки можно изготавливать из всех видов инструментальных материалов?

# Оглавление

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № ИЗУЧЕНИЕ ТОКАРНО-ВИНТОРЕЗНОГО СТАНКА ..... 4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОКАРНЫХ РЕЗЦОВ ..... 10
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. .НАСТРОЙКА ТОКАРНО-ВИНТОРЕЗНОГО СТАНКА для ТОЧЕНИя НАРУЖНЫХ КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ..... 22
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. НАСТРОЙКА ТОКАРНО-ВИНТОРЕЗНОГО СТАНКА НА НАРЕЗАНИЕ РЕЗЬБЫ ..... 30
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5. НАСТРОЙКА ТОКАРНО-ВИНТОРЕЗНОГО СТАНКА НА НАРЕЗАНИЕ РЕЗЬБЫ РЕЗЦОМ ..... 34
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6. ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОСЕВОГО ИНСТРУМЕНТА ..... 43
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7. ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФРЕЗ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ ..... 51
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8. ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКТА МЕТЧИКОВ ..... 55
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9. ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЗУБОРЕЗНОГО ДОЛБЯКА ..... 62
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10. ИЗУЧЕНИЕ СХЕМ РЕЗАНИЯ ПРИ ПРОТЯГИВАНИИ ..... 67
ЛИТЕРАТУРА ..... 74

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. Фещенко В. Н. Токарная обработка. М., Высшая школа, 2009
2. Денежный П. М. и др. Токарное дело. М., Высшая школа, 2010
3. Фельдштейн Е. Э., Корниевич М. А. Металлорежущие инструменты. М., Новое знание, 2009
4. Фельдштейн Е. Э., Корниевич М. А.. Режущий инструмент. М., Новое знание, 2007
5. Суворов А. А., Зайдлин Г. С., Стискин Г. М. Металлорежущие инструменты. М, Машиностроение, 1979
6. Дальский А. И.  и др. Технология металлорежущих материалов. М., Машиностроение, 2008 , 664 с.
7. Петруха П. Г. Резание конструкционных материалов, режущие инструменты и станки. М., Машиностроение, 2007 , 614 с.
8. Обработка металлов резание. А. П. Панов и др. Справочник технолога. М., Машиностроение, 2009 , 736 с.

Учебное издание

Татьяна Петровна Глинникова
Сергей Александрович Волегов

# Технология конструкционных материалов

Лабораторный практикум по теме
"*ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ* "
для студентов направления бакалавриата:
15.03.01 - «Машиностроение»,
15.03.02 - «Технологические машины и оборудование» (ТМО)
и среднего профессионального образования
15.02.01 - «Монтаж техническая эксплуатация промышленного оборудования (по отраслям)» очного
и заочного обучения

Редактор В. В. Баклаева

Подписано в печать. Бумага писчая. Формат 60 × 84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. 4,6. Уч.-изд. л. 2. Тираж 100. Заказ №

Издательство УГГУ
620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

Минобрнауки России
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

**УТВЕРЖДАЮ**
Проректор по учебно-методическому комплексу
_____С.А. Упоров

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

# Б1.В.04 КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА

Специальность
***15.03.01 Машиностроение***

Профиль специализации
***Производство и реновация машин и оборудования***

Форма обучения: очная, заочная

Автор: Шангина Е.И.

Одобрен на заседании кафедры

Инженерной графики
*(название кафедры)*

Зав. кафедрой _____
*(подпись)*

Шангина Е.И.
*(Фамилия И.О.)*

Протокол № 5 от17.04. 2019
*(Дата)*

Рассмотрен методической комиссией факультета

Горно-механический
*(название факультета)*

Председатель _____
*(подпись)*

Барановский В.П.
*(Фамилия И.О.)*

Протокол № 7 от 19.04. 2019
*(Дата)*

Екатеринбург
2019

Комплект оценочных средств дисциплины согласован с выпускающей кафедрой эксплуатации горного оборудования

Заведующий кафедрой _____ Симисинов Д.И.

*подпись*

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ ..... 3
ВИДЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТА ..... 4
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ КО ВСЕМ ВИДАМ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ ..... 4
Повторение материала лекций и самостоятельное изучение курса ..... 4
Подготовка к практическим занятиям и лабораторным работам ..... 5
Подготовка и написание контрольной работы ..... 6
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ..... 6
Подготовка к зачёту ..... 6

# ВВЕДЕНИЕ

*Самостоятельная работа студентов* - это разнообразные виды деятельности студентов, осуществляемые под руководством, но без непосредственного участия преподавателя в аудиторное и/или внеаудиторное время.

Это особая форма обучения по заданиям преподавателя, выполнение которых требует активной мыслительной, поисково-исследовательской и аналитической деятельности.

Методологическую основу самостоятельной работы студентов составляет деятельностный подход, когда цели обучения ориентированы на формирование умений решать типовые и нетиповые задачи, то есть на реальные ситуации, где студентам надо проявить знание конкретной дисциплины, использовать внутрипредметные и межпредметные связи.

Цель самостоятельной работы - закрепление знаний, полученных на аудиторных занятиях, формирование способности принимать на себя ответственность, решать проблему, находить конструктивные выходы из сложных ситуаций, развивать творческие способности, приобретение навыка организовывать своё время.

Кроме того самостоятельная работа направлена на обучение студента осмысленно и самостоятельно работать сначала с учебным материалом, затем с научной информацией, заложить основы самоорганизации и самовоспитания с тем, чтобы привить умение в дальнейшем непрерывно повышать свой профессиональный уровень.

Самостоятельная работа реализует следующие задачи:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- формирование практических (общеучебных и профессиональных) умений и навыков;
- развитие исследовательских умений;
- получение навыков эффективной самостоятельной профессиональной (практической и научно-теоретической) деятельности.

В учебном процессе выделяют два вида самостоятельной работы:

- аудиторная;
- внеаудиторная.

*Аудиторная самостоятельная работа* по дисциплине выполняется на учебных занятиях под непосредственным руководством преподавателя и по его заданию.

*Внеаудиторная самостоятельная работа* – планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия.

Самостоятельная работа, не предусмотренная образовательной программой, учебным планом и учебно-методическими материалами, раскрывающими и конкретизирующими их содержание, осуществляется студентами инициативно, с

целью реализации собственных учебных и научных интересов.

Для более эффективного выполнения самостоятельной работы по дисциплине преподаватель рекомендует студентам источники и учебно-методические пособия для работы, характеризует наиболее рациональную методику самостоятельной работы, демонстрирует ранее выполненные студентами работы и т. п.

## ВИДЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТА

Основные формы организации самостоятельной работы студентов определяются следующими параметрами:

- содержание учебной дисциплины;
- уровень образования и степень подготовленности студентов;
- необходимость упорядочения нагрузки студентов при самостоятельной работе.

В соответствии с реализацией рабочей программы дисциплины в рамках самостоятельной работы студенту необходимо выполнить следующие виды работ:

*для подготовки ко всем видам текущего контроля:*

- повторение материала лекций;
- самостоятельное изучение курса;
- подготовка к практическим занятиям;
- подготовка к контрольной работе, написание контрольной работы;

*для подготовки ко всем видам промежуточной аттестации:*

- подготовка к зачёту;

Особенностью организации самостоятельной работы студентов является необходимость не только подготовиться к сдаче зачета /экзамена, но и собрать, обобщить, систематизировать, проанализировать информацию по темам дисциплины.

Технология организации самостоятельной работы студентов включает использование информационных и материально-технических ресурсов образовательного учреждения.

Самостоятельная работа может осуществляться индивидуально или группами студентов как online, так и на занятиях в зависимости от цели, объема, конкретной тематики самостоятельной работы, уровня сложности, уровня умений студентов.

В качестве форм и методов контроля внеаудиторной самостоятельной работы студентов могут быть использованы обмен информационными файлами, тестирование, опрос, контрольные работы, защита контрольных работ, защита зачётных работ и др.

Текущий контроль результатов внеаудиторной самостоятельной работы студентов осуществляется в пределах времени, отведенного на обязательные учебные занятия по дисциплине.

Промежуточный контроль результатов внеаудиторной самостоятельной работы студентов осуществляется в пределах времени, отведенного для сдачи экзамена / зачёта.

В методических указаниях по каждому виду контроля представлены материалы для самостоятельной работы и рекомендации по организации отдельных её видов.

# МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ КО ВСЕМ ВИДАМ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

## Повторение материала лекций и самостоятельное изучение курса

Лекционный материал по дисциплине излагается в виде устных лекций преподавателя во время аудиторных занятий. Самостоятельная работа студента во время лекционных аудиторных занятий заключается в ведении записей (конспекта лекций).

Конспект лекций, выполняемый во время аудиторных занятий, дополняется студентом при самостоятельном внеаудиторном изучении некоторых тем курса. Самостоятельное изучение тем курса осуществляется на основе списка основной и дополнительной литературы к дисциплине.

Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины приведён в рабочей программе дисциплины.

Рекомендуемые задания для самостоятельной внеаудиторной работы студента, направленные на повторение материала лекций и самостоятельное изучение тем курса: *для овладения знаниями:*

- конспектирование текста;
- чтение основной и дополнительной литературы;
- составление плана текста;
- работа со словарями, справочниками и нормативными документами;
- просмотр обучающих видеозаписей

*для закрепления и систематизации знаний:*

- работа с конспектом лекций;
- повторная работа над учебным материалом;
- составление таблиц для систематизации учебного материала;
- изучение нормативных материалов;
- составление плана и тезисов ответа на вопросы для самопроверки;
- ответы на вопросы для самопроверки;
- составление библиографических списков по изучаемым темам;

*для формирования навыков и умений:*

- выполнение рисунков, схем, эскизов оборудования;
- рефлексивный анализ профессиональных умений.

Тематический план изучения дисциплины и содержание учебной дисциплины приведены в рабочей программе дисциплины.

Вопросы для самопроверки приведены учебной литературе по дисциплине или могут быть предложены преподавателем на лекционных аудиторных занятиях после изучения каждой темы.

## Подготовка к практическим занятиям

*Практические занятия* по дисциплине выступают средством формирования у студентов системы интегрированных умений и навыков, необходимых для освоения профессиональных компетенций, а также умений определять, разрабатывать и применять оптимальные методы решения профессиональных задач.

На практических занятиях происходит закрепление теоретических знаний, полученных в ходе лекций, осваиваются методики и алгоритмы решения типовых задач по образцу и вариантных задач, разбираются примеры применения теоретических знаний для практического использования.

Рекомендуемые задания для самостоятельной внеаудиторной работы студента, направленные на подготовку к практическим занятиям: *для овладения знаниями:*

- чтение основной и дополнительной литературы;
- работа со словарями, справочниками и нормативными документами;
- просмотр обучающих видеозаписей;

*для закрепления и систематизации знаний:*

- работа с конспектом лекций;
- ответы на вопросы для самопроверки;
- подготовка публичных выступлений;
- составление библиографических списков по изучаемым темам;

*для формирования навыков и умений:*

- решение задач по образцу и вариативных задач;
- выполнение рисунков, схем, эскизов оборудования;
- рефлексивный анализ профессиональных умений.

Тематический план изучения дисциплины и содержание учебной дисциплины приведены в рабочей программе дисциплины.

### Подготовка и написание контрольной работы

*Контрольная работа* - индивидуальная деятельность обучающегося по концентрированному выражению накопленного знания, обеспечивает возможность одновременной работы всем обучающимся за фиксированное время по однотипным заданиям, что позволяет преподавателю оценить всех обучающихся. Контрольная работа является средством проверки умений применять полученные знания для решения задач определенного типа по теме или разделу.

Рекомендуемые задания для самостоятельной внеаудиторной работы студента, направленные на подготовку к контрольной работе: *для овладения знаниями:*

- чтение основной и дополнительной литературы;
- работа со словарями, справочниками и нормативными документами.

*для закрепления и систематизации знаний:*

- работа с конспектом лекций;
- ответы на вопросы для самопроверки.

*для формирования навыков и умений:*

- решение задач по образцу и вариативных задач;
- выполнение рисунков, схем, эскизов оборудования;

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

### Подготовка к зачёту

Зачёт по дисциплине может быть проведён в виде теста или включать в себя защиту контрольной работы.

*Тест* - это система стандартизированных заданий, позволяющая автоматизировать процедуру измерения уровня знаний и умений обучающегося.

При самостоятельной подготовке к зачёту, проводимому в виде теста, студенту необходимо:

- проработать информационный материал (конспект лекций, учебное пособие, учебник) по дисциплине; проконсультироваться с преподавателем по

вопросу выбора дополнительной учебной литературы;

- выяснить условия проведения теста: количество вопросов в тесте,
- продолжительность выполнения теста, систему оценки результатов и т. д.;
- приступая к работе с тестом, нужно внимательно и до конца прочитать вопрос и предлагаемые варианты ответов, выбрать правильные (их может быть несколько), на отдельном листке ответов вписать цифру вопроса и буквы, соответствующие правильным ответам.

В процессе выполнения теста рекомендуется применять несколько подходов в решении заданий. Такая стратегия позволяет максимально гибко оперировать методами решения, находя каждый раз оптимальный вариант. Не нужно тратить слишком много времени на трудный вопрос, а сразу переходить к другим тестовым заданиям, к трудному вопросу можно обратиться в конце. Необходимо оставить время для проверки ответов, чтобы избежать механических ошибок.

Зачёт также может проходить в виде защиты контрольной работы (доклад с презентацией). Методические рекомендации по подготовке и выполнению доклада с презентацией приведены в п. «Подготовка и написание контрольной работы».



**Хазин М. Л., Волегов С. А.**

# ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Екатеринбург – 2019

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

«Уральский государственный горный университет»

**Хазин М. Л., Волегов С. А.**

# ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Учебное пособие по курсовой работе

Екатеринбург – 2019

УДК 622:681.5:12-192

Рецензенты: А. В. Бухмастов, канд. техн. наук,

**Хазин М. Л., Волегов С. А.**

Теория и технологические методы восстановления и повышения износостойкости деталей машин. Учебное пособие по курсовой работе/ М. Л. Хазин, С. А. Волегов. Екатеринбург: Изд-во, УГГУ, 2014. – 80 с.

В учебном пособии приведена последовательность выполнения практических и самостоятельных работ по дисциплине «Теория и технологические методы восстановления и повышения износостойкости деталей машин», изложена методика разработки технологического процесса восстановления деталей оборудования, анализа дефектов и технического состояния деталей, составления технологических карт, приведен порядок выбора способа восстановления при ремонте деталей оборудования.

Для студентов, направления бакалавриата техник-механик направления 150700 «Машиностроение», подготовка которых требует знаний по ремонту промышленного оборудования.

Объём 5 печ. л. Рис. 1. Табл. 27. Библ. 14 наим.

© Уральский государственный
горный университет, 2015
© Хазин М. Л., Волегов С. А., 2019

# ОГЛАВЛЕНИЕ

1.ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ..... 8
1.1. Цель и задачи курсовой работы ..... 8
1.2. Объем и содержание курсовой работы ..... 9
1.3. Расчётно-пояснительная записка ..... 9
1.4. Графическая часть ..... 9
1.5. Оформление курсовой работы ..... 10
2. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ..... 12
2.1. Порядок выполнения работы ..... 12
2.2. Анализ технического состояния детали ..... 13
2.3. Анализ дефектов и оценка пригодности детали ..... 14
2.4. Выбор способа восстановления деталей ..... 23
2.5. Разработка маршрута восстановления детали ..... 29
2.6. Расчет припусков при восстановлении детали ..... 31
3.ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ ..... 32
3.1. Требования к материалам ..... 32
3.2. Металлическая проволока и лента ..... 32
3.3. Штучные электроды и прутки ..... 33
3.4. Порошки ..... 34
3.5. Порошковая проволока и ленты ..... 34
3.6. Синтетические материалы ..... 35
3.7. Выбор и определение нормы расхода материала ..... 36
4.ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ И ОСНАСТКИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ ..... 37
5.РАСЧЁТ РЕЖИМОВ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ 40
5.1. Наплавка ..... 40
5.2.Наварка ленты и проволоки ..... 43
5.3.Нанесение электролитических покрытий ..... 44
5.4.Механическая обработка ..... 46
6. ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ..... 52
6.1. Особенности механической обработки восстановленных деталей .. 52
6.2. Базирование деталей ..... 52
6.3. Обработка наплавленных поверхностей ..... 54
6.4. Обработка деталей с газотермическими покрытиями ..... 55
6.6. Обработка деталей с электрохимическими покрытиями ..... 56
7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМ ВРЕМЕНИ ..... 57
7.1. Наплавка ..... 57
7.2. Электрохимические покрытия ..... 59
7.3. Механическая обработка ..... 60
8. ОФОРМЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ ..... 60
8.1. Оформление технологической документации ..... 60
Приложение 1. ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ ..... 62

Приложение 2. ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ПЕРВОГО ЛИСТА ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ ..... 63
Приложение 3. ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ ПОСЛЕДУЮЩИЙ ЛИСТОВ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ ..... 64
Приложение 4. ХАРАКТЕРИСТИКИ СПОСОБОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ..... 65
Приложение 5. СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ..... 73
Приложение 6. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ..... 75
Приложение 7. РЕЖИМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ..... 77
Приложение 8. ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ МАРШРУТНОЙ КАРТЫ РЕМОНТА..... 78

# 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

## 1.1. Цель и задачи курсовой работы

*Цель* курсовой работы – научить студентов проектировать эффективные и экономичные технологические процессы восстановления деталей машин на основе современных достижений отечественного и зарубежного машиностроения и ремонтного производства.

В процессе работы решаются следующие *задачи*:

– расширение, систематизация и закрепление теоретических знаний и их применение для проектирования технологических процессов ремонта;

– развитие способностей студентов к анализу технико-экономических решений и умения логично и четко формулировать свои мысли и предложения.

– подготовка студента к квалификационной работе и практической работе.

В процессе работы студент формирует и демонстрирует следующие компетенции:

– уметь проверять техническое состояние и остаточный ресурс технологического оборудования, организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт оборудования (ПК-4);

– уметь составлять заявки на оборудование и запасные части, подготавливать техническую документацию на ремонт оборудования (ПК-16);

– способность устанавливать причины выхода из строя машин и оборудования, определять виды изнашивания деталей машин и выбирать оптимальный технологический процесс их восстановления (ПСК-5.1);

– способность рассчитывать параметры режимов технологического процесса восстановления рабочего слоя изношенной поверхности и составлять маршрутные карты для реализации этого процесса (ПСК-5.2);

– уметь выбирать оборудование и проектировать необходимую для реализации технологического процесса повышения износостойкости и восстановления деталей машин оснастку, осуществлять наладку оборудования и его техническое обслуживание (ПСК-5.3);

– уметь выбирать материалы с необходимым комплексом физико-механических и трибологических характеристик для восстановления изношенной поверхности детали (ПСК-5.4);

– уметь разрабатывать технологический процесс механической обработки упрочненных и восстановленных поверхностей деталей машин, рассчитывать параметры режимов обработки, выбирать оборудование и оснастку для обеспечения необходимых макро- и микрогеометрических характеристик поверхностей деталей (ПСК-5.5);

– способность разрабатывать ремонтную документацию на повышение износостойкости и восстановление деталей машин и оборудования (ПСК-9).

Курсовая работа является завершающим этапом изучения дисциплины «Теория и технологические методы восстановления и повышения износостой-

кости деталей машин» и служит для закрепления теоретических знаний, полученных при изучении ранее читаемых дисциплин.

### 1.2. Объем и содержание курсовой работы

Курсовая работа выполняется согласно заданию, выданному преподавателем, и состоит из расчетно-пояснительной записки (РПЗ) и графической части (чертежей, графиков).

В курсовой работе студент разрабатывает технологический процесс ремонта детали.

Объём курсового проекта определяют документы, поясняющие и раскрывающие его содержание:

- Задание на проектирование (приложение 1).
- Расчётно-пояснительная записка, представляющая собой все необходимые технические и технико-экономические расчёты, дающие обоснование принятым в проекте решениям.
- Технологическая документация (маршрутная, операционные и эскизные карты).
- Иллюстрации технологического процесса восстановления детали.

### 1.3. Расчётно-пояснительная записка

Расчетно-пояснительная записка является основным документом курсовой работы, в которой приводится исчерпывающая информация о выполненных расчетных и технологических разработках.

Расчётно-пояснительная записка должна быть написана в следующей последовательности:

- титульный лист;
- задание и рабочий чертеж детали;
- оглавление;
- введение;
- расчетно-технологическая часть;
- заключение;
- список литературы;
- приложение (технологические карты).

Основные положения расчетно-пояснительной записки иллюстрируются таблицами, схемами, рисунками, графиками. Они должны иметь сквозную нумерацию и соответствующие подрисуночные надписи.

### 1.4. Графическая часть

Графическая часть курсовой работы представляет собой рабочий чертеж детали, ремонтный чертеж детали и иллюстрация технологического процесса

восстановления поверхности детали (формат А1). Обрабатываемые поверхности обозначаются сплошной основной линией толщиной от 2*s* до 3*s* или цветом.

Ремонтный чертеж детали выполняется в соответствии с требованиями ГОСТ 2.604-2000 ЕСКД. Чертежи ремонтные.

На ремонтных чертежах изображают только те виды, разрезы и сечения, которые необходимы для проведения ремонта детали или сборочной единицы. Указывают только те размеры, предельные отклонения, зазоры и другие данные, которые должны быть выполнены в процессе ремонта и сборки изделия.

### 1.5. Оформление курсовой работы

Пояснительная записка пишется от руки черными, синими или фиолетовыми чернилами или печатается на принтерных устройствах ЭВМ на листах формата А4 ГОСТ 2.105-95 шрифтом Times New Roman кеглем 14.

Первым листом пояснительной записки, после титульного, является лист, определяющий ее содержание, с основной надписью, выполненной по форме 2 ГОСТ 2.104-68. Все последующие листы выполняются с основной надписью 2а того же ГОСТ. В графу 2 основной надписи записывается код (обозначение). Код документа включает в себя наименование работы, обозначение учебной группы, номер группы, номер задания и наименование документа. Например, КР МШС 012 025 ПЗ, где КР – курсовая работа; МШС – обозначение учебной группы; 12 – номер группы; 25 – номер задания; ПЗ – пояснительная записка.

Слово «Оглавление» записывается в виде заголовка (симметрично тексту) с прописной буквы. Наименования, включенные в содержание, записывают строчными буквами, начиная с прописной буквы.

Расстояние от рамки до границ текста в начале и в конце строки – не менее 3 мм.

Расстояние от верхней или нижней строки текста до верхней или нижней рамки должно быть не менее 10 мм.

Расчетно-пояснительная записка должна иметь ясную и четкую рубрикацию разделов. Текст записки разделяют на разделы и подразделы. Разделы должны иметь порядковые номера в пределах всей записки, обозначенные арабскими цифрами без точки и записанные с абзацного отступа. Подразделы должны иметь нумерацию в пределах каждого раздела. Номер подраздела состоит из номеров раздела и подраздела, разделенных точкой. Разделы и подразделы должны иметь заголовки. Заголовки следует писать с прописной буквы без точки в конце, не подчеркивая. Переносы слов в заголовках не допускаются. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой.

Расстояние между заголовками раздела, подраздела и текстом должно быть 1,5 – 2 интервала.

Формулы пишутся на отдельной строке симметрично основному тексту. Расчеты, выполненные по приведенной формуле, записываются на следующей строке. Промежуточные результаты не записываются. Расчётные формулы должны иметь чёткую связь с расчётными схемами и сквозную нумерацию

(в круглых скобках с правой стороны листа). Буквенные обозначения формул должны иметь расшифровку, а цифровые константы – соответствующую ссылку на литературу (в квадратных скобках в тексте).

*Пример 1*

Минутная подача $S_m$, мм/мин, рассчитывается по формуле

$$S_м = S_o \cdot n,$$

где $S_o$ – подача на оборот детали, мм/об; $n$ – частота вращения детали, мин$^{-1}$.

Иллюстрации должны быть выполнены в соответствии с требованиями стандартов ЕСКД. Иллюстрации следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией. Допускается нумеровать иллюстрации в пределах раздела. В этом случае номер иллюстрации состоит из номеров раздела и порядкового номера иллюстрации, разделенных точкой.

Иллюстрации, при необходимости, могут иметь наименование и пояснительные данные (подрисуночный текст). Номер рисунка и наименование записывают следующим образом: «Рис. 2.1. Эскиз заготовки», – и помещают после пояснительных данных.

Цифровой материал, как правило, оформляют в виде таблицы в соответствии с рис. 1.1.

Таблицы следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией. Допускается нумеровать таблицы в пределах раздела.

Таблицу, в зависимости от ее размера, помещают под текстом, в котором впервые дана ссылка на нее, или на следующей странице.

Допускается помещать таблицу вдоль длинной стороны документа на отдельной странице.

Таблица 1.1

**Химический состав качественных углеродистых конструкционных сталей в процентах**

| Марка стали | Элементы, % | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | C | Si | Mn | P | S |
| 20 | 0,20 | 0,17-0,37 | 0,35-0,65 | < 0,04 | < 0,04 |
| 25 | 0,25 | | | < 0,04 | < 0,04 |
| 30 | 0,30 | | | < 0,04 | < 0,04 |
| 35 | 0,35 | | | < 0,04 | < 0,04 |

Рис. 1.1. Пример оформления таблицы

Если строки или графы таблицы выходят за формат страницы, ее делят на части, помещая одну часть под другой или рядом, при этом в каждой части таблицы повторяют ее головку и боковик. При делении таблицы на части допускается ее головку или боковик заменять соответственно номером граф и строк. При этом нумеруют арабскими цифрами графы и (или) строки первой части таблицы.

Если в конце страницы таблица прерывается и ее продолжение будет на следующей странице, в первой части таблицы нижнюю горизонтальную линию, ограничивающую таблицу, не проводят.

Графу «Номер по порядку» в таблицу включать не допускается.

Слово «Таблица» указывают один раз – справа над первой частью таблицы, над другими частями пишут «Продолжение таблицы» с указанием ее номера.

Если все показатели в графах таблицы выражены в одной и той же единице физической величины, то ее обозначение необходимо помещать над таблицей справа, а при делении таблицы на части – над каждой ее частью.

На все использованные источники в тексте расчетно-пояснительной записки должны быть ссылки. В список литературы включают все использованные источники, которые следует располагать в порядке появления ссылок в тексте расчетно-пояснительной записки. Номер ссылки указывается в тексте в квадратных скобках (например, припуск берется по справочнику [4]).

Оформление ссылок проводится в соответствие с требованиями ГОСТ Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка».

Оформление технологической документации на восстановление детали – маршрутной и операционных карт, карт эскизов – проводится согласно ГОСТ 3.1103-82, ГОСТ 3.1104-81, ГОСТ 3.1105-84, ГОСТ 2.109-73.

Каждая операционная карта сопровождается картой эскизов (по ГОСТ 3.1104-81, 3.1105-84 на форматах А4 по ГОСТ 2.301-68 прил. 1), на которой указывается базирование и крепление детали, способ нанесения материала при восстановлении, режущий инструмент, форма, шероховатость и размеры (с допусками) поверхностей после обработки на данной операции.

# 2. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

## 2.1. Порядок выполнения работы

При разработке технологического процесса восстановления детали осуществляется:

- изучение реальных сочетаний дефектов на деталях;
- обоснование и выбор способа восстановления;
- разработка маршрутного и операционного технологических процессов;
- выбор рациональной последовательности выполнения операций;
- выбор оборудования, приспособлений, материалов, инструмента;
- определение оптимальных режимов восстановления и обработки;
- нормирование затрат труда и материалов при соблюдении всех технических требований и обеспечения требуемого уровня качества, минимальных материальных и трудовых затрат.

При этом обеспечивается строгое соблюдение всех технических требований, заданный уровень качества продукции при минимальных материальных трудовых затратах.

При разработке технологического процесса восстановления детали *рекомендуется следующий порядок работы*:

- анализ технического состояния детали;
- анализ дефектов и оценка пригодности детали;
- выбор рациональных способов устранения дефектов и обеспечения необходимого ресурса детали (сравниваются не менее трех вариантов технологического процесса восстановления детали по соответствующим критериям);
- разработка технологического маршрута восстановления детали:
- расчет припусков;
- выбор оборудования, приспособлений, инструмента;
- расчет режимов обработки в соответствии с требованиями точности и шероховатости (для заданной поверхности);
- нормирование операций;
- назначение контрольных операций по технологическому процессу;
- оформление технологической документации на процесс восстановления детали.

*Исходной базовой информацией служат*:

- программа выпуска ремонтируемой сборочной единицы или узла;
- сборочный чертеж ремонтируемого узла;
- рабочий чертеж детали;
- информация о технологических процессах восстановления деталей;
- перечень дефектов;
- указания о применимости различных способов устранения дефектов;
- условия эксплуатации и режимов работы детали (узла).

## 2.2. Анализ технического состояния детали

Анализ технического состояния изношенной детали начинают с установления причин потери работоспособности при эксплуатации машины. Для этого изучается конструкция сборочной единицы, в которую входят детали, а также условия ее работы. После этого дается характеристика детали.

Характеристика детали включает:

- наименование детали;
- назначение детали, ее конструктивные особенности и местонахождение в узле;
- наименование и марку материала детали;
- вид термической обработки заданных для восстановления поверхностей, глубину обработки и твердость материала детали;
- технологические и механические свойства материала детали: возможность обработки резанием, давлением, сваркой, термической обработкой и пр.;
- габаритные размеры детали: длину, диаметр (ширину и высоту); массу детали;

- указываются основные и вспомогательные конструкторские базы, исполнительные поверхности;
- анализ допусков на размеры, формы и взаимного расположения поверхностей детали.

*Пример 2*

Деталь – вал ступенчатый, предназначенный для передачи крутящего момента от ступицы зубчатого колеса на внешнюю нагрузку, выполненный из материала сталь 45 ГОСТ 1051-98. Термообработка – нормализация, глубина обработки – 3 мм, твердость - 600 НВ.

Материал детали (сталь 45) может обрабатываться резанием, давлением, сваркой, термической обработкой и пр. Свойства материала детали, с учетом термообработки [4], приведены в табл. 2.1

Таблица 2. 1

**Механические свойства стали 45 после нормализации**

| | |
|---|---|
| Временное сопротивление растяжению, $\sigma_в$, МПа | 610 |
| Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа | 360 |
| Предел выносливости при растяжении, $\sigma_{-1р}$, МПа | 220 |
| Предел выносливости при изгибе, $\sigma_{-1и}$, МПа | 275 |
| Относительное удлинение, $\delta$, % | 16 |
| Относительное сужение, $\psi$, % | 40 |
| Ударная вязкость, *KCU*, кДж/м$^2$ | 450 |

Габаритные размеры детали: длина – 800 мм, диаметр – 40 мм. Масса детали – 7,83 кг.

Деталь работает в условиях динамической нагрузки.

## 2.3. Анализ дефектов и оценка пригодности детали

При анализе состояния детали, прежде всего, возникают вопросы: к какой группе должна быть отнесена деталь, и какие критерии использовать для этого?

К *первой* группе (годные для повторного использования) относят детали с износом в пределах допуска на изготовление или имеющих отклонения в пределах, допустимых техническими требованиями на дефектацию и ремонт, а также с незначительными повреждениями (мелкие царапины или вмятины).

Ко *второй* группе (подлежащие восстановлению) относят детали с износом, превышающим допустимые значения, или с повреждениями, устранение которых (с учетом служебного назначения детали) по техническим и экономическим соображениям целесообразно (табл. 2.2).

Таблица 2.2

**Дефекты второй группы и способы их устранения**

| Дефекты деталей и узлов | Способы устранения дефектов |
|---|---|
| Размеры деталей соответствуют чертежам или техническим требованиям на дефектацию и ремонт, но требуется доводка | Довести поверхности деталей до требуемой чистоты путем зачистки шкуркой, шлифования, полирования |
| Износ поверхностей деталей больше допустимого техническими требованиями на дефектацию и ремонт | Восстановить поверхности до требуемых размеров согласно чертежам основного производства или ремонтным чертежам способами: ремонтных размеров, электродуговая наплавка под слоем флюса и в среде защитных газов, вибродуговая наплавка, осталивание, хромирование, плазменное напыление, электроэрозионное наращивание, электромеханическое восстановление, заливка или наплавка цветным металлом, и др. с последующей механической обработкой |
| Детали, имеющие небольшие изгибы, вмятины, | Восстановить поверхности механической обработкой |
| Трещины | Засверлить конец трещины, произвести ее разделку и заварку или заделку эпоксидной смолой |
| Деталь и ее элементы изогнуты | Удалить изгиб рихтовкой или правкой |
| Резьба на валу имеет забоины, вмятины, срыв одного витка | Удалить забоины, вмятины, прорезать плашкой или резцом |
| Износ и повреждение резьбы сверх допустимых норм | Удалить поврежденную резьбу, наплавить, произвести механическую обработку |
| Изношены или деформированы резьбовые отверстия | Переход на ремонтный размер; изготовить на новом месте; заварить и изготовить резьбу на том же месте и др. |
| Износ шпоночных пазов по ширине на валу и во втулке | При износе до 5 % исправить форму паза и изготовить усиленную шпонку с соблюдением характера посадки; с износом свыше 5 % восстановить сваркой или путем фрезерования паза на новом месте |
| Наличие на зубьях шестерен ступеней в результате износа, коррозии и забоин на зубьях | Исправление профиля зубьев фрезерованием или зубошлифованием |
| Износ зубьев сверх допустимых норм, а также: сколы на зубьях неответственных зубчатых колес | Наплавка или осталивание после предварительного исправления формы зубошлифованием, дополнительным корригированием |

К *третьей* группе (неподлежащие восстановлению – брак) относят детали с повреждениями, устранение которых (с учетом служебного назначения детали) технически невозможно или экономически нецелесообразно. К третьей группе относятся, прежде всего, детали с изломом и неисправимыми деформациями (например, кручения), табл. 2.3.

Таблица 2.3

**Признаки дефектов третьей группы (брак) для типовых деталей**

| Деталь | Признаки дефектов третьей группы (брак окончательный) |
|---|---|
| Валы и оси | Крупные трещины, излом, остаточные деформации |
| Зубчатые колеса | Сколы торцов и вершин на ряде зубьев, выкрашивание цементационного слоя, износ и поднутрение зубьев, в результате которых изношено свыше 80 % толщины цементационного слоя, износ зубьев свыше предельного |
| Подшипники качения | Трещины, выкрашивание колец и тел качения, цвета побежалости, коррозия, шелушение, раковины, выбоины на беговых дорожках и сепараторах, оспы и отслоения, неравномерный износ беговых дорожек, радиальные и осевые зазоры сверх допустимых значений |
| Шлицевые валы | Сколы и изломы шлицев |
| Шпоночные пазы на валу и во втулке | Сколы цементированных и закаленных пазов, износ свыше предельного |

Сведения, касающиеся дефектов детали, студент получает в задании на курсовую работу. Эти данные следует занести в таблицу (пример оформления приведен в табл. 2.4).

*Пример 3*

Основными поверхностями вала, подвергшимися износу, являются шейки под шариковый и роликовый подшипники. После ремонта размеры шеек должны отвечать требованиям рабочего чертежа:

– диаметр шейки под шариковый подшипник должен быть равен $90(^{+0,11}_{-0,11})$.

Размер соответствует 6-му квалитету точности с отклонением *js*, т. е. диаметр $90\,js6(^{+0,11}_{-0,11})$. Шероховатость поверхности шейки *R*a 0,2 мкм соответствует 9-му классу шероховатости.

Диаметр шейки под роликовый подшипник должен быть $100_{-0,022}$. Размер соответствует 6-му квалитету с отклонением *h*, т. е. $100h6(_{-0,022}^{0})$. Шероховатость поверхности шейки *R*a 0,8 мкм (7-й класс шероховатости);

– отклонение от цилиндричности шеек под подшипник должно быть не более 0,01 мм, радиальное биение их относительно оси не более 0,03 мм.

Необходимо выявить, какие дефекты детали являются устранимыми при ремонте. Детали, имеющие неустранимые дефекты, восстановлению не подлежат.

Первоначально следует определить абсолютный износ ($\Delta_1$**)** поврежденных поверхностей:

$$\Delta_1 = D_{ср} - P_ф \,, \qquad (2.1)$$

где $D_{ср}$ – средний номинальный размер; $P_ф$ – фактический размер данной поверхности, полученный в задании.

Полученные данные также следует занести в табл. 2.4.

Таблица 2.3

**Признаки дефектов третьей группы (брак) для типовых деталей**

| Деталь | Признаки дефектов третьей группы (брак окончательный) |
|---|---|
| Валы и оси | Крупные трещины, излом, остаточные деформации |
| Зубчатые колеса | Сколы торцов и вершин на ряде зубьев, выкрашивание цементационного слоя, износ и поднутрение зубьев, в результате которых изношено свыше 80 % толщины цементационного слоя, износ зубьев свыше предельного |
| Подшипники качения | Трещины, выкрашивание колец и тел качения, цвета побежалости, коррозия, шелушение, раковины, выбоины на беговых дорожках и сепараторах, оспы и отслоения, неравномерный износ беговых дорожек, радиальные и осевые зазоры сверх допустимых значений. |
| Шлицевые валы | Сколы и изломы шлицев |
| Шпоночные пазы на валу и во втулке | Сколы цементированных и закаленных пазов, износ свыше предельного. |

При анализе следует сопоставить фактические размеры ($P_ф$), полученные при измерении детали (приведены в задании) с предельными ($P_{пр}$), с тем, чтобы по анализируемому размеру отнести деталь к 1 или 2 группе, если деталь не имеет признаков окончательного брака, с которыми деталь относят к 3 группе – (табл. 2.5).

Рекомендуемые нормы допустимых и предельных допусков на гладкие цилиндрические соединения приведены в таблице 2.5. Полученные данные также следует занести в таблицу анализа дефектов (см. табл. 2.4)**.**

Таблица 2.4

**Сведения о дефектах детали**

| Наименование дефекта | Номинальный размер, мм | Фактический размер, мм | Предельный размер, мм | Абсолютный износ на сторону, $\Delta_1$, мм | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|
| Прогиб вала | – | 0,11 | | | |
| Износ шейки вала | 90$js$6 | 119,4 | | | |
| Износ шейки вала | 100$h$6 | 149,6 | | | |

Таблица 2.5

**Рекомендуемые нормы предельных и допустимых допусков на гладкие цилиндрические соединения в системе отверстия**

| Элементы | Характер посадки | Номинальные | Предельные |
|---|---|---|---|
| Отверстие | с зазором | *H*6 | *H*11 |
| | | *H*7 | *H*11 |
| | | *H*8 | *H*12 |
| | | *H*9 | *H*12 |
| | | *H*11 | 3*H*12 |
| | | *H*12 | 5*H*12 |
| | переходные | *Js*7 | 1,5*F*7 |
| | | *Js*9 | *D*10 |
| Вал | с зазором | *h*6 | *h*11 |
| | | *h*8 | *h*12 |
| | | *h*9 | 3*h*12 |
| | | *h*12 | 5*h*12 |
| | | *f*7 | *b*12 |
| | | *e*7 | 1,25 *b*12 |
| | | *e*8 | 1,5 *b*11 |
| | | *b*12 | 5,25 *b*12 |
| | | *d*8 | 1,5 *d*11 |
| | | *d*9 | 5 *d*9 |
| | переходные | *n*6 | *h*6 |
| | | *m*6 | *h*6 |
| | | *k*6 | *g*6 |
| | | *k*7 | *f*8 |
| | | *js*6 | *f*7 |
| | с натягом | *u*7 | *k*6 |
| | | *z*6 | *k*6 |
| | | *s*6 | *k*7 |
| | | *u*8 | *k*7 |
| | | *s*8 | *k*7 |
| | | *x*8 | *k*7 |

Например, для вала:

- $P_ф > P_{пр}$ годные для повторного использования (1-я группа);
- $P_ф < P_{пр}$ подлежат ремонту (2-я группа).

Для отверстия:

- $P_ф < P_{пр}$ годные для повторного использования (1-я группа);
- $P_ф > P_{пр}$ подлежат ремонту (2-я группа).

### 2.3.1. Валы и оси

Предельный износ шеек валов и осей, установленных на подшипниках скольжения, приводится в табл. 2.6, а шеек, сопряженных с подшипниками качения, не превышает 0,1 мм.

Таблица 2.6

**Предельный износ элементов вала**

| Назначение вала | Номинальный диаметр шеек, мм | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 20 – 50 | 50 – 80 | 80 – 120 | 120 – 180 | 180 – 200 |
| Валы и оси для:<br>зубчатых колес<br>ходовых колес и опорных роликов | <br>0,3<br>0,5 | <br>0,4<br>0,7 | <br>0,6<br>1,0 | <br>0,8<br>1,2 | <br>1<br>1,4 |
| Оси для канатных блоков | 0,5 | 0,7 | 1,0 | 1,2 | 1,4 |

В сопряжениях типа вал-втулка предельный износ при посадках с зазором наступает после увеличения номинального зазора в 2 раза для ответственных соединений и в 3 – 4 раза для неответственных. При посадках с натягом предельный износ наступает в случае уменьшения натяга ниже максимально допускаемого.

### 2.3.2. Предельный прогиб вала

Предельные допустимые значения прогиба вала составляют 0,15 мм на 1 м длины, но не более 0,3 мм на всю длину вала при частоте вращения меньше 8,3 $с^{-1}$ и 0,1 мм на 1 м длины и 0,2 мм на всю длину вала при частоте вращения больше 8,3 $с^{-1}$.

Прогиб валов и осей менее 0,5 мм устраняют шлифованием, до 0,01 длины вала – правкой в холодном состоянии, при прогибе 0,02 – 0,03 длины вала и более – правкой в нагретом состоянии при температуре 600 – 650 °С.

### 2.3.3. Зубчатые колеса

Величины допустимых износов зубьев зависят от конструкции, условий работы зубчатых колес. В общем случае для зубчатых колес горных машин допустимый износ зубьев принимают в пределах 8 – 15 % их толщины, причем меньшее значение износа для зубьев быстроходных и сильнонагруженных зубчатых передач, большее для тихоходных и малонагруженных.

В процессе износа зубчатых колёс изменяется толщина зуба и искажается его форма, что приводит к увеличению нагрузки на зубья при одновременном снижении их сопротивлению изгиба.

В связи с этим предельный износ зубьев стальных зубчатых колёс, работающих при окружных скоростях 3 м/с, принимают равным 3 – 10 % толщины зуба, измеряемой по начальной окружности (табл. 2.7).

Предельный износ тихоходных зубчатых колес наступает при достижении им 30 % по начальной окружности, быстроходных – 3 – 10 %. Для чугунных зубчатых колес эти цифры снижаются на 40 %. Если в зубьях есть упрочненный слой, то предельный износ наступает после его срабатывания до толщины слоя 0,2 – 0,25 мм.

В зубчатых колесах с цементированными зубьями выбраковочным признаком является растрескивание и выкрашивание цементированного слоя. Появление признаков выкрашивания последнего практически соответствует моменту его полного износа. Обычно при толщине цементированного слоя зубьев 1 мм наибольший износ не должен превышать 0,8 толщины этого слоя и 10 % толщины зуба. В таблице 2.7 приведены значения предельного износа зубьев зубчатых колес горного и строительного оборудования.

Таблица 2.7

**Предельный износ зубьев зубчатых колес**

| Характер передачи мощности | Окружная скорость, м/с | Предельный износ, процент номинальной толщины зуба для ремонта | |
|---|---|---|---|
| | | текущего | капитального |
| Длительный в одном направлении | 2 | 12 – 15 | 25 – 30 |
| | 4 | 10 – 12 | 20 – 25 |
| | 5 | 8 – 10 | 15 – 20 |
| С частым реверсированием | 2 | 10 – 12 | 20 – 25 |
| | 4 | 9 – 11 | 15 – 20 |
| | 5 | 6 – 8 | 12 – 15 |

Примечание: Для чугунных зубчатых колес данные уменьшаются на 30 %,

Износ зубьев цементированных шестерен определяется в зависимости от толщины слоя цементации. Предельная величина износа в этих передачах берется такой, при которой толщина слоя цементации на зубьях остается не менее 0,2 – 0,25 мм. При этом возможны варианты:

а) зубья цементированы или закалены с нагревом ТВЧ. Предельный износ определяется в зависимости от глубины цементационного или закаленного поверхностного слоя:

$$\delta_{пр.} = 0{,}8 \cdot \delta_{ц}, \text{ мм},$$

где $\delta_{пр}$ предельная глубина износа упрочненного поверхностного слоя зуба; $\delta_{ц}$ глубина упрочненного слоя, мм.

б) зубья сырые или улучшенные (закалка с высоким отпуском). Предельный износ в этом случае принимается в зависимости от запаса прочности по изгибу:

$$\delta_{пр} = (0{,}1 – 0{,}24)m; \text{ или } \delta_{пр} = 0{,}25 \cdot S_{с},$$

где $\delta_{пр}$ предельный износ зуба с одной стороны, мм;

$S_{с}$ номинальная толщина зуба по постоянной хорде, мм;

$m$ модуль зуба, мм.

Предельные износы зубьев червячных передач составляют 8 – 10 % для червяков и 10 – 12 % для червячного колеса.

### 2.3.4. Цементированные шлицы

Среднее уменьшение толщины каждого шлица на рабочей длине соединения для вала или втулки допускается не более 0,2 мм при диаметре вала до

50 мм и не более 0,3 мм при диаметре вала более 50 мм. При этом неравномерность износа допустима в пределах до 0,1 мм на 100 мм длины шлица. В шлицевых соединениях допускается увеличение бокового зазора, но не более 2 - 2,5 % значения, указанного в чертежах.

Предельный износ по толщине цементированных шлицев соответствует:

$$\delta_{пр} = (0{,}2 - 0{,}4) \cdot \delta_{ц}, \text{ мм},$$

где $\delta_ц$ глубина цементационного слоя, мм.

Предельный износ улучшенных шлицев эвольвентного профиля составляет:

$\delta_{пр} = (0{,}06 - 0{,}1) \cdot m$ , а прямобочных – $\delta_{пр} = (0{,}03 - 0{,}05) \cdot b$; мм,

где $b$ толщина шлицев, мм.

Износ центрирующих диаметров шлицев в отверстии $H8$ или $H9$ допускается до верхнего отклонения $H10$. Износ центрирующих диаметров шлицов на валах $h6$ допускается до нижнего отклонения $h9$; $h7$ до нижнего отклонения $h10$ и $f7$ до нижнего отклонения $f10$.

### 2.3.5. Шпоночные пазы

Боковой зазор в шпоночном соединении не допускается. При креплении с помощью шпонки детали не должны покачиваться на валу.

Для шпоночных пазов допустим износ (разбивка) по ширине в пределах 5 % номинального размера паза. В этом случае механической обработкой исправляют форму паза и используют усиленную шпонку. За пределами большего износа переход на усиленную шпонку недопустим.

Зазоры между верхней гранью шпонки и ступицей шпоночных соединений при диаметре вала 20 - 40 мм составляют 0,1 ÷ 0,3 мм; при 41- 80 мм – 0,1 ÷ 0,4 мм; свыше 80 мм – 0,1 ÷ 0,5 мм.

Шпоночные пазы, имеющие незначительный износ, обрабатывают под ремонтный размер, который не должен превышать номинальный более чем на 15 %. Соответственно изменяется и размер шпонки.

Ниже для иллюстрации материала приводятся примеры.

*Пример 4*

Диаметр шейки вала равен $100n6(^{+0{,}045}_{-0{,}023})$. Средний номинальный размер $D_{ср}$ составляет (100,045 + 100,023)/2 = 100,034. Из данных табл. 2.5 следует, что за предельную величину износа вала при посадке $n6$ следует принять размер, соответствующий $h6$, т. е. диаметр $100n6(^{0}_{-0{,}022)})$ мм. Тогда средний предельный размер равен (100,000 + 99,978)/2 = 99,989 мм.

Значение фактического диаметра $P_ф$ (согласно заданию) равно 99,030 мм. Сопоставляя фактический размер 99,030 со средним предельным – 99,989, видно, что фактический размер вышел за рамки предельного размера. Следовательно, вал соответствует второй группе и подлежит восстановлению.

Полученные данные заносим в табл. 2.8.

При этом абсолютный линейный износ вала на сторону составляет

$$\Delta_1 = [D_{ср} - P_ф]/2 = [(100{,}045 + 100{,}023)/2 - 99{,}030]/2 = 0{,}5 \text{ мм}.$$

*Пример 5*

По результатам измерений зубьев толщиной $S_c = 16{,}64^{-0{,}41}_{-0{,}77}$ фактическая ширина зубьев ($S_ф$) составляет 14,30 мм. Предельный износ зуба равен

$$И_{пр} = 2\delta_{пр} = 0{,}25 \cdot S_c = 0{,}25\ (16{,}23+15{,}87)/2 = 4{,}0125 \text{ мм}.$$

Тогда предельная ширина зуба составит:

$$S_{пр} = S_c - И_{пр} = (16{,}23+15{,}87)/2 - 4{,}0125 = 16{,}05 - 4{,}0125 = 12{,}037 \text{ мм}.$$

При этом абсолютное уменьшение толщины зуба составит

$$\Delta = S_c - S_ф = 16{,}05 - 14{,}30 = 1{,}75 \text{ мм}.$$

Вывод: поскольку $S_ф > S_{пр}$, размер зубьев находится в пределах допустимых значений, деталь относится к 1-ой группе, т. е. годна без восстановления.

Таблица 2.8

**Анализ дефектов детали**

| Наименование дефекта | Номинальный размер, мм | Фактический размер, мм | Предельный размер, мм | Абсолютный износ на сторону, $\Delta_1$, мм | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|
| Износ шейки вала | $100n6\left(^{+0{,}045}_{+0{,}023}\right)$ | 99,030 | $100h6\left(^{0}_{-0{,}022}\right)$ | 1,004 | $P_ф < P_{пр}$ подлежит ремонту |
| Износ … | | | | | |

*Пример 6*

Дан шлицевой вал с центрирующим внутреннем диаметром $36e8^{-0{,}055}_{-0{,}089}$). Из данных табл. 2.5 следует, что за предельную величину износа вала при посадке $e8$ следует принять размер, соответствующий $1{,}5b11(^{-0{,}170}_{-0{,}330})$, т. е. размеру $36(^{-0{,}255}_{-0{,}495})$мм. Фактический диаметр $P_ф$ в месте наибольшего износа составил 34,14 мм. Из сопоставления размеров видно, что износ превышает предельный. Абсолютный максимальный износ шлицев по внутреннему диаметру составил:

$$\Delta_1 = (35{,}950+35{,}911)/2 - 34{,}140 = 1{,}79 \text{ мм}.$$

Выбор способа восстановления определяется аналогично примеру 3. Проанализируем параметр «$b$» (толщина шлица). Размер по чертежу равен:

$7f8(^{-0{,}013}_{-0{,}035})$, тогда $b_{ср} = (6{,}987+6{,}965)/2 = 6{,}976$ мм.

Принимаем предельный износ по толщине шлица равным $0{,}05 \cdot b$. Тогда предельная толщина шлица $b_{пр} = b_{ср} - 0{,}05 \cdot b = 6{,}976 - 0{,}05 \cdot 7 = 6{,}626$ мм, принимаем $b_{пр} = 6{,}23$. Фактическая толщина шлица $b_ф = 6{,}15$ мм.

Сопоставляя фактический размер с предельным, убеждаемся, что шлицы подлежат восстановлению. С учетом размеров, целесообразным способом восстановления можно признать вибродуговую наплавку на боковые поверхности шлицев. Данный способ исключает высокий нагрев, фазовые и структурные изменения в материале детали.

Износ по ширине шлица составит:

$$И_{iш} = b_{ср} - b_{ф} = 6{,}976 - 6{,}150 = 0{,}826 \text{ мм}.$$

*Пример 7*

Шпоночный паз с размером по чертежу $16H9\ (^{+0{,}043})$. Фактическая ширина паза 16,93 мм. Следовательно, износ паза по ширине составляет

$$\Delta_1 = b_{ф} - b_{ср} = 16{,}93 - (16{,}000 + 16{,}043)/2 = 0{,}909 \text{ мм}.$$

Предельный износ паза соответствует величине

$$b_{пр} = b_{ср} + 0{,}05 \cdot b = 16{,}021 + 0{,}05 \cdot 16 = 16{,}021 + 0{,}80 = 16{,}821 \text{ мм}.$$

Сопоставляя фактический и предельный размеры, убеждаемся, что износ паза выше предельного. Паз можно заплавить и профрезеровать на новом месте.

## 2.4. Выбор способа восстановления деталей

### 2.4.1. Особенности технологического процесса восстановления деталей

В отличие от технологического процесса изготовления деталей, процесс их восстановления имеет специфические *особенности*. При изготовлении сырьем для готовой детали служит заготовка, в то время как при восстановлении заготовкой является сама деталь с измененными размерами, формой и свойствами материала.

*Целью* технологического процесса восстановления деталей является возвращение детали утраченной работоспособности.

*Задачей* проектирования технологического процесса восстановления деталей является выбор наиболее рационального способа, обеспечивающего необходимую долговечность детали при наименьшей стоимости ее восстановления в условиях данного предприятия.

Поверхности деталей могут быть восстановлены, как правило, несколькими способами. Наиболее прогрессивными являются способы, основанные на нанесении покрытия на поверхность детали.

Выбор рационального способа восстановления зависит от конструктивно-технологических особенностей деталей (формы и размера, материала и термообработки, поверхностной твердости и шероховатости), от условий ее работы (характера нагрузки, рода и вида трения) и величины износа, а также стоимости восстановления.

Для учета всех этих факторов выбор способа восстановления детали рекомендуется вести последовательно с *использованием трех критериев:*

- технологического критерия или критерия применимости;
- технического критерия или критерия долговечности;
- технико-экономического критерия.

Рассмотрим их по порядку.

### 2.4.2. Технологический критерий

Знание структурных характеристик деталей, условий их работы и эксплуатационных свойств способов ремонта позволяет, в первом приближении, решить вопрос о применимости того или иного из них для восстановления отдельных деталей. При помощи такого анализа можно установить, какие из деталей могут восстанавливаться всеми или несколькими способами и какие по своим структурным характеристикам допускают только один способ восстановления.

Технологический критерий (критерий применимости) учитывает, с одной стороны, особенности подлежащих восстановлению поверхностей деталей, а с другой – технологические возможности соответствующих способов восстановления, т. е. определяет принципиальную возможность применимости того или иного способа восстановления к конкретным деталям (табл. П4.1 и П4.2).

Технологический критерий не может быть выражен числом и является по существу предварительным, поскольку при его помощи нельзя решить вопрос выбора рационального способа восстановления деталей, если этих способов может быть несколько.

Происходит сравнение технологических возможностей способов ремонта с теми требованиями, которые выдвигает данный дефект детали. Так, например, при помощи данного критерия заранее можно сказать, что детали небольшого диаметрального размера, имеющие высокую поверхностную твердость и незначительные износы (стержни клапанов и толкателей, шейки валов коробки передач под подшипники качения и т. п.), нерационально восстанавливать металлизацией и наплавками – ручной электродуговой и автоматической под слоем флюса**.** Внутренний диаметр 20 мм невозможно восстановить автоматизированной наплавкой, а коррозию поверхности не восстановить пластическим деформированием.

Отобранные по этому критерию способы восстановления должны удовлетворять трём условиям:

1. по своим технологическим особенностям они должны быть приемлемы к данной детали;
2. устранять имеющиеся дефекты;
3. способность данного способа восстановления обеспечить требуемую толщину наносимого покрытия

$$t_{тр} < t_{м}, \qquad (2.2)$$

где $t_{тр}$ – требуемая толщина наносимого покрытия на сторону, мм;

$t_{м}$ – толщина наносимого покрытия на сторону, обеспечиваемая данным методом (табл. П4.3).

Требуемую толщину наносимого покрытия можно примерно оценить следующим образом:

$$t_{тр} = \delta_{max} + Z, \qquad (2.3)$$

где $\delta_{max}$ – максимальный износ поверхности на сторону;

$Z$ – суммарный припуск на сторону на механическую обработку (табл. П4.3).

*Пример 8*

Оценить с позиций технологического критерия восстановления внешней цилиндрической поверхности 45*k*7, изношенной до 44,4 мм. Вал работает в условиях динамических нагрузок.

*Для восстановление детали можно применить нескольких способов*:

- Осталивание.

Обладает хорошими технико-экономическими показателями, высокой производительностью и относительной дешевизной.

- Хромирование.

Обладает хорошими технико-экономическими показателями, высокой поверхностной твердостью и износостойкостью.

- Наплавка в среде защитного газа.

В качестве защитной среды используется углекислый газ или водяной пар. Обеспечивает восстановление стальных и чугунных деталей диаметром более 12 мм, работающих в различных условиях. Восстановлению подлежат как гладкие, так и шлицевые валы.

- Плазменная наплавка.

Обеспечивает восстановление стальных и чугунных ответственных деталей.

- Газопламенное напыление (металлизация).

Наружные и внутренние цилиндрические поверхности неподвижных сопряжений при невысоких требованиях к прочности сцепления с основным материалом. Обеспечивает восстановление изношенных мест под неподвижные и подвижные посадки. Ограниченное применение для деталей, испытывающих динамические нагрузки.

- Наплавка под слоем флюса.

Наплавка деталей диаметром более 50 мм при повышенных требованиях к качеству наплавленного материала с толщиной наплавленного слоя более 1мм.

Поскольку вал работает в условиях динамических нагрузок, то способ восстановления металлизацией (газопламенным напылением) не подходит.

Наплавка под слоем флюса также не подходит, так как диаметр вала меньше 50 мм.

Оставшиеся способы проверяем по толщине наносимого покрытия. Износ поверхности на сторону; $\Delta_1 = (45 - 44{,}4)/2 = 0{,}3$ мм. Суммарный припуск на сторону на механическую обработку $Z$ берем согласно таблице П4.3. Полученные результаты заносим в табл. 2.9.

Из анализа таблицы следует, что при износе вала 0,3 мм на сторону его можно восстановить наплавкой в среде углекислого газа, плазменной наплавкой и осталиванием, но нельзя восстановить хромированием. Хромирование не проходит отбор по данному критерию.

Таблица 2.9

**Выбор способов восстановления по технологическому критерию**

| Способ восстановления | $t_м$, мм | $Z$, мм | $t_{тр}$, мм | $t_{тр} < t_м$, |
|---|---|---|---|---|
| Осталивание | 3,0 | 0,1 | 0,4 | Да |
| Хромирование | 0,3 | 0,1 | 0,4 | Нет |
| Наплавка в среде углекислого газа | 3 | 2 | 2,3 | Да |
| Плазменная наплавка | 4 | 2 | 2,3 | Да |

### 2.4.3. Технический критерий (критерий долговечности)

Технический критерий, в отличие от критерия применимости, численно выражается через коэффициент долговечности для каждого из способов восстановления и каждой конкретной детали (табл. П4.4, П4.5). Долговечность деталей, восстановленных теми или иными способами, зависит от эксплуатационных свойств покрытия. Наиболее рациональными способами будут те из них, которые обеспечивают наибольшую долговечность восстановленной детали.

После отбора способов, которые могут быть применены для восстановления той или иной изношенной поверхности детали, исходя из технологических соображений, отбирают те из них, которые обеспечивают наибольший последующий межремонтный ресурс этих поверхностей, т. е. удовлетворяют требуемому значению коэффициента долговечности $K_д$.

Коэффициент долговечности $K_д$ в общем случае является функцией трех других коэффициентов:

$$K_д = f(K_и\, K_в\, K_{сц}), \qquad (2.4)$$

где $K_и$ – коэффициент износостойкости; $K_в$ – коэффициент выносливости; $K_{сц}$ – коэффициент сцепляемости.

Для численного выражения критерия долговечности необходимо рассмотреть сравнительные характеристики эксплуатационных свойств способов.

В табл. П4.5 представлены значения коэффициентов износостойкости, выносливости и сцепляемости для наиболее распространенных методов восстановления. Коэффициент долговечности $K_д$ численно принимается равным значению того коэффициента, который имеет наименьшую величину.

При выборе способов восстановления применительно к деталям, не испытывающим в процессе работы значительных динамических и знакопеременных нагрузок, численное значение коэффициента долговечности определяется только численным значением коэффициента износостойкости.

Чтобы обеспечить работоспособность восстановленной детали в течение всего межремонтного периода, коэффициент долговечности должен превышать значение 0,8 (больше не требуется). Поэтому из числа способов, отобранных по технологическому критерию, к дальнейшему анализу принимаются те, которые обеспечивают коэффициент долговечности восстановленных поверхностей не менее 0,8.

*Пример 9*

Рассмотрим способы восстановления коленчатого вала диаметром $80h9$, прошедшие технический критерий. Данные сведены в табл. 2.10.

Таблица 2.10

**Выбор способов восстановления по техническому критерию**

| Способ восстановления | Коэффициенты | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $K_и$ | $K_в$ | $K_ц$ | $K_д$ |
| Осталивание | 0,9 – 1,2 | 0, 8 | 0,65 – 0,8 | 0,7 |
| Наплавка в среде углекислого газа | 0,85 | 0,9 – 1,0 | 1,0 | 0,9 |
| Плазменная наплавка | 1,0 – 1,5 | 0,8 – 1,3 | 1,0 | 0,9 |
| Постановка дополнительной детали | 1,0 | 0,8 | 1,0 | 0,8 |

Способ восстановления коленчатого вала осталиванием не подходит, так как $K_д < 0,8$.

### 2.4.4. Технико-экономический критерий

Первые два критерия выражают техническую часть задачи без учета экономической целесообразности того или иного способа. Поэтому необходима еще оценка способов восстановления при помощи экономического критерия, определяемого стоимостью восстановления деталей. Окончательное решение вопроса выбора рационального способа производится при помощи технико-экономического критерия, связывающего долговечность детали с экономикой ее восстановления.

Из всех прошедших отбор по техническому и технологическому критериям способов выбирают тот, у которого коэффициент экономической эффективности ($K_{эф}$) будет наименьшим

$$K_{эф} = C_у / K_д , \qquad (2.5)$$

где $K_д$ коэффициент долговечности восстановленной поверхности;

$C_у$ удельная себестоимость восстановления, руб/м$^2$ (табл. П4.6).

Полученные результаты следует занести в таблицу.

*Пример 10*

Рассмотрим способы восстановления шпоночного паза шириной 5 мм, прошедшие технический и технологический критерии (табл. 2.11).

Минимальное значение $K_{эф} = 500$ соответствует хромированию. Следовательно, выбираем данный способ.

Предварительно отобранные методы восстановления для каждого дефекта по техническому, технологическому и технико-экономическому критериям рекомендуется свести в таблицу и ранжировать по значению технико-экономического показателя. Заканчивается анализ окончательным выбором способа восстановления всей детали, в наибольшей степени удовлетворяющего всем трем критериям.

Таблица 2.11

**Сравнение способов восстановления**

| Способ восстановления | $C_у$, руб/м$^2$ | $K_д$ | $K_{эф}$ |
|---|---|---|---|
| Вибродуговая наплавка | 800 - 1000 | 0,82 | 1451,6 |
| Плазменное напыление | 1000 - 1400 | 0,5 | 2400 |
| Электромеханическая обработка | 800 - 900 | 1,1 | 727,8 |
| Хромирование | 400 - 900 | 1,3 | 500 |

*Пример 11*

Из проведенного анализа заданной детали для каждого вида дефекта был выбран способ восстановления, прошедший технический, технологический и технико-экономический критерии. Для окончательного выбора способа восстановления всей детали, в наибольшей степени удовлетворяющего всем трем критериям, данные сведены в табл. 2.12.

Таблица 2.12

**Выбор способа восстановления по техническому критерию**

| Дефект поверхности | Выбранный способ восстановления | $K_{эф}$ |
|---|---|---|
| Износ шейки вала | Наплавка под слоем флюса | 1625 |
| Износ шпоночного паза | Вибродуговая наплавка | 1451 |
| Срыв двух ниток резьбы | Плазменное напыление | 2400 |

Окончательно, для восстановления всей детали, выбираем вибродуговую наплавку, так как ей соответствует минимальное значение коэффициента экономической эффективности.

### 2.4.5. Рекомендации по выбору способов восстановления деталей

По результатам работы ремонтных предприятий можно дать некоторые общие рекомендации по выбору рациональных способов восстановления деталей, применительно к различным видам сопряжений.

Для деталей *неподвижных соединений*, при нанесении слоя толщиной 0,02 – 0,08 мм целесообразно применять электроискровое наращивание и осталивание.

Для деталей *подвижных соединений:*

- работающих в условиях трения-скольжения, при нанесении слоя толщиной до 1 мм, рационально хромирование и твердое осталивание;
- при толщине нанесения до 2 мм лучше всего вибродуговая наплавка и металлизация; при восстановлении деталей, входящих в группу подвижных соединений и работающих в условиях трения качения;
- при толщине нанесения слоя 2,5 – 3 мм рекомендуется применять вибродуговую наплавку;

- при толщине нанесения слоя свыше 3 мм – автоматическую электродуговую сварку под слоем флюса или вибродуговую наплавку.

### 2.5. Разработка маршрута восстановления детали

При разработке технологического маршрута ремонта следует выбрать методы восстановления и обработки поверхностей, определить состав и содержание операций, в том числе назначить число и последовательность переходов, а также определить тип применяемого оборудования. В курсовой работе разрабатывается технологический процесс исходя из необходимости устранения всех дефектов детали.

Разработка технологического маршрута может быть представлена следующей схемой:

1. Если технологические базовые поверхности детали нарушены или отсутствуют, то в первую очередь необходимо их обработать.

2. Затем восстанавливают другие поверхности в последовательности, обратной их степени точности.

3. Заканчивается обработка поверхностью, которая является наиболее точной и имеет наибольшее значение для детали.

4. При наличии термической или химико-термической обработки, она выделяется в отдельную операцию.

5. Контрольные операции выполняют в конце технологического процесса ремонта детали, и после выполнения наиболее ответственных операций.

Другими словами, первоначально выполняются работы по восстановлению базовых поверхностей, затем грубые и черновые (сварка, наплавка, обдирка и т. п.) и, наконец, чистовые отделочные операции. В начале технологического процесса выполняют подготовительные операции: очистку, обезжиривание, правку и восстановление базовых поверхностей.

Следует иметь в виду, что перед нанесением покрытия необходимо проводить механическую обработку поверхности детали, чтобы пространственно разделить межфазную границу "покрытие-деталь" и плоскость действия наибольших касательных напряжений. В противном случае, при дальнейшей механической обработке или при эксплуатации может произойти локальное или полное отделение покрытия от детали, что сведет на нет все усилия по её восстановлению.

Затем производят наращивание изношенных поверхностей (наплавку, металлизацию и др.). При этом в первую очередь выполняют операции, связанные с нагревом детали до высокой температуры (сварку, наплавку, термическую обработку). Затем выполняют операции, не требующие нагрева деталей (хромирование, осталивание и др.). После «наращивания» выполняют операции механической обработки ремонтируемых деталей.

Необходимо учитывать, что механическая обработка в условиях ремонтного производства имеет ряд особенностей:

- нестабильность физико-механических свойств по поверхности восстанавливаемой детали и неравномерность припусков на обработку;
- значительную твердость и хрупкость большинства видов покрытий.

Полученные данные рекомендуется свести в таблицу. В качестве примера в табл. 2.13 приведен вариант технологического маршрута восстановления коленчатого вала двигателя автомобиля, размеры шеек которого вышли за пределы «последнего» ремонтного размера, поэтому их восстанавливают наплавкой.

Таблица 2.13

**Технологический маршрут восстановления коленчатого вала**

| Номер операции | Наименование | Содержание операции | Оборудование |
|---|---|---|---|
| 05 | Моечная | Промыть и очистить | Моечная машина |
| 10 | Дефектовочная | Выявить трещины на шейках вала | Магнитоэлектрический дефектоскоп |
| 15 | Слесарная | Править вал | Пресс |
| 20 | Токарная | Расточить отверстие под подшипник | Токарный станок |
| 25 | Запрессовывание | Запрессовать втулку в отверстие под подшипник | Пресс |
| 30 | Токарная | Расточить отверстие во втулке | Токарный станок |
| 35 | Наплавочная | Наплавить шатунные и коренные шейки | Установка для автоматической наплавки |
| 40 | Круглошлифовальная | Шлифовать шейки вала предварительно (начерно) | Круглошлифовальный станок |
| 45 | Круглошлифовальная | Шлифовать шейки вала окончательно (начисто) | Круглошлифовальный станок |

Для ремонта детали составляют обычно несколько вариантов маршрутного технологического процесса (обычно 2 – 3 варианта), сопоставив которые, выбирают оптимальный. Варианты могут отличаться методами восстановления и обработки поверхностей, технологическими базами, последовательностью восстановления и обработки поверхностей и выполнения операций, применяемым оборудованием и др.

Одним из критериев выбора маршрута технологического процесса служит анализ точности ремонта, в соответствии с которым для реализации принимают маршрут, обеспечивающий получение детали с заданными параметрами качества (точности).

## 2.6. Расчет припусков при восстановлении детали

При назначении режимов обработки восстанавливаемых поверхностей деталей машин необходимо рассчитать толщину снимаемого слоя при удалении износа с поверхности детали и значение величины наносимого слоя, компенсирующего износ и обеспечивающего получение номинального размера поверхности детали ($D_н$), с заданными требованиями по точности и шероховатости.

Расчётная схема при определении величины слоя наносимого материала при восстановлении работоспособности поверхности (наружной цилиндрической) приведена на рис. 2.1.

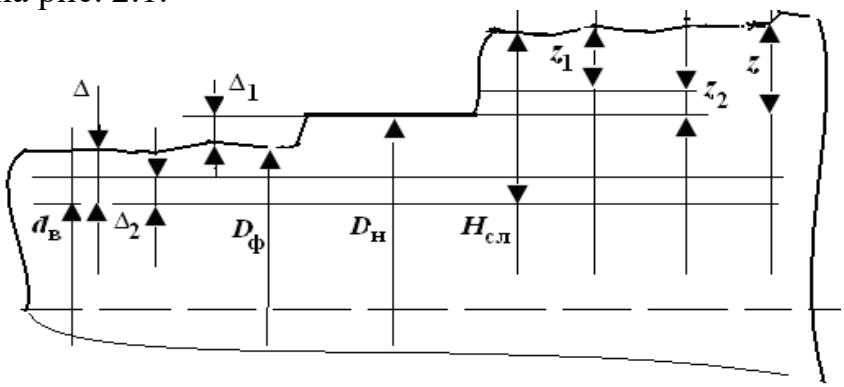



Рис. 2.1. Схема расчета наносимого слоя при восстановлении поверхности: $H_{сл}$ – толщина слоя наносимого материала; Δ – толщина снимаемого слоя; $Δ_1$ – величина износа; $Δ_2$ – толщина дефектного слоя материала; $z$ – припуск на механическую обработку, $z_1$ – припуск на черновую обработку, $z_2$ – припуск на чистовую обработку, $d_в$ – диаметр поверхности, подготовленной к восстановлению, $D_н$ – номинальный размер, $D_ф$ – фактический размер

Толщина наносимого слоя $H_{сл}$ зависит от требований по точности и шероховатости размера восстанавливаемой поверхности и определяется величиной толщины снимаемого слоя Δ и припуском на последующую механическую обработку $z$:

$$H_{сл} = Δ + z\ . \qquad (2.6)$$

Толщина снимаемого слоя с изношенной поверхности перед восстановлением определяется износом поверхности $Δ_1$ и толщиной дефектного слоя $Δ_2$. Толщина дефектного слоя принимается равной $0{,}1Δ_1$. Тогда

$$Δ = Δ_1 + Δ_2 = Δ_1 + 0{,}1Δ_1 = 1{,}1\ Δ_1. \qquad (2.7)$$

Припуск на механическую обработку $z$ включает в себя припуски на черновую $z_1$ и чистовую $z_2$ обработки (табл. П. 4.6, П4.7). Припуски на черновую $z_1$ и чистовую $z_2$ обработки определяются в зависимости от требований по точности и шероховатости номинального размера поверхности и во многом зависят от способа устранения дефекта поверхности (сварка, наплавка, металлизация, электролитические покрытия и т. д.).

Таким образом, величина слоя материала, наносимого на изношенную поверхность, зависит от величины износа, квалитета точности и класса шероховатости номинального размера поверхности и способа восстановлении износа. Как правило, чем ниже квалитет точности поверхности и выше класс шероховатости поверхности, тем величина слоя материала, наносимого на изношен-

ную поверхность, больше (требуется большее количество переходов при обеспечении номинального значения размера, восстанавливаемой поверхности).

Значения всех припусков сводятся в таблицу. Полученное значение величины толщины наносимого слоя $H_{сл}$ для всех способов восстановления, кроме электрохимического и химического, округляется в большую сторону до целого числа $H^*_{сл}$. Увеличение величины $H^*_{сл}$ следует учесть при расчетах режимов резания.

# 3. ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ

## 3.1. Требования к материалам

Восстановление изношенной поверхности детали предполагает нанесение покрытия, основные эксплуатационные свойства которого близки к свойствам изношенного слоя. Обычно используют тот же материал, из которого изготовлена восстанавливаемая деталь. Исключение составляет чугун. При восстановлении деталей из чугуна используется сталь 20.

Формирование на изношенной поверхности покрытия, полностью идентичного по химическому составу, структуре и свойствам изношенному слою, является, как правило, технически сложной и экономически нецелесообразной задачей. Поэтому нанесенные покрытия значительно отличаются от металла изношенного слоя.

При выборе материала для защитного покрытия руководствуются следующей исходной информацией:

– воздействию каких видов изнашивания подвержена деталь;

– из какого материала изготовлена деталь;

– какой технологический процесс предпочтителен;

– каковы свойства восстановленной поверхности;

– какова допустимая стоимость восстановления.

Определяющими являются эксплуатационные свойства поверхностного слоя детали, которые, в свою очередь, зависят от условий эксплуатации и характера разрушения. Условия работы восстанавливаемых и упрочняемых деталей разнообразны (табл. 3.3 [1]).

Для обеспечения высокой стойкости против разрушения при различных видах изнашивания наплавленный металл по структуре и свойствам должен отвечать требуемым свойствам. Свойства материала определяются химическим составом и структурой.

## 3.2. Металлическая проволока и лента

*Стальная сварочная проволока* согласно ГОСТ 2246-70 делится на низкоуглеродистую, легированию и высоколегированную. Предусмотрено 77 марок проволок диаметром 0,3-12 мм. Проволоку применяют для наплавки, электроконтактной приварки и газотермического напыления [1].

Для механизированной наплавки по ГОСТ 10543-98 выпускается специальная *наплавочная проволока* типа Нп диаметром 0,3; 0,5; 0,8; 1,2; 1,4; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0; 4.0; 5,0; 6,5 и 8,0 мм. Наплавочная проволока разделена на три группы: из углеродистых сталей, из легированных сталей и высоколегированных сталей (табл. 3.7 [1]). На практике в наплавочных работах находит также применение стандартная сварочная проволока по ГОСТ 2246-70 и проволока, предназначенная для изготовления пружин по ГОСТ 9389-75.

*Проволока для напыления.* Для газотермических покрытий применяют сварочную и наплавочную (Св-О8Г2С, Св-07Х19Ц9ТЮ, НП-65Г, НП-4ОХ13 и др.) проволоку. За рубежом ряд фирм выпускают специальную проволоку для газотермических покрытий. Фирма «Metco» (в настоящее время «Sulzer Metco», Швейцария) длительное время занимается разработкой технологии и проволочных материалов для газотермических покрытий (табл. 3.8 [1]).

### 3.3. Штучные электроды и прутки

*Наплавочные покрытые электроды* представляют собой электродный стержень с толстым электродным покрытием. Как правило, для электродного стержня применяют низкоуглеродистую сварочную проволоку, а требуемый химический состав наплавки формируется за счет легирующих порошков, вводимых в электродное покрытие. Электроды применяют для ручной электродуговой наплавки различных деталей. Предпочтительна наплавка на постоянном токе обратной полярности. Реже применяется наплавка на переменном токе.

В группу электродов для наплавки входят электроды, предназначенные для ручной дуговой наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами. Электроды изготовляют и поставляют в соответствии с требованиями ГОСТ 9466-75 и 1005-75. Для наплавочных работ в некоторых случаях также используют сварочные электроды, например электроды, предназначенные для сварки высоколегированных коррозионностойких и жаропрочных сталей.

Согласно ГОСТ 10051-75 электроды для наплавки по химическому составу наплавленного металла и твердости при нормальный температуре классифицированы на 44 типа [1].

К группе электродов для сварки и наплавки чугуна относятся электроды, предназначенные для устранения дефектов в чугунных отливках с помощью холодной сварки и наплавки, а также электроды, используемые при ремонте вышедшего из строя оборудования и восстановлении изношенных деталей. В табл. 3.11 [1] представлены электроды, которые применяются для сварки и наплавки алюминиевых, медных и никелевых сплавов.

*Наплавочные прутки.* Прутки применяют в основном для газопламенной и аргонодуговой наплавки в качестве присадочных материалов без приложения к ним электрического напряжения. Прутки получают литьем. Их изготовляют диаметром 4; 6; 8; 10: 12; 14 и 16 и длиной 250; 300; 350; 400; 450 и 500 мм.

Литые прутки используют также для изготовления покрытых электродов для ручной дуговой наплавки (табл. 3.12 [1])), например, марки ГН-1 со стержнем из сплава Сормайт и ЦН-2 со стержнем из стеллита ВЗК.

Присадочные прутки, используемые при сварке чугуна, в зависимости от назначения (ГОСТ 2671-70) ШИКП марки ПЧ1, ПЧ2, ПЧН1, ПЧН2 и др.

### 3.4. Порошки

Номенклатура порошковых материалов для наплавки и напыления включает металлические и композиционные порошки, порошковые смеси, тугоплавкие соединения (рис. 3.6 [1]).

В табл. 3.15 [1] представлены марки порошков высокоуглеродистых легированных сплавов. Эти наплавочные сплавы применяются для упрочнения и восстановления деталей машин, систем гидравлических приводов и др. Они наносятся плазменной и индукционной наплавкой. Сплавы ПР-Х30ГСР и ПР-ФМИ могут также наплавляться газопламенной горелкой с добавлением флюса в ее факел.

Наиболее распространенными самофлюсующимися порошками являются сплавы на основе никеля, легированные бором и кремнием. Они отличаются высокими технологическими свойствами и низкой температурой плавления, что позволяет наплавлять стальные летали на воздухе. Покрытия стойки к воздействию агрессивных сред, повышенных температур, износоустойчивы при трении по металлу со смазкой и без нее, а также при абразивном изнашивании. По уровню износостойкости покрытия из самофлюсующихся сплавов в 3-5 раз превосходят закаленные инструментальные стали. По американской спецификации эти сплавы называют Колмонои, а в Японии – Фукудалои.

В табл. 3.19- 3.21 [1] представлены марки и области применения самофлюсующихся порошков на никелевой основе, в разное время выпускавшихся в СНГ и за рубежом.

Специфические свойства присущи *порошкам тугоплавких соединений.* К ним относятся карбиды, оксиды, бориды, нитриды, интерметаллиды и их комбинации. Наиболее часто их применяют для напыления газотермических покрытий. Широко используют оксиды и карбиды. По сравнению с другими высокотемпературными материалами оксиды имеют наиболее низкую тепло- и электропроводность, но значительную прочность при высоких температурах.

Сочетание положительных свойств различных типов порошков и получение частиц, удовлетворяющих комплексу требований, реализуется в *композиционных порошках.* В зависимости от конструкции различают плакированные и конгломератные композиционные частицы. Первые представляют собой исходную частицу одного из материалов, на поверхности которой расположен слой или несколько слоев других материалов. Конгломератная частица сформирована из множества исходных частиц нескольких материалов.

### 3.5. Порошковая проволока и ленты

Порошковая проволока состоит из мягкой тонколистовой металлической оболочки и сердцевины, которая представляет собой смесь порошков ферросплавов, чистых металлов, карбидов, боридов, раскислителей, шлакообразую-

щих и стабилизирующих горение дуги веществ. Наиболее распространенный диаметр порошковой проволоки 2,6 – 3,6 мм, однако для наплавки крупногабаритных деталей используют проволоку диаметром до 8 мм.

Порошковую проволоку выпускают четырех типов: для наплавки под флюсом, в среде защитных газов, в атмосфере воздуха, универсальную. В странах СНГ изготовляют легированную и высоколегированную порошковую проволоку, обеспечивающую износостойкую и коррозионно-стойкую наплавку (табл. 3.27 [1]).

Ленточные электроды позволяют повысить производительность процесса наплавки и уменьшить глубину проплавления основного металла. Холоднокатаную ленту можно изготовить только из пластичных деформируемых сплавов с невысоким содержанием углерода, поэтому изготовляют спеченную и порошковую ленты. *Спеченную металлокерамическую ленту* на железной основе производят из смеси металлических порошков ферросплавов, графита и других компонентов путем холодной прокатки смеси и последующего спекания в защитной среде.

Важными преимуществами проволочного и стержневого процессов по сравнению с порошковым являются нагрев материала до жидкого состояния и нанесение на поверхность изделия покрытий из таких расплавленных частиц с высокой скоростью. При напылении некоторых материалов (оксидов) скорость полета частиц достигает 200 м/с. Полученные таким образом покрытия по прочности и плотности не уступают плазменным, а стоимость их ниже плазменных в 2 – 3 раза.

### 3.6. Синтетические материалы

В настоящее время на ремонтных предприятиях большое количество различных деталей машин изготовляют из полимерных материалов. Например, подшипники опорных катков экскаваторов и тракторов, втулки шарниров рессорных подвесок грузовых автомобилей, втулки ходовых колес кранов, штуцера, манжеты, прокладки и другие детали гидравлических систем, блоки грузоподъемных машин, рабочие органы насосов и вентиляторов, детали воздухоочистителей, фрикционных муфт, зубчатые и червячные колеса и др.

При выборе пластиков необходимо учитывать следующие основные требования. Физико-механические свойства выбираемых пластиков должны быть близки к свойствам материала детали или соответствовать нагрузкам, которые возникают в сопряжениях. Износостойкость пластиков должна быть не ниже износостойкости восстанавливаемых деталей. Адгезия (прилипаемость) пластиков к материалу детали должна быть высокой. Для повышения адгезии возможно применение различных клеев. При выборе пластиков необходимо учитывать размер и направление усадки пластмассового слоя. Направление сил усадки пластмассы должно совпадать с направлением сил адгезии, т. е. усадка должна улучшать сцепление слоя пластмассы с материалом детали.

На поверхности деталей пластмассу наносят намазкой, напылением, оплавлением и др. способами.

Не рекомендуется покрывать пластмассой сопрягаемые поверхности валов и отверстий одновременно, в связи с тем, что пластмассы плохо отводят тепло.

### 3.7. Выбор и определение нормы расхода материала

По своему назначению материалы для восстановления деталей подразделяются на основные и вспомогательные. Выбранные материалы – наплавочная проволока, лента, порошок, флюс, технологические газы – должны обеспечивать выполнение технических требований к восстановленной детали, изложенных на ремонтном чертеже. Современные способы восстановления деталей характеризуются разнообразием применяемых материалов. Их назначение и характеристики даны в специальной справочной и учебной литературе [1, 7, 9]. Марки и назначение основных материалов для дуговой сварки и наплавки и приведены в прил. 5.

Для ручной дуговой сварки и наплавки применяются различные электроды. Марки, типы электродов, их назначение даны в справочнике [1]. Там же приведены марки и назначение стальной наплавочной и сварочной проволоки.

В последние годы при восстановлении деталей в больших объемах применяют порошковые проволоки и ленты. Марки и назначение порошковых спеченных лент даны в справочнике [1]. Для дуговой наплавки применяются плавленые и керамические флюсы и их смеси.

Норму расхода основных и вспомогательных материалов для восстановления деталей рассчитывают различными методами, в том числе опытно-экспериментальным и опытно-статистическим. Допускается определение нормы расхода материалов по типовым технологическим процессам или литературным источникам, путем их пересчета к конкретной детали. Нормы расхода материалов сводят в таблицу.

Для примера в табл. 3.1 даны нормы расхода порошковых материалов, необходимых для устранения различных дефектов распределительного вала двигателя СМД – 62 газопламенным напылением.

Таблица 3.1

**Нормы расхода порошковых материалов при восстановлении распределительного вала двигателя СМД – 62 газопламенным напылением**

| Наименование дефекта | Марка порошка | Норма расхода на 1 деталь, кг |
|---|---|---|
| Износ поверхностей опорных шеек | ПТ-НА-01 (подслой) | 0,03 |
| | ПГ-19М-01 (основной слой) | 0,09 |
| Износ поверхностей кулачков | ПГ-10Н-01 | 0,6 |

# 4. ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ И ОСНАСТКИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ

Выбор технологического оборудования во многом зависит от типа производства. В условиях единичного производства используют универсальные станки, а при серийном производстве применяют универсальные станки, станки с ЧПУ. В условиях массового производства используют специальное технологическое оборудование

При проектировании технологических процессов выбор станка производят по следующим показателям:

- типу производства, размеру партии обрабатываемых деталей;
- виду обработки (токарная, фрезерная, сверлильная и т. п.);
- требованиям к точности, шероховатости и экономичности обработки;
- площади рабочей зоны станка, габаритные размеры детали, расположение обрабатываемых поверхностей;
- габаритным размерам станка (высота и расстояние между центрами, размеры стола);
- точности и жесткости станка;
- частоте вращения шпинделя;
- скорости подачи;
- мощности станка;

Выбор технологической оснастки производится на основе анализа возможности реализации технологического процесса при выполнении технических требований к детали, технических возможностей оснастки, а также конструктивных характеристик детали и восстанавливаемых поверхностей и др.

Выбор оборудования и технологической оснастки производится по специальным каталогам или справочникам [1, 4, 5, 8]. Технические характеристики некоторых установок для наплавки деталей даны в прил. 6.

Например,

1. Наплавочная, наплавлять поверхность 3. Станок – сварочный полуавтомат НДГ-312УЗ. Патрон трехкулачковый 7100-0009, ГОСТ 2675-80 центр вращающийся, ГОСТ 8742-75, штангенциркуль ШЦ-II-160-0,02, ГОСТ 166-80, наплавочная проволока Св-08А, флюс 7И-348-В.
2. Токарная, точить поверхность 2. Станок токарно-винторезный 1Л62, патрон трехкулачновый 7100-0009 ГОСТ 2675-80, центр вращающийся, ГОСТ 8742-75, штангенциркуль ШЦ-II-160-002 ГОСТ 166-80.
3. Фрезерная, фрезеровать шпоночный паз, поверхность 3. Станок вертикально фрезерный 6Б12ПБ, патрон цанговый 6151-0003, ГОСТ 3025-75, тиски 7827-0259, ГОСТ 4045-75, фреза концевая 2252-0152 Р18, ГОСТ 7063-75. Штангенциркуль ШЦ-II-160-002, ГОСТ 166-80.

После выбора оборудования и оснастки для проектируемого технологического процесса восстановления детали заполняют ведомость и приводят техническую характеристику. Пример ведомости оборудования и оснастки по

технологическому процессу восстановления деталей типа "вал" газопламенным напылением порошковых материалов дан в таблице 4.1.

Таблица 4.1

**Ведомость оборудования и оснастки для восстановления деталей типа "вал" газопламенным напылением порошковых материалов**

| Наименование оборудования и оснастки | Обозначение |
|---|---|
| Аппарат для напыления | 021-4 ВНПО "Ремдеталь" |
| Вращатель | 011-1-09 "Ремдеталь" |
| Установка для струйной обработки деталей | 026-7 "Ремдеталь" |
| Станки токарные и круглошлифовальные | 3В1161, 3А151, 3Б12, 3А423 |
| Печь для сушки порошка | ТХ8-1479 |
| Набор сит с сетками | N-01, N 004, №-0071 |
| Стол сварщика | Мод. С 10020 "Ремдеталь" |
| Стеллаж | ОРГ-1468-06-92А |

Основной задачей, стоящей перед студентом при выборе моделей станков, является достижение наивысшей производительности, заданной точности деталей, наименьшей себестоимости их обработки. При этом необходимо помнить, что разные станки дают различную точность обработки. Нельзя, например, получить на обычном токарном станке при обработке резцом валик с допуском 0,01 мм по диаметру. В то же время эту точность легко получить на шлифовальном станке.

С целью экономного расходования электроэнергии обработку небольших деталей следует планировать на станках меньших размеров, имеющих соответственно менее мощные электродвигатели.

*Выбор технологической оснастки*. К технологической оснастке относятся станочные приспособления, вспомогательный, режущий, слесарный инструмент и средства контроля.

В зависимости от выбранного типа производства определяют систему приспособлений, рекомендуемую для применения в данных условиях.

Универсальные многоцелевые, широко переналаживаемые приспособления выбираются по справочной литературе, например [8]. При этом необходимо учитывать размеры посадочных мест приспособлений, чтобы они подходили к выбранным моделям станков, а также возможности соответствующих приспособлений, позволяющие устанавливать в них детали, для которых разрабатывается технологический процесс.

В зависимости от вида обработки, свойств обрабатываемого материала, точности обработки и качества обрабатываемой поверхности детали выбирают тип, конструкцию и размеры режущего инструмента, например: «Резец проходной Т5К10». При выборе резцов указывают сечение державки и геометрические параметры режущей части. Материал режущего инструмента выбирают в зависимости от вида обработки, материала и твердости детали [4, 8].

Выбор абразивного инструмента производится с учетом того, что для обработки сталей используются круги из электрокорунда, а для чугунов и цвет-

ных металлов из карбида кремния. Конкретные рекомендации по выбору абразивных инструментов можно найти в [4, 8]. Выбор шлифовального круга производится в зависимости от вида обработки поверхности, твердости и материала обрабатываемой детали.

Например, резец токарный проходной упорный отогнутый с углом 90° с пластинами из твердого сплава Т15К6.

$h$ = 20 мм; $l$ = 120 мм; $B$ = 16мм; $r$ = 1мм;
Круг шлифовальный ПВК 23А 32П С1 К1 35м/с.
$D_к$ = 600мм; $B_к$ = 63 мм; ГОСТ2424-84

Вспомогательный инструмент предназначен для закрепления режущего инструмента в соответствующих посадочных местах металлорежущих станков. Он должен иметь, с одной стороны, посадочные поверхности и элементы крепления, соответствующие режущему инструменту, а с другой установочные поверхности и элементы крепления, соответствующие посадочным местам станков.

Если применяются специальные приспособления (неразборные специальные приспособления – НСП), то следует иметь в виду, что такие приспособления необходимо проектировать самостоятельно в соответствии с существующими методиками. Специализированные, стандартные системы приспособлений могут быть следующих видов: универсально-сборные приспособления (УСП), сборно-разборные (СРП), универсальные наладочные (УНП), специализированные наладочные (СНП).

При разработке технологического процесса восстановления детали необходимо выбрать те приспособления и инструменты, которые способствуют повышению производительности труда, точности обработки, улучшению условий труда, ликвидации предварительной разметки детали и выверке ее при установке на станке.

# 5. РАСЧЁТ РЕЖИМОВ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Принятые режимы операций (особенно нанесение покрытий) существенно влияют на ресурс восстановленных деталей. Поэтому они должны обеспечивать выполнение технических требований к детали, изложенных на ремонтном чертеже. Параметры режимов нанесения покрытий различными способами приведены в справочной и технической литературе [1–3, 6, 11].

Режим обработки определяют отдельно для каждой операции с разбивкой ее на переходы.

## 5.1. Наплавка

Наплавка на деталь металла позволяет не только восстановить первоначальные свойства изделия, но и придать ему совершенно новые ценные качества. Цель наплавки может быть различной: восстановление утраченной геометрии детали или придание ей новой формы, образование поверхностного слоя с заданными физико-механическими свойствами (такими как повышенная твердость, износостойкость, антифрикционность, коррозионная стойкость, жаростойкость и пр.), упрочнение наплавкой.

Наплавку можно производить на любые поверхности - плоские, конические, цилиндрические, сферические. В больших пределах может меняться и ее толщина - от нескольких долей миллиметра до сантиметра и более.

### 5.1.1. Дуговая наплавка под флюсом и в среде защитных газов

Дуговая наплавка под флюсом и в среде защитных газов является наиболее распространенным способом восстановления деталей в ремонтном производстве не только в России, но и за рубежом. Марка флюса и проволоки определяется требованиями, предъявляемыми к наплавленному слою. Детали из малоуглеродистых и низколегированных сталей наплавляют проволокой диаметром 1,2 – 1,5 мм марок Св-0,8, Св-10А, Нп-30, Нп-40 и др., а из легированных сталей – марок Св-18ХГСА, Нп-30ХГСА, порошковыми проволоками марок ПП-3Х2В8, ПП-Х42ВФ и др. Высокую износостойкость наплавленного слоя можно получить наплавкой проволоки Нп-2Х13.

Для наплавки применяют плавящиеся марганцовистые флюсы марок АН-318А и ОСЦ-45, с помощью которых наплавляемый слой легируется марганцем, повышающим его твердость, вязкость и износостойкость. Наплавкой проволокой Св-08 под керамическим флюсом АНК-19 можно получить твердость наплавленной поверхности HRC 45–49.

Наплавка под слоем флюса широко применяются при восстановлении валов, осей и других деталей диаметром более 50 мм, имеющих износ более 1-1,5 мм на сторону. Наплавка деталей диаметром до 50 мм затруднена из-за стекания металла, осыпания флюса, возможности прижога и коробления.

Отличительной особенностью процесса автоматической сварки под флюсом является то, что сварочная дуга горит не на открытом воздухе, а под слоем зернистого сыпучего флюса. Электродная проволока подаётся вниз в зону наплавки со скоростью её плавления, плавится и переходит на деталь в виде отдельных капель.

Расплавленный флюс образует плотную эластичную оболочку – флюсогазовый пузырь, поверх которого находится слой жидкого шлака.

Процесс широко применяется для восстановления цилиндрических поверхностей деталей. Режимы наплавки характеризуются силой тока, напряжением, скоростью наплавки, скоростью подачи проволоки, шагом наплавки, вылетом и смещением электрода. Силу тока при наплавке определяют в зависимости от диаметра детали (табл. 5.1).

Таблица 5.1

**Зависимость тока при наплавке от диаметра детали**

| Диаметр детали, мм | Сила тока, А | |
|---|---|---|
| | при диаметре электродной проволоки, мм | |
| | 1,2–1,6 | 2–2,5 |
| 50–60 | 120–140 | 140–160 |
| 65–75 | 150–170 | 180–220 |
| 80–100 | 180–200 | 230–280 |
| 150–200 | 230–250 | 300–350 |
| 250–300 | 270–300 | 350-380 |

Основные параметры режимов наплавки определяют по следующим формулам:

скорость наплавки, м/ч

$$V_{\text{н}} = \frac{\alpha_{\text{н}} \cdot I}{h \cdot s \cdot \gamma}, \qquad (5.1)$$

частота вращения детали, об/мин

$$n_{\text{д}} = \frac{1000 \cdot V_{\text{н}}}{60 \cdot \pi \cdot d}, \qquad (5.2)$$

скорость подачи проволоки, м/ч

$$V_{\text{пр}} = \frac{4 \cdot \alpha_{\text{Н}} \cdot I}{\pi \cdot d_{\text{пр}}^2 \cdot \gamma}, \qquad (5.3)$$

шаг наплавки, мм / об

$$S = (2 - 2{,}5) \cdot d_{\text{пр}}, \qquad (5.4)$$

вылет электрода, мм

$$\delta = (10 - 12) \cdot d_{\text{пр}}, \qquad (5.5)$$

смещение электрода, мм

$$l = (0{,}05 - 0{,}07) \cdot d, \qquad (5.6)$$

где $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент наплавки, г/А·ч (при наплавке постоянным током обратной полярности $\alpha_{\text{н}} = 11 – 14$); $h$ – толщина наплавленного слоя, мм; $\gamma$ – плотность электродной проволоки, г/см$^3$ ($\gamma = 7{,}85$ ); $d_{\text{пр}}$ – диаметр электродной проволоки, мм; $I$ – сила тока, А; $d$ – диаметр детали, мм.

Ориентировочные параметры режимов наплавки под слоем флюса цилиндрических деталей даны в табл. 5.2.

Таблица 5.2

**Режимы наплавки цилиндрических деталей (толщина слоя 1,0 – 1,2 мм)**

| Параметр | Диаметр детали, мм | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 10 ... 20 | 20 ... 30 | 40 ... 50 | 90 ... 100 |
| Сила тока, А | 70 ... 90 | 85 ... 110 | 110 ... 180 | 100 ... 300 |
| Скорость наплавки, м/ч | 40 ... 45 | 40 ... 45 | 30 ... 35 | 70 ... 80 |
| Смещение электрода, мм | 2 ... 4 | 3 ... 5 | 6 ... 10 | 8 ... 10 |
| Шаг наплавки, мм/об | 2,5 ... 3,0 | 2,8 ... 3,2 | 3,0 ... 3,5 | 5,0 ... 7,0 |
| Вылет электрода, мм | 7 ... 10 | 8 ... 11 | 10 ... 15 | 20 ... 27 |

### 5.1.2. Вибродуговая наплавка

Вибродуговой наплавкой восстанавливают большую номенклатуру деталей типа “вал” и другие. Параметры режима нанесения покрытий определяют по следующим формулам:
сила тока, А

$$I = \frac{\pi \cdot d_{\text{пр}}^{\,2}}{4 \cdot (60...75)}, \tag{5.7}$$

скорость подачи электродной проволоки, м/ч

$$V_{\text{пр}} = \frac{0{,}1 \cdot I \cdot U}{d_{\text{пр}}^{\,2}}, \tag{5.8}$$

где $d_{\text{пр}}$ – диаметр проволоки, мм; $U$– напряжение, В ($U$ = 14...20 В);
скорость наплавки, м / ч

$$V_{\text{Н}} = \frac{0{,}785 \cdot d_{\text{пр}}^{\,2} \cdot V \cdot \eta}{h \cdot S \cdot \alpha}, \tag{5.9}$$

где $\eta$ – коэффициент перехода электродного материала в наплавленный металл ($\eta$ = 0,8 ... 0,9); $h$ – толщина наплавленного слоя (без механической обработки) мм; $S$ – шаг наплавки, мм/об; $\alpha$ – коэффициент, учитывающий отклонения фактической площади сечения наплавленного слоя от площади четырехугольника с высотой $h$ ($\alpha$ = 0,8);
шаг наплавки, мм/об

$$S = (1{,}6...2{,}2)d_{\text{пр}}, \tag{5.10}$$

амплитуда колебаний

$$A = (0{,}75...1{,}0)d_{\text{пр}}. \tag{5.11}$$

### 5.1.3. Плазменная наплавка

При плазменной наплавке расчет таких параметров режима, как скорость, частота вращения, толщина покрытий рекомендуется выполнять по формулам, принятым для расчета режима наплавки под слоем флюса.

Наибольшее применение для плазменной наплавки деталей получили сормайт, сплавы ФБХ–9–2, Ус–25, ПГ–СР3 и СНГН–50. Технологические режимы плазменной наплавки деталей при работе с аргоном следующие: сила тока 150 – 200 А; напряжение холостого хода 120 – 160 В, рабочее напряжение 40 – 45 В; расход плазмообразующего газа 1,5 – 2,5 л/мин, расход транспортирующего газа 5 – 7 л/мин. Расход защитного газа 15 – 20 л/мин; скорость наплавки 0,15 – 0,18 м/мин, расстояние от горелки до детали 10 – 18 мм; число колебаний горелки в минуту 40 – 100.

Рациональное значение силы тока при плазменной наплавке находится в пределах 200 – 230 А. Коэффициент наплавки $\alpha_н$ = 10 – 13 г/А·ч.

Расход порошка определяется по формуле

$$Q = 0{,}1 \cdot V_н \cdot S \cdot h \cdot \gamma \cdot K_П , \qquad (5.12)$$

где $Q$ – расход порошка, г/с; $S$ – шаг наплавки, мм/об (S = 0,4 – 0,5); $h$ – толщина наплавленного слоя, мм; γ – плотность наплавленного металла, г/см$^3$. Для порошковых твердых сплавов на железной основе γ = 7,4; для сплавов на никелевой основе – γ = 0,8; $K_п$ – коэффициент, учитывающий потери порошка, $K_п$ = 1,12 – 1,17

## 5.2. Наварка ленты и проволоки

Часто применение металлизации не оправдано из-за слишком большого размера пятна напыления, из-за чего невозможно восстанавливать узкие шатунные шейки. В этих случаях применяется наварка ленты и проволоки. Процесс контактной наварки ленты производится на специальных установках совместным деформированием навариваемого металла и поверхностного металла, нагретых в очаге деформации до пластического состояния короткими (0,02 – 0,16 с) импульсами тока 7 – 30 мА. Образуемые при этом сварочные точки располагаются по винтовой линии и частично перекрывают друг друга, что достигается вращением детали со скоростью, пропорциональной частоте импульсов, и продольным перемещением сварочных клещей.

Наибольшее распространение контактная наварка проволоки нашла для восстановления резьбовых участков валов. Диаметр проволоки подбирают таким, чтобы при наварке она полностью заполнила впадину резьбы и выступала на величину припуска, необходимого для последующей обработки. Учитывая износ витков резьбы, продольную подачу сварочных клещей принимают равной шагу резьбы.

Частота вращения детали, продольная подача сварочных клещей и частота следования импульсов являются важными параметрами процесса, определяющими его производительность. Соотношение этих величин подбирают так, чтобы обеспечить 6 или 7 сварочных точек на 1 см длины сварного шва. Режимы приварки ленты приведены в табл. 5.3.

Частоту вращения детали, норму времени на наплавку рассчитывают аналогично расчету этих параметров при наплавке под слоем флюса.

Таблица 5.3

**Рекомендуемые режимы приварки ленты, толщиной 1 мм**

| | |
|---|---|
| Сила сварочного тока, кА | 16,1 – 18,1 |
| Длительность сварочного цикла, с | 0,04 – 0,08 |
| Длительность паузы, с | 0,1 – 0,12 |
| Подача сварочных клещей, мм/об | 3 – 4 |
| Усилия сжатия электродов, кН | 1,30 – 1,60 |
| Ширина рабочей части сварочных роликов, мм | 4 |
| Скорость наплавки, м/мин. | 3 – 4 |

## 5.3. Нанесение электролитических покрытий

Восстановление деталей электролитическими покрытиями заключается в нанесении на изношенную поверхность детали металла путем электролиза.

Толщина осажденного покрытия

$$h = \frac{cJ_k t\eta}{1000\gamma}, \qquad (5.13)$$

где $J_к = I/S$ – катодная плотность тока, А/дм$^3$; γ – плотность осаждаемого металла, г/см$^3$; $c$ – электрохимический эквивалент, г/А·ч; η – выход по току или к. п. д. процесса, % (табл. 5.4).

Таблица 5.4

**Электрохимический эквивалент и выход по току или к. п. д.**

| Параметр | Элемент | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Fe | Cr | Ni | Cu, кислый электролит | Cu, цианистый электролит | Zn |
| Электрохимический эквивалент, г/А·ч | 1,042 | 0,324 | 1,095 | 1,186 | 2,372 | 1,220 |
| Выход по току или к. п. д., % | 85-95 | 13-18 | 90 | 98 | 98 | 92 |

Электрохимическим эквивалентом называется количество вещества в граммах, выделившегося на катоде за 1 А·ч.

По приведенной формуле можно определить продолжительность электролиза при заданной толщине покрытия. Придание анодам формы, соответствующей форме детали, способствует более равномерному распределению осадка, так как при этом расстояние участков катодов (деталей) от анода получается более равномерным.

### 5.3.1. Хромирование

Для восстановления деталей широкое распространение получило хромирование. Хромированием восстанавливают детали с износом до 0,3 мм на сторону, работающие при значительных удельных давлениях, больших скоростях

скольжения, поверхности которых должны обладать высокой твердостью, термокоррозионной и износостойкостью.

В качестве анода при хромировании применяют нерастворимый в электролите сплав свинца и сурьмы (5 – 10 %). Площадь анодов должна быть в 1,5 – 2 раза больше площади катода, а форма должна повторять форму детали, что повышает равномерность покрытия. Требуемое расположение анодов в ванне относительно катодов обеспечивается с помощью подвесных приспособлений.

При хромировании используют различные электролиты (табл. 5.5). Время хромирования 90–380 мин.

Таблица 5.5

**Состав электролитов и режимы хромирования**

| Компоненты и параметры режима | Номер электролита | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Хромовый ангидрид, г/л | 120 … 150 | 220 … 250 | 300 … 350 | 225 … 300 | 380 … 420 |
| Серная кислота, г/л | 1,2 … 1,5 | 2,2 … 2,5 | 3 … 3,5 | – | – |
| Температура электролита, °С | 50 … 60 | 45 … 60 | 40 … 50 | 50 … 65 | 18 … 25 |
| Плотность тока, А/дм$^2$ | 30 … 100 | 20 … 60 | 15 … 30 | 40 … 100 | 100 … 300 |
| Выход по току, % | 15 … 18 | 12 … 14 | 8 … 10 | 18 … 20 | 35 … 40 |

После нанесения слоя хрома поверхность подвергают шлифованию и полировке.

### 5.3.2. Осталивание

Для восстановления деталей широкое распространение получило осталивание (железнение). При осталивании применяют аноды из малоуглеродистой стали толщиной 5 – 9 мм, материал которых постепенно переносится на поверхность детали. Осталиванием восстанавливают отверстия в корпусных деталях, шейки валов агрегатов трансмиссий, валики приводов насосов, шкивы, катки, кронштейны, ступицы, чугунные втулки и другие детали с износом до 3 мм на сторону.

Процесс осталивания по сравнению с хромированием имеет более высокую производительность. Он дает возможность получать покрытия толщиной до 3 мм, не требует дефицитных химических реактивов. Выход по току в этом процессе равен 85-95 %, скорость осаждения 0,3 – 0,6 мм/ч, расход электроэнергии - 1,5 кВт-ч/дм$^2$. Предел прочности осажденного покрытия составляет 350–450 МПа, пластичность 5-10 %, твердость НВ 100–240 (в зависимости от состава электролита и условий электролиза). Твердость осадков при осталивании увеличивается при снижении концентрации солей в электролите, росте плотности тока, понижении температуры, введении в электролиты различных органических и минеральных добавок.

Процесс осталивания осуществляется в водных растворах хлорида или сульфата железа (табл. 5.6). Растворимые аноды изготовляют из малоуглеродистой стали.

Таблица 5.6

**Состав распространенных электролитов и режимы осталивания**

| Компоненты и параметры режима | Номер электролита | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| Хлористое железо, г/л | 300 ... 350 | 400 ... 600 | 150 ... 200 |
| Сернокислое железо, г/л | – | – | 200 |
| Аскорбиновая кислота, г/л | – | 0,5 ... 2,0 | – |
| Кислотность, pH | 0,8 ... 1,2 | 0,5 ... 1,3 | 0,6 ... 1,2 |
| Температура электролита, °С | 70 ... 80 | 20 ... 50 | 30 ... 50 |
| Плотность тока, А/дм$^2$ | 20 ... 50 | 10 ... 30 | 20 ... 25 |
| Выход по току, % | 85 ... 95 | 85 ... 92 | 85 ... 92 |

К недостаткам способа осталивания относятся: сравнительно слабое сцепление наносимого слоя с основным металлом и малая твердость осажденного слоя без термической обработки.

## 5.4. Механическая обработка

### 5.4.1. Особенности режимов механической обработки

Процесс восстановления деталей может быть условно разделен на два этапа. На первом этапе восстанавливают геометрические размеры детали различными способами, среди которых наибольшее применение нашли способы, основанные на нанесении на изношенную поверхность покрытий. На втором этапе проводят последующую механическую обработку нанесенных покрытий.

Механическая обработка при восстановлении деталей имеет специфические особенности. После механической обработки поверхности детали должны иметь не только заданные размеры, правильную геометрическую форму, требуемую шероховатость, но и соответствующее расположение обработанных поверхностей относительно базовых поверхностей и по отношению друг к другу.

Выбор баз при восстановлении осложняется тем, что обработке подвергается не заготовка с соответствующими припусками, а деталь с неравномерно изношенными поверхностями и остаточными деформациями.

Технологические базы деталей, установленные в процессе изготовления, в большинстве своем сохраняются. Однако в ряде случаев они могут быть повреждены, а в некоторых случаях и вовсе отсутствовать. При базировании деталей на изношенные или повреждённые базовые поверхности погрешности установки детали возрастают, что не позволяет обеспечить требуемую точность обработки. Поэтому механическую обработку деталей надо начинать с проверки и исправления базовых поверхностей. Если необходимо использовать рабочие поверхности детали в качестве базовых, то выбирают те из них, которые не изношены. В том случае, когда первоначальные базы вообще отсутствуют, об-

работку начинают или с восстановления баз, или, если это возможно, выбирают такие поверхности, которые имеют наиболее точные размеры и связаны жёсткими допусками с обрабатываемой поверхностью.

При выборе баз для обработки восстанавливаемых деталей необходимо руководствоваться следующими правилами:

- принимать в качестве базовых те поверхности, которыми определяется положение детали в узле;
- базовые поверхности должны быть связаны наиболее жёсткими допусками с обрабатываемыми поверхностями деталей;
- при обработке нескольких поверхностей необходимо стремиться к соблюдению единства баз, т. е. к обработке всех поверхностей при одной и той же установочной базе;
- выбранная база должна обеспечить минимальную деформацию детали от условий резания и закрепления.

### 5.4.2. Обработка под ремонтный размер

При восстановлении деталей обработкой под ремонтный размер обычно обрабатывают наиболее сложную и дорогостоящую деталь, а сопрягаемую с ней заменяют новой или восстановленной также до ремонтного размера. Различают ремонтные размеры категорийные (регламентированные) и нерегламентированные. Регламентированные ремонтные размеры и допуски на них устанавливает предприятие-изготовитель. Детали с регламентированными размерами выпускает промышленность: поршни, поршневые кольца, поршневые пальцы, вкладыши подшипников шеек коленвала. Значение и число регламентированных ремонтных размеров зависят от износа деталей за межремонтный период, припуска на механическую обработку, запаса прочности детали или глубины термической обработки ее поверхностного слоя.

Расчетные формулы для определения ремонтных размеров для наружных и внутренних цилиндрических поверхностей (валов и отверстий) имеют вид [6 – 8, 12, 17, 18]:

$$d_{\text{рп}} = D_{\text{н}} - \gamma\, n;$$
$$D_{\text{рп}} = D_{\text{н}} + \gamma\, n, \qquad (5.14)$$

где $d_{\text{н}}$ и $D_{\text{н}}$ – соответственно номинальный размер вала и отверстия по рабочему чертежу, мм; $n$ – номер ремонтного размера; $\gamma$ – ремонтный интервал, мм;

$$\gamma = 2\,(U \cdot \beta + Z_{\text{о}}),$$

где $\beta = (0{,}5\text{-}1{,}0)$ – коэффициент неравномерности износа (табл. 5.7); $U$ – максимальный износ на диаметр, мм; $Z_{\text{о}}$ – общий припуск на механическую обработку на сторону, мм.

Число ремонтных размеров определяют по следующим формулам:

- для валов

$$n_{\text{в}} = \Delta_d / \gamma,$$

- для отверстий

$$n_o = \Delta_D / \gamma \,, \qquad (5.15)$$

где $\Delta_d$ и $\Delta_D$ – соответственно допустимое уменьшение диаметра вала и увеличение диаметра отверстия, мм:

$$\Delta_d = d_н - d_{min};$$
$$\Delta_D = D_{max} - D_н, \qquad (5.16)$$

где $d_{min}$ – минимально допустимый диаметр вала, мм; $D_{max}$ – максимально допустимый диаметр отверстия, мм.

Для определения величины ремонтного размера при обработке восстанавливаемой детали можно использовать следующие зависимости:

- для наружной цилиндрической поверхности (вала)

$$d_Р \le d_и - \gamma, \qquad (5.17)$$

- для внутренней цилиндрической поверхности (отверстия)

$$D_р \ge D_и + \gamma, \qquad (5.18)$$

где $d_и$, $D_и$ – наибольший предельный размер вала и наименьший размер отверстия, мм. В частном случае, если деталь не подвергалась восстановлению («новая»), то $d_и = d_н$ , $D_и = D_н$ .

Таблица 5.7

**Коэффициент β неравномерности износа деталей**

| Деталь | Изнашиваемая поверхность | Коэффициент β |
|---|---|---|
| Коленчатый вал | Коренные и шатунные шейки | 0,75 |
| Гильза цилиндров | Отверстие гильзы | 0,60 |
| Картер коробки передач | Посадочные гнезда подшипников | 0,90 |

*Пример 12*

Определить ремонтный размер коренных шеек коленчатого вала двигателя автомобиля при следующих исходных данных: $d_и$ = 75,0 мм; β = 0,75; $U$ = 0,03 мм.

Припуск на шлифование шеек коленчатого вала при ремонте примем 0,05 мм [1, 5].

Ремонтный интервал

$$\gamma = 2 \cdot (0{,}75 \cdot 0{,}03 + 0{,}05) = 0{,}15 \text{ мм}.$$

Ремонтный размер

$$d_р \le d_и - \gamma \,;$$
$$d_р = 75{,}0 - 0{,}15 = 74{,}85 \text{ мм}.$$

Первый и второй категорийные ремонтные размеры коренных шеек коленвала двигателя составляют $74{,}95_{-0{,}02}$ и $74{,}7_{-0{,}02}$ мм соответственно. Первый размер превышает значение $d_Р$, поэтому обработать коленвал под этот регламентированный размер невозможно, следовательно, коленвал целесообразно обрабатывать под второй регламентированный ремонтный размер, равный $74{,}7_{-0{,}02}$ мм.

Толщину слоя металла, наносимого на поверхность восстанавливаемых деталей, рассчитывают по формуле:

$$t_{тр} \ge \Delta + Z_o \,,$$

где Δ – износ детали (односторонний), т. е. $U/2$, мм.

### 5.4.3. Постановка дополнительной детали

При ремонте постановкой дополнительной детали посадочный диаметр ($d_п$) сопрягаемых поверхностей ремонтируемой и дополнительной детали определяется:

- при ремонте наружной цилиндрической поверхности детали (вала)

$$d_п = d_ф - 2Z; \quad (5.19)$$

- при ремонте внутренней цилиндрической поверхности (отверстия)

$$d_п = D_ф + 2Z, \quad (5.20)$$

где $d_ф$ и $D_ф$ – фактические размеры вала и отверстия соответственно, мм; $Z$ – суммарный припуск (см. табл. П 4.3). Минимально допустимую толщину дополнительной ремонтной детали (втулки) определяют из условия прочности

$$\delta_1 = \frac{p n_з d_п}{2[\sigma]}, \quad (5.21)$$

где $p$ – давление в контакте поверхностей ремонтируемой и дополнительной детали, Па; $\delta_1$ – минимальная толщина дополнительной ремонтной детали (втулки), мм; [σ] – допускаемое напряжение для материала втулки, Па [4]:

$$n_з = \sigma_т / [\sigma], \quad (5.22)$$

где $\sigma_т$ – предел текучести материала втулки, Па [4].

Толщину втулки δ рассчитывают исходя из ее минимально допустимой толщины $\delta_1$ и величины припуска на обработку $z_o$:

$$\delta = \delta_1 + z_o . \quad (5.23)$$

Припуск на обработку поверхностей ремонтируемых деталей может быть назначен по справочным таблицам.

Значение $p$ определяется из уравнения

$$p = \frac{2M}{\pi \cdot d_п^2 \cdot l \cdot f}, \quad (5.24)$$

где $M$ – крутящий момент, стремящийся повернуть одну деталь относительно другой, Н·м; $l$ – длина контакта сопрягаемых поверхностей, м; $f$ – коэффициент трения при установившемся процессе распрессовки или проворачивания (табл. П5.2). Принимать $M = 40$ Н·м.

По полученным значениям $p$ определяется необходимое значение наименьшего расчетного натяга $N_{min}$ (мкм):

$$N_{min} = p d_п \left( \frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right), \quad (5.25)$$

где $N_{min}$ – расчетный натяг; $E_1$ и $E_2$ – модули упругости материалов соответственно охватываемой (вала) и охватывающей (отверстия) деталей, Па, (табл. П5.3); $C_1$ и $C_2$ – коэффициенты Ляме, определяемые по формулам

$$C_1 = \frac{d_n^2 + d_1^2}{d_n^2 - d_1^2} - \mu_1 ; \quad C_2 = \frac{d_2^2 + d_n^2}{d_2^2 - d_n^2} + \mu_2 , \quad (5.26)$$

где $\mu_1$ и $\mu_2$ коэффициенты Пуассона соответственно охватываемой (вала) и охватывающей (отверстия) деталей, (табл. П5.3).

Максимальное допустимое удельное давление $P_{max}$, при котором отсутствует пластическая деформация на контактных поверхностях деталей, определяется как наименьшее из двух значений

$$P_1 = 0{,}58\sigma_{T1}\left[1-\left(\frac{d_1}{d_п}\right)^2\right], \qquad P_2 = 0{,}58\sigma_{T2}\left[1-\left(\frac{d_п}{d_2}\right)^2\right], \tag{5.27}$$

где $\sigma_{т1}$ и $\sigma_{т2}$ – предел текучести материалов охватываемой и охватывающей деталей.

Наибольший расчетный натяг (мм):

$$N_{max} = P_{max} d_п \left(\frac{C_1}{E_1}+\frac{C_2}{E_2}\right). \tag{5.28}$$

При сборке соединения неровности контактных поверхностей деталей срезаются и сглаживаются; для компенсации этого действительный натяг соединения $N_д$ должен быть больше расчетного натяга $N$, вычисляемого по формуле (5.28). Зависимость между $N_д$ и $N_{max}$ определяется формулой

$$N_д = N_{max} + 1{,}2(Rz_1 + Rz_2), \tag{5.29}$$

где $Rz_1$ и $Rz_2$ – высоты неровностей профилей сопрягаемых поверхностей.

По величине $N_д$ подбирают соответствующую стандартную посадку, у которой для надежности соединения наименьший натяг $N_{min}$ должен быть равен $N_д$ или очень близок к нему [13]. Выбирается посадка из таблиц системы допусков и посадок при следующих условиях: $N_{max} \le [N_{max}]$ и $N_{min} > [N_{min}]$.

Необходимое усилие при запрессовке ($F$, Н) собираемых деталей рассчитывается по формуле

$$F = 10^{-6} \cdot f \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot p, \tag{5.30}$$

где $f$ – коэффициент трения при запрессовке (табл. П5.2); $d$ – диаметр контактируемых поверхностей; $l$ – длина запрессовки; $p$ – давление на поверхности контакта.

Коэффициенты трения при запрессовке зависят от материала сопрягаемых деталей, чистоты поверхностей контакта, величины $p_1$, наличия и характера смазки.

### 5.4.4. Правка

Детали, у которых во время эксплуатации появились остаточные деформации (изгиб, коробление), подлежат правке. Существует два способа правки: статическая правка и объемной чеканкой.

Статическая правка может производиться в холодном состоянии или с нагревом.

Для повышения качества холодной правки применяют в основном следующие способы.

1. Выдерживание детали под прессом в течение длительного времени из-за опасности обратного действия (при холодной правке возникают неуравновешенные внутренние напряжения, которые со временем уравновешиваясь, приводят к объемной деформации детали).

2. Двойная правка детали заключается в первоначальном перегибе детали с последующей правкой в обратную сторону.

3. Стабилизация правки детали последующей термообработкой.

Усилие холодной правки можно определить по формуле

$$P = 6{,}8\frac{\sigma_{\text{т}} d^3}{l} \qquad (5.3)$$

где $P$ – усилие холодной правки, Н; $\sigma_{\text{т}}$ – предел текучести материала выправляемой детали, Па; $d$ – диаметр выправляемой детали, мм; $l$ – расстояние между опорами или призмами правильного пресса, мм.

Горячая правка производится при необходимости больших деформаций детали. Нагрев 600 – 800 °С. После правки необходимо произвести термическую обработку детали.

Правка объемной чеканкой осуществляется с применением молотов. От наносимых ударов в поверхностном слое детали возникают местные напряжения сжатия, которые вызывают устойчивую деформацию.

# 6. ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

## 6.1. Особенности механической обработки восстановленных деталей

Механическая обработка деталей при ремонте является не только способом восстановления, как, например, при ремонте под ремонтный размер, но и необходимой стадией предварительной обработки для придания детали правильной геометрической формы, снятия дефектного слоя, специальной подготовки поверхности под нанесение различного рода покрытий, а также как окончательная стадия обработки восстанавливаемых деталей.

Механическая обработка ремонтных заготовок применяется для подготовки поверхностей под нанесение покрытий, обеспечения точности восстанавливаемых элементов, а также для упрочнения поверхностей. Эта обработка является основным средством достижения точности геометрических параметров деталей (их номинальных и ремонтных размеров, формы, взаимного расположения, шероховатости и волнистости поверхностей). На операции механической обработки приходится 40 – 60 % общей трудоемкости восстановления деталей.

Механическая обработка заготовок при восстановлении деталей отличается от изготовления деталей из отливок, проката или поковок. Это объясняется такими причинами: преднамеренным разрушением некоторых технологических баз в конце процесса восстановления деталей, износом или повреждением группы баз во время работы машины, деформацией деталей в эксплуатации; небольшими значениями толщины припусков, материал которых, как правило, отличается от материала основы различием в свойствах припусков при изготовлении и восстановлении деталей, требованием обеспечения необходимой точности взаимного расположения поверхностей, обрабатываемых при восстановлении, и поверхностей, обрабатываемых при изготовлении, а при восстановлении остающихся необработанными.

Механическая обработка восстановительно-упрочняющего покрытия включает следующие операции: черновые, чистовые и отделочные. Восстанавливаемые поверхности в зависимости от толщины и твердости сминаемого слоя проходят лезвийную и (или) абразивную обработку.

## 6.2. Базирование деталей

Механическая обработка в условиях ремонтного производства имеет ряд специфических особенностей – отсутствие или износ первичных технологических баз, нестабильность физико-механических свойств, например, твердости по поверхности восстанавливаемых деталей и припусков на обработку, значительная твердость и хрупкость большинства видов покрытий, широкая номенклатура обрабатываемых деталей.

Точность обработки деталей во многом зависит от правильного выбора установочных баз и применяемых приспособлений. При восстановлении деталей желательно использовать те же базы, что и при их изготовлении. Однако

ввиду их повреждения или уничтожения это условие выполнить нельзя. В этом случае установочные базы исправляют или выбирают новые. При выборе новых установочных баз необходимо исходить из условия обеспечения требований технических условий по точности, положению осей и поверхностей детали в узле, качеству обработки.

*Последовательность выполнения данного раздела:*

– изучить рабочий чертеж детали для выявления размеров, по которым в процессе обработки должна быть обеспечена требуемая чертежом точность;

– определить для каждого размера конструкторскую базу;

– разработать схему базирования детали, при которой конструкторская база выдерживаемого размера по возможности совмещалась бы с технологической базой;

– определить схему базирования на первой операции механической обработки (подготовка, или восстановление основных технологических баз) и на последующих операциях;

Выбор баз (технологической, конструкторской, измерительной) производится в соответствии с ГОСТ 3.1107-81 и 21495-76.

Выбор схем базирования и схем установки детали при восстановлении производится с использованием схем, приведенных в ГОСТ 21495-76 и 3.1107-81.

*При выборе баз руководствуются следующими положениями:*

– за технологические базы целесообразно принимать центровые отверстия валов, плоскости или (и) технологические отверстия в корпусных деталях, точные цилиндрические поверхности в дисках и втулках и т. п.;

– при восстановлении отдельных поверхностей за технологическую базу принимают основные или вспомогательные поверхности, которые сохранились и не подлежат восстановлению;

– если в процессе восстановления деталь должна быть обработана по всем основным и вспомогательным поверхностям, то за технологическую базу необходимо принять такую, от которой можно обрабатывать все основные и вспомогательные поверхности за одну установку. Если такой возможности нет, то технологической базой должна быть поверхность (или совокупность поверхностей), которая позволяет обработать с одной установки, в первую очередь, основные или вспомогательные поверхности;

– принятая технологическая база должна сохраняться на всех операциях технологического процесса, если это невозможно, то за следующую базу необходимо принимать обработанную поверхность детали, которая имеет точные размерные связи с поверхностью, обрабатываемой на последующих операциях;

– при выборе технологической базы необходимо помнить, что поверхность или совокупность поверхностей, принятых за технологические базы, должна лишить деталь минимально необходимого и в то же время достаточного числа степеней свободы. В соответствии с теорией базирования деталь должна быть лишена шести степеней свободы, в том числе и за счет обеспечения силового замыкания.

В зависимости от точности размеров на данной операции технологические базы могут быть сформированы одной, двумя или тремя поверхностями. Однако при этом нужно учитывать некоторые особенности процесса восстановления детали по сравнению с изготовлением. А именно: технологические базы деталей, установленные в процессе их изготовления, в большинстве своем сохраняются, и только в ряде случаев они бывают изношенными, или вовсе отсутствуют. При базировании деталей на изношенные поверхности погрешность базирования возрастает, что нередко не позволяет выдерживать требуемую точность обработки и относительного расположения поверхностей. Это может иметь место при всех встречающихся видах установки деталей при механической обработке. Заметим, что величина допустимого износа по техническим условиям на ремонт назначается исходя из условий возможности расширения той или иной посадки сопряжения. Базирование деталей на изношенную поверхность вызывает повышение погрешности базирования и снижение точности обработки.

Механическую обработку деталей необходимо начинать с исправления базовых поверхностей, а при использовании в качестве технологических баз рабочих поверхностей деталей следует использовать неизношенные участки.

При исправлении базовых поверхностей в качестве баз можно использовать другие базы, связанные с исправляемой базой точными размерами и техническими требованиями.

В качестве технологических баз могут быть приняты вспомогательные базы, например центровые отверстия коленчатых, распределительных и других валов, привалочные плоскости и установочные отверстия корпусных деталей и т. п.

Таким образом, выбор технологических баз, схем базирования и установки должен быть обоснован с точки зрения обеспечения минимальной погрешности установки и качества отремонтированной детали. Следует помнить, что погрешность установки складывается из погрешности базирования и погрешности закрепления.

Целесообразно рассмотреть несколько вариантов схем установки и принять те, которые отвечают требуемым техническим условиям. Выбор схемы установки детали при механической обработке выполняется в пояснительной записке и служит исходной информацией при формировании технологического маршрута восстановления детали и разработке технологических схем наладки оборудования.

### 6.3. Обработка наплавленных поверхностей

Поверхности деталей, восстановленные наплавкой, обладают по сечению неоднородными физико-механическими свойствами, химическим составом и микроструктурой. Механические свойства наплавленного слоя (прочность, твердость и др.) зачастую значительно выше, чем у материала самой детали. К особенностям наплавленных деталей также относятся микронеровности наплавки, неметаллические включения и пористость наружного слоя. Толщина

наносимого покрытия значительно больше величины износа. Так, для компенсации износа 0,2 – 0,5 мм наплавляют слой до 1,0 – 1,2 мм. Эти факторы оказывают значительное влияние на технологию и трудоемкость обработки резанием наплавленных на детали слоев.

Выбор вида обработки наплавленных поверхностей зависит от их твердости и хрупкости, припуска для удаления дефектного слоя, производительности процессов, требуемой точности. Предварительная обработка деталей после наплавки, как правило, выполняется резцами с пластинами из твердого сплава Т5К10 и Т15К6.

Для чернового точения поверхностей, наплавленных проволокой 30ХГСА, 65Г, электродом ЭН60М и другими проволоками, с твердостью 46 – 61,5 HRC, рекомендуется инструмент из мелкозернистых твердых сплавов ВК3М и ВК6М. Обязательным условием для черновой обработки является применение резцов с отрицательными передними углами, обеспечивающими повышенную прочность рабочей части резца при точении «по корке».

Для чистовой обработки наплавленных деталей с повышенной твердостью рекомендуется инструмент из эльбора-Р и гексанита-Р.

## 6.4. Обработка деталей с газотермическими покрытиями

Чтобы увеличить прочность сцепления газотермических покрытий с основным металлом, перед напылением проводят предварительную механическую обработку детали на токарных станках, которая заключается в нарезании рваной резьбы, кольцевых канавок, косой сетчатой накатки поверхности. Режим обработки и выбор материала инструмента зависят от материала и габаритов детали и от требуемой шероховатости поверхности.

Детали с напыленными покрытиями подвергают различным видам механической обработки – точению, шлифованию, сверлению, строганию, хонингованию, а также слесарной опиловке, шабровке, анодно-механической и элёктроискровой обработке. Механическая обработка металлических покрытий может осуществляться не только в результате съема материала, но и методами пластической деформации – обкаткой роликом, обработкой металлическими щетками, дробью и т. п. Однако своеобразие структуры напыленных покрытий, сложенных из отдельных частиц, обладающих пониженными когезионной прочностью и теплопроводностью и содержащих при напылении на воздухе включения оксидов и нитридов, требует выбора наиболее целесообразного вида инструмента и использования специальных режимов обработки.

## 6.5. Обработка синтетических материалов

Перед обработкой под номинальный размер, выполняемой после нанесения покрытия, для точного центрирования и базирования детали в станке необходимо проверить центровые отверстия и базы, удалить случайные наплывы пластмассы, не повредив металлическую основу. Нанесение покрытий всегда целесообразно выполнять таким образом, чтобы центровые отверстия остава-

лись совершенно чистыми. Если они находятся вблизи покрываемых поверхностей, то их следует прикрывать. С края поверхности, покрытой пластмассовым слоем, который при сборке должен соответствовать точной посадке детали, в процессе доводки до номинального размера (вала и отверстия) должна быть снята фаска 30 х 3 или 30 х 5 мм для предупреждения перекосов при сборке.

Режим обработки резанием термопластов (в том числе покрытий из полиамида) зависит от температуры плавления материала. Параметры заточки режущего инструмента и скорость резания отличаются от условий, характерных для металлов. Общее правило – режущий инструмент должен контактировать с обрабатываемым материалом на возможно меньшей поверхности и возможно меньшее время.

Величины припусков на механическую обработку одной и той же детали, восстановленной различными способами, могут значительно отличаться. При обработке поверхностей деталей, восстановленных хромированием, припуск на обработку составляет 0,05 - 0,07 мм на сторону. Наплавленная поверхность детали может иметь неровности, поры, раковины, окислы и шлаковые включения, поэтому припуски на обработку назначаются несколько большими, чем обычно: для деталей диаметром до 50 мм припуск принимают до 3 мм, а для деталей диаметром от 50 мм и более величина припуска составляет 3 ÷ 5 мм.

### 6.6. Обработка деталей с электрохимическими покрытиями

Детали с электрохимическими покрытиями подвергаются (при необходимости) только чистовой обработке.

# 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМ ВРЕМЕНИ

Нормирование труда это определение его необходимых затрат на изготовление единицы продукции в конкретных организационно технических условиях. Целью нормирования труда является наиболее точное определение необходимых затрат. ,

## 7.1. Наплавка

Норма времени при восстановлении деталей способом вибродуговой наплавки и наплавки под слоем флюса определяется из выражения

$$T_{\text{н}} = T_{\text{о}} + T_{\text{в}} + T_{\text{доп}} + \frac{T_{\text{пз}}}{n_{\text{шт}}}, \qquad (7.1)$$

где $T_{\text{о}}$ – основное время, мин; $T_{\text{в}}$ – вспомогательное время, мин; $T_{\text{доп}}$ – дополнительное время, мин; $T_{\text{пз}}$ – подготовительно-заключительное время, мин; $n_{\text{шт}}$ – количество деталей в партии, шт.

*Основное время* – это время, в течение которого происходит наращивание слоя металла заданной толщины на изношенные поверхности детали или его удаление в процессе механической обработки детали.

*Вспомогательное время* – это время выполнения комплекса подготовительных и заключительных (вспомогательных) переходов (операций).

Сумма основного и вспомогательного времени называется оперативным временем, т. е.

$$T_{\text{оп}} = T_{\text{о}} + T_{\text{в}}, \qquad (7.2)$$

*Дополнительное время* – это время обслуживания рабочего места. Оно затрачивается на подготовку сварочной проволоки, замену мундштуков, очистку наконечника и уход за станком, за рабочим местом и поддержание его в надлежащем состоянии в течение рабочей смены, на отдых, личные надобности и производственную гимнастику. Оно берется в процентах от оперативного времени и определяется по формуле

$$T_{\text{доп}} = \frac{T_{\text{оп}} \cdot K}{100}, \qquad (7.3)$$

где $K$ – отношение дополнительного времени к оперативному в процентах ($K = 0{,}1 \div 0{,}14$).

*Подготовительно-заключительное время* – это время, затрачиваемое на получение, ознакомление и сдачу работы, на подготовку оборудования и оснастки, на оформление документации на партию одноименных деталей.

Основное время подсчитывается по формуле, мин

$$T_{\text{о}} = \frac{\pi \cdot d \cdot L \cdot i}{1000 \cdot V_{\text{н}} \cdot S}, \qquad (7.4)$$

где $L$ – длина наплавляемой поверхности с учетом захода и выхода электрода, мм; $V_{\text{н}}$ – скорость наплавки, м/ч; $d$ – диаметр детали, мм; $i$ – число ходов; $S$ – шаг наплавки, мм/об.

Ориентировочные режимы вибродуговой наплавки приводятся в табл. 7.1, а наплавки под слоем флюса – в табл. 7.2.

Таблица 7.1

**Режимы вибродуговой наплавки**

| Толщина наплавляемого слоя, мм | Скорость подачи электрода м/мин | Сила тока, А | Скорость наплавки, м/мин | Шаг наплавки, мм/об | Припуск на механическую обработку на сторону, мм | Примечания |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,6 – 0,7 | 1,3 | 120 – 140 | 1,2 | 1,8 – 2,2 | 0,4 | Наплавка проволокой 1,6 – 1,8 мм |
| 1,5 | 1,7 | 160 – 190 | 1,0 | 2,3 – 2,8 | 0,8 | |
| 2,5 – 3,0 | 1,7 | 160 – 190 | 0,4 | 2,8 – 3,6 | 1 | |

Вспомогательное время включает в себя время на установку и снятие детали (табл. 7.3 и 7.4), и время на проход при наплавке.

Вспомогательное время на проход при наплавке обычно принимается равным 0,8 – 0,9 мин на проход для вибродуговой наплавки и 0.5 мин для наплавки под слоем флюса.

Таблица 7.2

**Режимы автоматической наплавки под слоем флюса**

| Диаметр наплавляемой детали, мм | Величина тока, А | Скорость наплавки, м/мин | Шаг наплавки, мм/об | Высота наплавляемого слоя, мм | Скорость подачи электродной проволоки, м/мин | Диаметр проволоки, мм |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 50 – 60 | 140 – 150 | 0,4 | 3 | 1,4 – 2,0 | 0,8 | 1,5 |
| 65 – 75 | 170 – 180 | 0,4 | 4 | 1,5 | 1,3 | 1,6 |
| 80 – 100 | 180 – 200 | 0,5 | 4 | 1,5 – 2,0 | 1,7 | 2,0 |
| 150 – 200 | 200 – 240 | 0,5 | 5 | 2,0 – 3,0 | 2,2 | 2,0 |
| 250 – 300 | 250 – 275 | 0,5 | 6 | 2,0 – 3,0 | 3,3 | 3,0 |

Таблица 7.3

**Вспомогательное время на установку и снятие детали (наплавка), мин**

| Вид наплавки | Масса наплавляемой детали, кг | Время на установку и снятие детали, мин | | |
|---|---|---|---|---|
| | | в трехкулачковом патроне | в центрах | в центрах с люнетом |
| Вибродуговая наплавка | До 10 | 1,0 | 0,5 | 1,0 |
| | свыше 10 | 1,5 | 1,0 | 1,5 |
| Наплавка под слоем флюса | 5 | 0,7 | 0,6 | – |
| | 10 | 1,0 | 0,8 | – |
| | 20 | 1,5 | 1,1 | – |
| | 30 | 2,0 | 1,4 | – |

Подготовительно-заключительное время затрачивается на получение наряда и инструктажа, установление и проверку режимов наплавки детали, на сдачу работы и уборку станка. Оно определяется по табл. 7.4.

Таблица 7.4

**Подготовительно-заключительное время (наплавка), мин**

| Элемент работы | Время, мин | | |
|---|---|---|---|
| | При простой работе | При работе средней сложности | При сложной работе |
| Получение производственного задания, указания, инструктажа | 5 | 7 | 10 |
| Ознакомление с работой | 3 | 5 | 7 |
| Подготовка приспособлений | – | 3 | 5 |
| Сдача работы | 2 | 2 | 2 |
| Итого: | 10 | 17 | 24 |

*Пример 13*

Определить $T_{шт.к}$ на операцию наплавки шатунной шейки коленчатого вала двигателя КамАЗ-740.

*Исходные данные*: материал коленчатого вала – сталь 42ХМФА; диаметр шейки $D = 80_{-0,013}$ мм; длина шейки $b = 67^{+0,12}$ мм.

Наплавку производят проволокой Нп-30ХГСА диаметром $d = 5$ мм под слоем флюса АН-348А. Партия деталей – 40 штук.

Площадь поперечного сечения шва $F = \pi \cdot r^2$, где $r = 2,5$ мм – радиус проволоки; $F = 19,6$ мм$^2$.

Длина наплавленного шва $L = \pi \cdot D \cdot n$, где $n$ – количество швов на шейке. $n = b / S$, где $S$ – шаг наплавки, мм, равный 2 – 6 диаметрам проволоки.

При $S = 2d = 10$ количество швов $n = 7$; $L = 1758,4$ мм.

При $\gamma = 7,8$ г/см$^3$ $k_п = 0,9$; $d_н = 12$ г/(А ·ч); $I = 180$ А; $k_с = 1$.

$$T_о = \frac{0,06 \cdot 19,6 \cdot 1758,4 \cdot 7,8 \cdot 0,9}{12 \cdot 180} = 6,72 \text{ мин.}$$

Вспомогательное время $T_в = 2,0$ мин [12], дополнительное время на обслуживание рабочего места $T_{обс}$, а также на отдых и личные потребности $T_{о.л}$:

$$T_д = 0,05 \cdot (T_о + T_в) = 0,05 \cdot (6,72 + 2,0) = 0,44 \text{ мин.}$$

Подготовительно заключительное время $T_{пз} = 20$ мин.

Штучно-калькуляционное время на наплавку одной шатунной шейки

$$T_{шт.к} = T_{оп} + T_д + \frac{T_{пз}}{n_п};$$

$$T_{шт.к} = 6,72 + 2,0 + 0,44 + 20/40 = 9,66 \text{ мин.}$$

## 7.2. Электрохимические покрытия

Норму времени при нанесении электрохимических покрытий определяют по формуле

$$T_н = \frac{(T_о + T_i) \cdot k_{пз}}{n_д \cdot \eta_в}, \qquad (7.5)$$

где $T_о$ – продолжительность осаждения покрытия, ч; $T_i$ – время на загрузку и выгрузку деталей из ванны, принимают равным 0,1 ÷ 0,2 ч; $k_{пз}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное и подготовительно- заключительное время, при односменной работе принимают равным 1,1 ÷1,2; при двухсменной – 1,03 ÷ 1,05; $n_д$ – число деталей, одновременно наращиваемых в ванне, шт.; $\eta_в$ – коэффициент использования ванны ($\eta_в$ = 0,8 ÷ 0,95).

Продолжительность осаждения покрытия определяют по формуле

$$T_о = \frac{1000 \cdot h \cdot \gamma}{c \cdot I \cdot S \cdot \eta}, \qquad (7.6)$$

где $h$ – толщина наращиваемого слоя на сторону, мм; $\gamma$ – плотность осаждаемого металла (для хромирования – 6,9, осталивании – 7,8 г/ см$^3$); $c$ – электрохимический эквивалент осаждаемого металла (см. табл. 5.4); $S$ – площадь хромирования, дм$^2$; $I$ – сила тока, А; $\eta$ – выход металла по току (см. табл. 5.4).

### 7.3. Механическая обработка

Расчет норм времени при механической обработке приведен в работе [12].

## 8. ОФОРМЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

### 8.1. Оформление технологической документации

В комплект технологической документации на восстановление детали входят: ремонтный чертеж, маршрутная карта ремонта (МК), операционная карты (ОК), карты эскизов (КЭ). Примеры оформления операционных и эскизных карт приведены в работе [12].

Пример оформления маршрутной карты ремонта приведен в прил. 8

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Восстановление деталей машин*: Справочник / Ф. И. Пантелеенко, В. П. Лялякин, В. П. Иванов и др. М.: Машиностроение, 2003. 672 с.
2. *Воробьев Л. Н.* Технология машиностроения и ремонт машин.- М.: Высшая школа, 1981. 344 с.
3. *Иванов В. П.* Технология и оборудование восстановления деталей машин: Учебник. М.: Техноперспектива, 2007. 458 с.
4. *Краткий справочник металлиста* / под общ. ред. А. Е. Древаля, Е. А.Скороходова. -4-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2005. 960 с.
5. *Молодык Н. В., Зенкин А. С.* Восстановление деталей машин. Справочник. - М.: Машиностроение, 1989. 480 с.
6. С*олод Г. И., Морозов В. И., Русихин В. И.* Технология машиностроения и ремонт горных машин: учебник для вузов. М.: Недра. 1988. 421с.
7. *Хазин М. Л.* Теория и методы восстановления деталей горных машин: Учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2005. 308 с.
8. *Обработка металлов резанием*. Справочник технолога / под ред. Панова А. А. М.: Машиностроение, 2004. 784 с.
9. *Общемашиностроительные нормативы времени*: вспомогательного, на обслуживание рабочего места и подготовительно-заключительного для технического нормирования станочных работ. М.: Машиностроение, 1974. 345 с.
10. *Справочник технолога-машиностроителя*. Т. 1 и 2 /под. ред. Косиловой А. Г. М.: Машиностроение, 2001.
11. *Глинникова Т. П., Волегов С. А.* Справочно-методическое пособие по оформлению технологической части ВКРБ, ВКРИ и курсового проекта для студентов направления 150400 «Технологические машины и оборудование». Екатеринбург: УГГУ, 2008. 75 с.
12. *Глинникова Т. П., Волегов С. А.* Технология машиностроения. Технологическая часть ВКРИ: пособие по выполнению технологической части ВКР инженера для студентов специальности 130602 «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов» (МНГ) направления 130600 «Оборудование и агрегаты нефтегазового производства» очного и заочного Екатеринбург: УГГУ, 2010. 80 с.
13. *Рябов В. Ю., Новикова Н. А.* Методическое руководство для самостоятельной работы студентов специальности 150402 ГМО по дисциплине «Метрология, стандартизация и сертификация». Екатеринбург: изд-во УГГУ, 2006. 36 с.

Приложение 1

## ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

Министерство образования и науки РФ
ФБГОУ ВПО
«Уральский государственный горный университет»

# КУРСОВАЯ РАБОТА

по дисциплине
Теория и технологические методы восстановления
и повышения износостойкости деталей машин

*на тему*

«РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ _____ »
наименование детали

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Вариант задания № _____

Студент _____
Ф. И. О

Группа _____
номер группы

Преподаватель _____
Ф. И. О

Екатеринбург – 2015

Приложение 2

## ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ПЕРВОГО ЛИСТА ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

СОДЕРЖАНИЕ


1. Анализ технического состояния детали
2. Анализ дефектов и оценка пригодности детали
2.1. Дефект №1
2.2. Дефект №2
2.3. Дефект №3
3. Выбор рациональных способов восстановления детали
3.1. Выбор по технологическому критерию
3.2. Выбор по техннческому критерию
3.3. Выбор по техннико-экономическому критерию
3.4. Окончательный выбор способа восстановления детали
4. Разработка технологического маршрута восстановления детали
5. Расчет припусков
6. Выбор оборудования, приспособлений, инструмента
6.1. Выбор оборудования
6.2. Выбор приспособлений
6.3. Выбор инструмента
7. Расчет режимов обработки
7.1. Предварительная механическая обработка
7.2. Электрохимическое хромирование
7.3. Механическая обработка
8. Нормирование операций
8.1. Токарная обработка
8.2. Наплавочная
8.3. Токарная обработка
8.4. Фрезерная обработка
9. Технологическая документация
10. Литература


| | | | | | КР МШС-12 025 ПЗ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | | | |
| Разработал | | Пупкин В.М. | | | Разработка технологического процесса восстановления вала | Лит. | Лист 2 | Листов 36 |
| Руководитель | | Зверев Р.Г. | | | | | | |
| Консультант | | Волков А.С. | | | | УГГУ группа МШС –12 | | |
| Н. Контр. | | Крокодилов П.В. | | | | | | |
| Утвердил | | Боярских Г.А. | | | | | | |

Приложение 3

## ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ПОСЛЕДУЮЩИЙ ЛИСТОВ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

### 1. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛИ

Заданная деталь представляет собой вал-шестерню.

Приложение 4

# ХАРАКТЕРИСТИКИ СПОСОБОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Таблица П4.1

## СПОСОБЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

| Способ восстановления | Область применения |
|---|---|
| *Сварка:* | |
| – ручная дуговая | Заварка трещин, приварка накладок, вставок, заплат, наплавка износостойких материалов. |
| – автоматическая и механизированная дуговая | Заварка трещин, приварка накладок, вставок, заплат, сварка тонколистового материала. |
| – аргонодуговая | Сварка и наплавка алюминия и коррозионностойкой стали. |
| – газовая | Заварка трещин, приварка накладок, сварка тонколистового материала. |
| – ультразвуковая | Сварка цветных металлов, стали, негабаритных деталей |
| *Наплавка:* | |
| – электродуговая под флюсом | Наплавка деталей диаметром более 50 мм при повышенных требованиях к качеству наплавленного материала с толщиной наплавленного слоя более 1 мм |
| – электродуговая в углекислом газе | Наплавка стальных деталей диаметром более 16 мм широкой номенклатуры, работающих в различных условиях |
| – вибродуговая | Наплавка стальных деталей, работающих в различных условиях при невысоких требованиях к сопротивлению усталости |
| – электродуговая порошковой проволокой или лентой | Наплавка износостойких слоев на деталях, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания, ударных нагрузок, в узлах трения |
| – плазменная | Наплавка ответственных деталей при повышенных требованиях к износостойкости и сопротивлению усталости |
| – контактная | Наплавка гладких цилиндрических наружных и внутренних поверхностей с износами не более 1 мм |
| – газовая | Наплавка цилиндрических и профильных поверхностей с местным износом и повышенных требованиях к износостойкости |
| – аргонодуговая | Наплавка алюминиевых деталей и деталей из коррозионно-стойкой стали |
| – электроискровая | Наращивание и упрочнение поверхностей с износом до 0,2 мм при невысоких требованиях к сплошности покрытия |
| – высокочастотная | Наплавка износостойких материалов на рабочие органы и лезвия |

*Продолжение таблицы П4.1*

| Способ восстановления | Область применения |
|---|---|
| *Нанесение газотермических покрытий:* | |
| – пламенное порошковыми материалами без оплавления (на ацетилене или пропан-бутане) | Наружные и внутренние цилиндрические поверхности неподвижных сопряжений при невысоких требованиях к прочности сцепления с основным материалом |
| – плазменное порошковыми материалами и проволокой | Наружные и внутренние цилиндрические поверхности |
| – ионно- плазменное | Нанесение износостойких и защитных покрытий толщиной до 0,02 мм |
| – детонационное | Нанесение износостойких покрытий с особыми свойствами |
| – электродуговое и высокочастотное | Наружные и внутренние цилиндрические поверхности с невысокими требованиями к прочности сцепления |
| *Холодное пластическое деформирование:* | |
| – раздача | Восстановление наружных поверхностей полых деталей с нежесткими требованиями к внутреннему размеру |
| – вытяжка | Восстановление длины деталей с нежесткими требованиями к наружным размерам |
| – дорнование и калибровка | Восстановление поверхностей в отверстии после осадки или термического воздействия. Упрочнение и выглаживание |
| – правка | Восстановление формы |
| – накатка | Восстановление поверхности неответственных деталей, восстановление рифленой и шлицевой поверхностей |
| – осадка | Восстановление наружных и внутренних поверхностей деталей при нежестких требованиях к длине |
| – обжим | Восстановление внутренних поверхностей деталей при нежестких требованиях к размерам наружных поверхностей |
| *Горячее пластическое деформирование* | |
| – давление в закрытом штампе | Восстановление формы и элементов деталей за счет перераспределения металла из нерабочих поверхностей на рабочие для компенсации износа |
| – накатка | Восстановление зубчатых профилей шестерен и звездочек |
| – ротационное деформирование | Восстановление зубчатых и шлицевых поверхностей. |
| – обжим | Восстановление внутренних размеров деталей при нежестких требованиях к наружным |
| – правка | Восстановление формы |
| – вытяжка | Восстановление длины деталей с нежесткими требованиями к наружным размерам |
| – осадка | Восстановление наружных и внутренних рабочих поверхностей |

*Продолжение таблицы П4.1*

| Способ восстановления | Область применения |
|---|---|
| *Электрохимические процессы:* | |
| – осталивание | Восстановление наружных и внутренних поверхностей деталей преимущественно с износом, не превышающим 0,2–0,5 мм, высокой поверхностной твердостью и при нежестких требованиях к прочности сцепления покрытия с основным металлом |
| – хромирование | Восстановление наружных и внутренних поверхностей деталей с износом, не превышающим 0,2 мм, и высокими требованиями по износостойкости восстановленных поверхностей |
| – никелирование | Восстановление наружных и внутренних поверхностей деталей с износом, не превышающим 0,05 мм |
| – цинкование | Защитное покрытие от коррозии. |
| – меднение | Восстановление наружных и внутренних поверхностей деталей из меди и ее сплавов |
| – кадмирование | Защитные антикоррозионные покрытия |
| *Нанесение полимерных материалов:* | |
| – напылением, намазыванием | Восстановление посадочных поверхностей неподвижных сопряжений, заделка трещин, пробоин. |
| – литьем:<br>под давлением, опрессовкой | Восстановление антифрикционных, электроизоляционных и декоративных покрытий, изготовление деталей |
| – намазыванием жидких прокладок, герметиков | Восстановление герметичности соединений |
| *Обработка под ремонтный размер* | |
| – категорийный | Обработка детали под заданный ремонтный размер сопрягаемой детали с ремонтными стандартными размерами |
| – индивидуальный | Восстановление формы и посадок поверхностей обработкой более дорогостоящей детали, подгонка менее дефицитной и дорогой детали по размерам основной с обеспечением заданной посадки |
| *Постановка дополнительных деталей:* | |
| – обрезка и приварка быстроизнашивающихся элементов | Восстановление рабочих органов строительных и горных машин |
| – бандажирование | Восстановление наружных поверхностей деталей с предварительной механической обработкой и без нее |
| – постановка втулок и компенсационных шайб | Восстановление отверстий, размерных цепей |
| – постановка свертных колец с закрепляющим раскатыванием | Восстановление отверстий |
| – постановка фигурных вставок и стяжек | Устранение трещин, восстановление герметичности |
| – приварка и приклеивание накладок и заплат | Устранение трещин, пробоин, восстановление герметичности |

*Окончание таблицы П4.1*

| Способ восстановления | Область применения |
|---|---|
| *Электромеханическая обработка:* | |
| – высаживание и выглаживание | Восстановление поверхностей с износом до 0,2 мм у неподвижных сопряжений |
| *Электрофизическая обработка* | |
| – электроконтактная электроабразивная, анодномеханическая, | Обработка наплавленных поверхностей с высокой твердостью, удаление остатков обломанных инструментов |
| *Электрохимическая обработка.* | |
| – инструментом с подачей электролита | Обработка наплавленных поверхностей с высокой твердостью. |

Таблица П4.2

**Способы ремонта, применяемые при устранении некоторых типовых дефектов деталей**

| Вид дефекта | Рекомендуемые способы ремонта |
|---|---|
| Нарушение формы поверхностей или требований к их взаимному расположению | Холодная или горячая правка<br>Механическая обработка |
| Износ шпоночного паза | Обработка под ремонтный размер<br>Заделка изношенного паза, фрезерование нового паза под углом в 90° или 120° к изношенному |
| Износ шлицев | Пластическое деформирование<br>Заваривание изношенных шлицев, фрезерование (протягивание) новых шлицев номинального размера |
| Срыв более двух ниток, износ, смятие резьбы (наружной и внутренней) | Заваривание резьбы, нарезание резьбы номинального размера<br>Нарезание резьбы ремонтного размера<br>Постановка дополнительной детали |
| Нарушение защитного покрытия | Цинкование, кадмирование, оксидирование, фосфатирование, хромирование |
| Трещины | Разделка и заварка |
| Усталостные трещины (выкрашивание) | Деталь бракуется |

Таблица П4.3

## Технологические характеристики способов восстановления

| Способ восстановления | Толщина слоя, мм | | Суммарный припуск, $Z$, мм | Минимальный наружный диаметр поверхности, мм | Минимальный внутренний диаметр поверхности, мм | Снижение усталостной прочности, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | наименьшая | наибольшая | | | | |
| *Наплавка:* | | | | | | |
| – ручная электродуговая | 1 | 5 | 2 | 10 | 40 | 30 |
| – в среде углекислого газа | 0,5 | 3 | 2 | 15 | – | 15 |
| – в среде водяного пара | 1 | 3 | 2 | 15 | – | 15 |
| – под слоем флюса | 1,5 | 3 | 2 | 35 | – | 15 |
| – вибродуговая | 0,5 | 2 | 1 | 15 | 50 | 50 |
| – плазменная | 0,2 | 6,5 | 1 | | | |
| – контактная наплавка | 0,3 | 1,5 | 1 | 5 | – | 15 |
| *Электрохимическое наращивание:* | | | | | | |
| – хромирование | 0,05 | 0,3 | 0,1 | 5 | 40 | 20 |
| – осталивание | 0,1 | 3 | 0,1 | 12 | 40 | 25 |
| *Электромеханическое выглаживание* | 0,2 | | 0,1 | | | |
| *Пластическое деформирование* | 0,5 | 2 | 0,2 | | | |
| *Постановка дополнительной детали* | 1 | 5 | 0,2 | | | |
| *Напыление:* | | | | | | |
| – дуговая металлизация | 0,3 | 3 | 2 | 30 | – | 12 |
| – электрометаллизация | | | | 30 | 100 | 45 |
| – газопламенное напыление | 0,3 | 1,5 | 2 | 30 | – | 45 |
| – плазменное | 0,3 | 3 | | | | |

Таблица П4.4

## Коэффициенты износостойкости, выносливости, сцепляемости

| Способы восстановления | Значения коэффициентов | | |
|---|---|---|---|
| | износостойкости, $K_и$ | выносливости, $K_в$, | сцепляемости, $K_{сц}$ |
| Ручная электродуговая наплавка | 0,9 | 0,8 | 0,8 |
| Электродуговая наплавка в углекислом газе | 0,85 | 0,9÷1,0 | 1,0 |
| Вибродуговая наплавка | 0,85 | 0,62 | 1,0 |
| Электродуговая наплавка под слоем флюса | 0,90 | 0,82 | 1,0 |
| Газовая наплавка | 0,7 | 0,7 | 1,0 |
| Плазменная наплавка | 1,0 | 0,7 | 0,4 |
| Дуговая металлизация | 1,0÷1,3 | 0,6÷1,1 | 0,2÷0,3 |
| Газопламенное напыление | 1,0÷1,3 | 0,6÷0,1 | 0,3÷0,4 |
| Плазменное напыление | 1,0÷1,5 | 0,7÷1,3 | 0,4÷0,5 |
| Хромирование (электрохимическое) | 1,0÷1,3 | 0,7...1,3 | 0,4÷0,5 |
| Осталивание (электрохимическое) | 0,9÷1,2 | 0,8 | 0,65÷0,8 |
| Контактная наплавка (приварка металлического слоя) | 0,9÷1,1 | 0,8 | 0,8÷0,9 |
| Ручная наплавка | 0,9 | 0,8 | 1,0 |
| Клеевые композиции | 1,0 | – | 0,7 |
| Электромеханическая обработка (высадка и сглаживание) | До 3,00 | 0,8 | 1,0 |
| Обработка под ремонтный размер | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Установка дополнительной детали | 1,0 | 0,8 | 1,0 |
| Пластическое деформирование | 0,8-1,0 | 1,0 | 1,0 |

Таблица П4.5

**Удельная себестоимость восстановления изношенных поверхностей деталей различными способами**

| Способы восстановления | Удельная себестоимость восстановления, руб/дм$^2$ | Способы восстановления | Удельная себестоимость восстановления, руб/дм$^2$ |
|---|---|---|---|
| Наплавка | | Металлизация (напыление) | |
| – ручная электродуговая | 97 | – дуговая металлизация | 71 |
| – электродуговая в углекислом газе | 45 | – газопламенная | 46 |
| – электродуговая в водяном паре | 44 | – плазменная | 44 |
| – вибродуговая | 68 | Обработка под ремонтный размер | 12 |
| – электродуговая под слоем флюса | 47 | Электромеханическая обработка (высадка и сглаживание) | 58 |
| – контактная (приварка металлического слоя) | 40 | Установка дополнительной детали | 34 |
| – электроискровая | 28 | Электрохимическое осаждение | |
| – плазменная | | хромирование | 68 |
| – газовая | 77 | осталивание | 30 |
| Пластическое деформирование | 38 | Клеевые композиции | 22 |

Таблица П4.6

**Припуск на механическую обработку после нанесения покрытий**

| Способ получения покрытия | Припуск на сторону, мм |
|---|---|
| Ручная дуговая наплавка | 1,4 – 1,7 |
| Дуговая наплавка под слоем флюса | 0, 8 – 1,1 |
| Наплавка в среде углекислого газа. | 0,6 – 0,8 |
| Электроконтактная наплавка | 0,8 – 1,0 |
| Вибродуговая наплавка | 0,6 – 0,8 |
| Плазменная наплавка | 0,4 – 0, 6 |
| Контактная наварка | 0,2 – 0,5 |
| Газотермическое напыление | 0,2 – 0,5 |
| Осталивание | 0,1 – 0,2 |
| Хромирование | 0,05 – 0,1 |

Таблица П4.7

**Припуски на снятие цементированного слоя**

| Глубина цементированного слоя, мм | Размеры, мм | Припуск, мм | |
|---|---|---|---|
| | | на диаметр для цилиндрических наружных и внутренних поверхностей | на сторону для плоских (в том числе торцевых) поверхностей |
| 0,46 – 0,6 | До 30 | 1,5 | 1,0 |
| | 30 – 80 | 1,7 | 1,1 |
| | 80 – 180 | 2,0 | 1,2 |
| 0,6 – 0,8 | До 30 | 2,0 | 1,0 |
| | 30 – 180 | 2,2 | 1,2 |
| | 180 – 260 | 2,5 | 1,5 |
| 0,8 – 1,1 | До 30 | 2,5 | 1,5 |
| | 30 – 120 | 2,7 | 1,7 |
| | 120 – 500 | 3,0 | 2,0 |
| 1,1 – 1,4 | До 30 | 3,2 | 1,8 |
| | 30 – 120 | 3,5 | 2,0 |
| | 120 – 500 | 4,0 | 2,3 |

Приложение 5

# СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Таблица П5.1

**Материал режущего инструмента**

| Способ обработки | Материал детали | Материал инструмента |
|---|---|---|
| Наружное продольное и поперечное точение проходными резцами с углом φ = 45, 60 и 90°; подрезными резцами; растачивание отверстий расточными резцами с углом φ = 45, 60 и 90°: | | |
| – черновое | Сталь | Т5К10 |
| – получистовое и чистовое | Сталь<br>Сталь < 49 HRC<br>Сталь > 50 HRC | Т30К4,Т15К6<br>Т14К8, Т30К4, Т15К4, ВК6<br>ВК4, ВК6, ВК9 |
| – черновое | Серый чугун | ВК6, ВК8 |
| – чистовое | Серый чугун | ВК2, ВК3 |
| – черновое и чистовое | Ковкий чугун<br>Цветные металлы | ВК8<br>ВК6 |
| Подрезка канавок отрезными резцами | Сталь<br>Чугун | Т15К6, Т5К10 ВК6,<br>ВК8 |
| Нарезание резьбы резьбовыми резцами | Сталь<br>Чугун | Т30К4, Т15К6, Т14К3<br>ВК6, ВК8, ВК2, ВК3, ВК4 |
| Сверление, рассверливание, зенкерование и развертывание | Сталь, чугун<br>Алюминиевые сплавы | Р18<br>Р18 |
| Фрезерование торцевыми фрезами | Сталь<br>Чугун<br>Алюминиевые сплавы | Т3К10,Т15К6, Т14К8<br>ВК8, ВК6<br>Р18 |
| Фрезерование цилиндрическими, дисковыми, прорезными фрезами | Сталь, чугун | Р18 |
| | Алюминиевые сплавы | Р18 |

Таблица П5.2

**Коэффициенты трения для материалов**

| Материал сопрягаемых деталей | Коэффициент трения |
|---|---|
| Сталь – сталь | 0,06 – 0,13 |
| Сталь – чугун | 0,07 – 0,12 |
| Сталь – латунь | 0,05 – 0,1 |
| Сталь пластмассы | 0,15 – 0,25 |

Таблица П5.3

**Модули упругости и коэффициенты Пуассона для некоторых материалов**

| Материал | Модуль упругости, $E \cdot 10^9$, Па | Коэффициент Пуассона | Материал | Модуль упругости, $E \cdot 10^9$, Па | Коэффициент Пуассона |
|---|---|---|---|---|---|
| Сталь углеродистая | 2,0 – 2,1 | 0,26 | Бронза фосфористая | 1,15 | 0,33 |
| Сталь легированная | 2,1 – 2,2 | 0,28 | Бронза марганцевая | 1,10 | 0,35 |
| Чугун белый, серый | 1,15 – 1,60 | 0,25 | Бронза алюминиевая | 1,05 | 0,34 |

## Приложение 6

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Таблица П6.1

**Характеристики наплавочных станков для дуговой наплавки**

| Параметр | В защитных газах У – 651 | Под слоем флюса У – 652 |
|---|---|---|
| *Размеры наплавляемого изделия, мм:* | | |
| – диаметр | 20 – 500 | 40 – 150 |
| – длина | 1300 | 1200 |
| *Диаметр электродной проволоки, мм:* | | |
| – сплошной | 1,6 – 3,5 | 1,6 – 2,5 |
| – порошковой | 2,0 – 3,0 | – |
| *Скорость подачи электродной проволоки, м/ч* | 50 – 500 | 50 – 500 |
| *Скорость линейного перемещения сварочной головки, м/ч* | 0,5 – 150,0 | 0,5 – 150,0 |
| *Частота вращения шпинделя, мин$^{-1}$* | 0,025 – 8,7 | 0,03 – 10,4 |

Таблица П6.2

**Характеристики установок «Ремдеталь» для электродугового напыления**

| Показатель | УД – 609.01 детали типа "вал" | УД – 609.10 плоские детали |
|---|---|---|
| Производительность, кг/ч | До 10 | 18,8 (сталь)<br>12 (алюминий)<br>40 (цинк) |
| Рабочее напряжение, В | 24–36 | 17–40 |
| Сварочный ток, А | 240–310 | 50–400 |
| Частота вращения детали, об/мин | 80 | – |
| Диаметр применяемых проволок, мм | 1,6–2,0 | 1,5–2,0 |
| Расход сжатого воздуха, м$^3$/ч | 120 | До 150 |
| Рабочее давление сжатого воздуха, МПа | 0,5–0,6 | 0,3–0,6 |
| Максимальная толщина покрытия, мм | 5 | – |
| Максимальные размеры восстанавливаемых деталей, мм: | | |
| Длина | 2500 | 600 |
| Диаметр (ширина) | 400 | 450 |
| Занимаемая площадь, м$^2$ | 9 | 6 |
| Габаритные размеры, мм | 2620x760x1600 | 1420x760x1600 |
| Масса комплекта, кг | 700 | 600 |

Таблица П6.3

**Характеристики гальванических установок**

| Установка | Вместимость ванны, л | Производительность, $дм^2/ч$ | Род тока | Ток, А | Мощность, кВт | Габаритные размеры, мм | Масса, кг | Назначение |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0013-040 Ремдеталь | 160 | 20 ($h$ = 0,2)* | асимметричный, постоянный | 200 | 42** | 1035х 1725х 3230 | 950 | осталивание |
| 0013-024 Ремдеталь | 560 | 17 | то же | 630 | 12** | 1180х 2146х 4305 | 1250 | осталивание |
| 0013-022 Ремдеталь | 390 | 20 ($h$ = 0,25)* | постоянный | 50 $А/дм^2$ | 42** | 9750х 4000х 3500 | 5500 | осталивание |
| 0013-031 Ремдеталь | 600 | – | ассиметричный, постоянный | 630 | 15** | 1560х 2500х 1940 | 956 | холодное осталивание |
| 0013-035 Ремдеталь | 200 | 8 ($h$ = 0,05)* | То же | 400 | 16,8** | 4800х 1400х 2500 | 1370 | хромирование |

Примечания.
* – В скобках дана толщина покрытия, при которой достигается указанная производительность.
** – Мощность источника питания без учета мощности нагревателей.

Приложение 7

# РЕЖИМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Таблица П 7.1

**Зависимость тока при наплавке под флюсом и в среде защитных газов от диаметра детали**

| Диаметр детали, мм | Сила тока, А при диаметре электродной проволоки, мм | |
|---|---|---|
| | 1,2 – 1,6 | 2 – 2,5 |
| 50 – 60 | 120 – 140 | 140 – 160 |
| 65 – 75 | 150 – 170 | 180 – 220 |
| 80 – 100 | 180 – 200 | 230 – 280 |
| 150 – 200 | 230 – 250 | 300 – 350 |
| 250 – 300 | 270 – 300 | 350 – 380 |

Таблица П7.2

**Режимы токарной обработки восстанавливаемых деталей**

| Способ восстановления | Вид обработки | Материал инструмента | Режимы резания | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Скорость резания, *V*, м/мин | Подача, *S*, мм/об | Глубина обработки, *t*, мм |
| Наплавка | Черновая | Т15К6, Т14К8, ВК6, ВК8 | 46,0<br>27,5 | 0,2<br>0,3 | 1,0<br>2,0 |
| | Чистовая | Т15К6, Т14К8, ВК3, ВК6, ВК8 | 138<br>104 | 0,15<br>0,20 | 0,25<br>0,50 |
| Газотермическое напыление порошковых материалов | Черновая | Т15К6, Т14К8, ВК6, ВК8 | 20 | 0,30 | 0,50 |
| | Чистовая | Т15К6, Т14К8, ВК6, ВК8 | 40 | 0,15 | 0,20 |
| Осталивание | Черновая | Т15К6, ВК6, ВК8, Т30К4 | 30 | 0,50 | 2,00 |
| | Чистовая | Т15К6, ВК6, ВК8, Т30К4 | 60 | 0,12 | 0,20 |

Таблица П7.3

**Режимы шлифования восстанавливаемых деталей**

| Способ восстановления | Вид обработки | Характеристика шлифовального круга | Режимы обработки | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $v_к$, м/с | $v_д$, м/мин | $S_{пр}$, м/мин | $t$, мм |
| Наплавка | Черновая | Нормальный электрокорунд, зернистость 40-50, твердость СТ-СТ1, связка керамическая | 25 – 30 | 10 – 15 | 0,7 – 1,2 | 0,01 – 0,05 |
| | Чистовая | Белый электрокорунд, зернистость 25-40, твердость СМ2-СМ1, связка керамическая | 30 – 32 | 12 – 15 | 0,4 – 0,7 | 0,008 – 0,01 |
| Газотермическое напыление порошковых материалов | Черновая | Нормальный электрокорунд, зернистость 46-60, твердость СМ2-СМ1, связка керамическая | 10 – 30 | 6 – 15 | 0,5 – 0,7 | 0,01 – 0,03 |
| | Чистовая | То же | 20 – 30 | 3 – 6 | 0,3 – 0,5 | 0,008 – 0,01 |
| Контактная наварка металлической ленты | Чистовая | Белый электрокорунд, зернистость 25-40, твердость СМ2-СМ1, связка керамическая | 30 – 40 | 25 – 30 | 0,2 – 0,3 | 0,008 – 0,01 |
| Осталивание | Чистовая | Синтетический алмаз АСП10К6, АСП15К8, АСП25К6-50, АСП30К6-50 | 25 – 35 | 20 – 25 | 1,0 – 1,5 | 0,01 – 0,02 |
| Хромирование | Чистовая | Нормальный электрокорунд, зернистость 40-50, твердость С1-С2, связка керамическая | 30 – 40 | 15 – 20 | 1,0 – 1,5 | 0,008 – 0,01 |

Таблица П7.4

**Средняя точность и параметр шероховатости обработанных наружных поверхностей тел вращения**

| Способ обработки | Квалитет | Параметр шероховатости | |
|---|---|---|---|
| | | *Ra*, мкм | *Rz*, мкм |
| Обтачивание | | | |
| – однократное | 12 | 6,3 | 30 |
| – черновое + обтачивание чистовое | 11 – 10 | 3,2 | 15 |
| – однократное + шлифование однократное | 10 – 8 | 1,6 – 0,63 | 8,0 – 3,2 |
| – обтачивание чистовое + шлифование однократное | 8 – 6 | 0,63 | 3,2 |
| – однократное + шлифование черновое + шлифование чистовое | 7 – 6 | 0,4 | 1,8 |
| – черновое + обтачивание чистовое + шлифование черновое + шлифование чистовое | 6 | 0,4 | 1,8 |
| – черновое + обтачивание чистовое + шлифование чистовое + шлифование тонкое | 5 | 0,2 – 0,1 | 0,9 – 0,5 |
| Растачивание | 12 | 12,5 – 3,2 | 50 – 15 |
| Сверление | 12 | 25,0 – 12,5 | 100 – 50 |
| Сверление + зенкерование | 11 | 6,3 – 3,2 | 30 – 15 |
| Сверление + развертывание | 9 – 8 | 3,2 – 1,6 | 30 – 8,0 |
| Сверление + протягивание | 9 – 8 | 3,2 – 0,4 | 30 – 1,8 |
| Рассверливание | 12 | 25,0 – 6,3 | 100 – 3,2 |
| Зенкерование | 12 | 12,5 – 3,2 | 50 – 15 |
| Фрезерование цилиндрическими и торцевыми фрезами | | | |
| – черновое | 14 – 11 | 12,5 – 3,2 | 50 – 15 |
| – получистовое и однократное | 12 – 11 | 3,2 – 1,6 | 30 – 8,0 |
| – чистовое | 10 | 1,6 – 0,63 | 8,0 – 3,2 |
| Шлифование | | | |
| – однократное | 8-7 | 1,6 – 0,4 | 8,0 – 1,8 |
| – черновое | 9-8 | 0,63 – 0,4 | 3,2 – 1,8 |
| – чистовое | 7 | 0,4 – 0,1 | 1,8 – 0,5 |

Таблица П7.5

**Основные параметры процесса нанесения гальванических покрытий**

| Вид покрытия | $h$, мм, | γ, г/см$^3$ | $J_к$, А/дм$^2$ | $C$, г/(А · ч) | η, % |
|---|---|---|---|---|---|
| Хромирование: | | | | | |
| – износостойкое | 0,2 – 0,3 | 6,9 | 30 – 60 | 0,324 | 13 |
| – защитно-декоративное | 0,001 | 6,9 | 30 – 25 | 0,324 | 13 |
| Осталивание | 0,2 – 0,6 | 7,8 | 30 – 50 | 1,042 | 95 |
| Меднение | 0,003 – 0,030 | 8,9 | 3 | 1,195 | 100 |
| Никелирование | 0,015 – 0,020 | 8,9 | 3 | 1,095 | 95 |
| Цинкование | 0,020 – 0,010 | 7,1 | 2 | 1,230 | 95 |

# ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ МАРШРУТНОЙ КАРТЫ РЕМОНТА

ГОСТ 3.1105-74 Форма 5

| | Маршрутная карта ремонта | Обозначение и наименование детали (сборочной единицы) | Наименование, марка матер. | Код технологического основания | Код ремонта |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Ведущий вал | 40Х | | |

| | Код и наименование дефекта | | Наименование и содержание операции | Оборудование (код, наименование, инвентарный номер, шифр наладки) | Оснастка (код, наименование) | | Тшк. | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Износ шейки под | 005 | Кругло-шлифовальная | Круглошлифов. | | | | |
| | подшипником | | | 3М161Е | | | | |
| | | 010 | Гальваническая | Гальваническая | | | | |
| | | | | ванна | | | | |
| | | 015 | Кругло-шлифовальная | Круглошлифов. | | | | |
| | | | | 3М161Е | | | | |
| 2 | Износ шпоночной | 020 | Наплавочная | Трансформатор | | | | |
| | канавки | | | сварочный | | | | |
| | | | | ТС-500 | | | | |
| | | 025 | Вертикально-фрезерная | Верт-фрезерн. | | | | |
| | | | | 6Н12 | | | | |
| | | 030 | Кругло-шлифовальная | Круглошлифов. | | | | |
| | | | | 3М161Е | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

| Изм. | Лист | N докум. | Подпись | Дата | Изм. | Лист | N докум. | Подпись | Дата | Изм. | Лист | N докум. | Подпись | Дата | Разраб. | | Листов | Лист |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Учебное издание

Марк Леонтьевич Хазин
Сергей Александрович Волегов

**ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Учебное пособие

Редактор В. В. Баклаева

Компьютерная верстка авторов

Подписано в печать Бумага писчая. Формат 60 х 84 1/16
Печать на ризографе. Печ. л. . Уч.-изд. Тираж 200. Заказ

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

Министерство науки и высшего образования РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
Методической комиссией
горно-механического факультета
«15» декабря 2018 г.
Председатель комиссии
проф. В. П. Барановский

М. Л. Хазин

# Б1.В.05 Технология ремонта, восстановления и сборки машин

Методические указания
по самостоятельной работе для студентов
очного и заочного обучения
Направление подготовки
15.03.01 Машиностроение»

Екатеринбург, 2019

Учебное пособие рассмотрено на заседании кафедры эксплуатации горного оборудования 05 июня 2019 года

(протокол № 6) и рекомендовано для издания в УГГУ.

Хазин М. Л.

Технология ремонта, восстановления и сборки машин: Методические указания по самостоятельной работе для студентов очного и заочного обучения. Направление подготовки 15.03.01 Машиностроение». Урал. гос. горный ун-т – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2018. – 24 с.

В методических указаниях учебном-практическом пособии приведена последовательность выполнения практических и самостоятельных работ по дисциплине «Технология ремонта, восстановления и сборки машин», даны вопросы для самопроверки по разделам.

Пособие предназначено для студентов направления: 15.03.01 – «Машиностроение».

© Хазин М. Л., 2019

© Уральский государственный
горный университет, 2019

## ВВЕДЕНИЕ

Целью обучения дисциплине "Технология ремонта, восстановления и сборки машин" является формирование у студентов теоретических знаний и практических навыков по основам проектирования современных технологических процессов ремонта, позволяющих решать задачи, возникающие при выполнении профессиональных функций.

Актуальность данной дисциплины обусловлена отсутствием достаточных средств на защиту новых деталей в машиностроении. Ремонт позволяет сэкономить денежные средства, качественно и в кратчайший срок восстановить работоспособное состояние техники, транспортных и технологических машин и оборудования.

Для достижения указанной цели необходимо (задачи курса):

- приобретение знаний и навыков, необходимых для разработки технологической документации;

- приобретение знаний и навыков, необходимых для восстановления деталей и ремонта машин.

В ходе освоения дисциплины студент готовится к выполнению следующих профессиональных *задач:*

***производственно-технологическая деятельность:***

- проверка технического состояния и остаточного ресурса технологического оборудования, организация профилактических осмотров и текущего ремонта;

- составление заявок на оборудование и запасные части, подготовка технической документации на его ремонт,

Результатом освоения дисциплины является формирование у обучающихся следующих компетенций:

*общепрофессиональные*

- владением основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации (ОПК-3);

*профессиональные*

- умением проверять техническое состояние и остаточный ресурс технологического оборудования, (ПК-15)1.3.

*Перечень дисциплин и тем, усвоение которых студентами необходимо для изучения данной дисциплины*:

Для полноценного усвоения учебного материала по дисциплине «Технология ремонта, восстановления и сборки машин» студентам необходимо базироваться на знании следующих дисциплин: математика; сопротивление материалов; инженерная графика; теоретическая механика; материаловедение; технология конструкционных материалов; детали машин; метрология, стандартизация и взаимозаменяемость; экономика; надежность машин.

## 1. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Содержание учебной дисциплины «ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА, ВОССТАНОВЛЕНИЯ И СБОРКИ МАШИН»:

**Тема 1: Организация ремонта в машиностроении.**

Организация, методы и виды ремонта. Системы организации ремонта. Ремонтный цикл и его структура. Трудоемкость ремонта, группы ремонтной сложности. Подготовка и планирование ремонтных работ. Ремонтная конструкторско-технологическая документация. Сдача промышленного оборудования в ремонт. Демонтаж и разборка машин и оборудования. Мойка машин, сборочных единиц и деталей. Дефектация деталей. Сборка и испытания машин и оборудования после ремонта. Особенности сборки после ремонта. Испытания машин и оборудования после ремонта. Сдача отремонтированного оборудования заказчику.

**Тема 2: Технологические способы восстановление деталей.**

Классификация и характеристика технологических способов восстановления деталей. Восстановление деталей механической обработкой,

сваркой и наплавкой, металлизацией, электрохимическим и химическим осаждением. Применение электрофизических способов восстановления деталей. Применение полимерных материалов при восстановлении деталей. Выбор способа восстановления деталей. Выбор материалов для восстановления деталей. Технология ремонта типовых деталей. Проектирование технологического маршрута восстановления деталей.

При изучении курса предусмотрена контрольная работа.

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКЕ СТУДЕНТОВ

Самостоятельная работа студентов по изучению отдельных тем дисциплины включает поиск учебных пособий по данному материалу, проработку и анализ теоретического материала, самоконтроль знаний по данной теме с помощью нижеприведенных контрольных вопросов и заданий.

### 2.1. *Примерные вопросы для подготовки к зачету*

1. Виды ремонтов в машиностроении.
2. Ремонтопригодность машин.
3. Техническое состояние машины.
4. Техническое обслуживание.
5. Ремонтный цикл и его структура.
6. Методы ремонта в машиностроении.
7. Стратегии технического обслуживания и ремонта.
8. Системы организации ремонта.
9. Трудоемкость ремонта.
10. Процессы, протекающие в оборудовании.
11. Особенности поверхностного слоя деталей
12. Технологическое наследование параметров.
13. Строение поверхностного слоя детали.
14. Влияние шероховатости поверхности на долговечность детали.
15. Механизмы разрушения поверхности детали.
16. Назначение ремонтного хозяйства предприятия.
17. Состав ремонтного хозяйства.
18. Задачи и функции ремонтного хозяйства.

19.Организация ремонтной службы.
20.Показатели ремонтного хозяйства.
21.Планирование ремонтных работ.
22.Ремонтная конструкторско–технологическая документация.
23.Ремонтные чертежи.
24.Демонтаж и разборка машин.
25.Приемка машин в капитальный ремонт.
26.Мойка деталей и сборочных единиц.
27.Сущность, цели и задачи дефектации.
28.Способы дефектации.
29.Особенности сборки машин после ремонта.
30.Сборка шпоночных соединений.

## 2.2. *Примерные вопросы для подготовки к экзамену*

1. Газовая сварка.
2. Классификации электродов.
3. Пористость в покрытиях.
4. Обработка под ремонтный размер.
5. Восстановление постановкой дополнительной деталью.
6. Восстановление деталей наплавкой в защитной атмосфере.
7. Восстановление деталей наплавкой под слоем флюса.
8. Технология заварки трещин.
9. Восстановление забитой резьбы на валу.
10. Восстановление деталей металлизацией.
11. Восстановление деталей пластической деформацией.
12. Восстановление изношенной резьбы на валу.
13. Контактная сварка.
14. Восстановление тонкостенной детали.
15. Восстановление деталей склеиванием.
16. Восстановление деталей металлизацией.
17. Анодно-механическая обработка.
18. Применение оксидирования.
19. Коэффициент долговечности.
20. Электрохимическое нанесение покрытия на детали.
21. Ручная электродуговая сварка.
22.. Ультразвуковая обработка деталей.
23.. Электроискровая обработка.
24. Лазерная сварка.
25. Плакирование.
26. Восстановление металлизацией.
27. Восстановление деталей синтетическими материалами.
28. Восстановление деталей вибродуговой наплавкой.
29. Электрофизическая обработка.
30. Классификация методов восстановления деталей машин.

## 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

По курсу "Технология ремонта, восстановления и сборки машин" при заочной форме обучения выполняется одна контрольная работа.

Контрольная работа ставит своей задачей закрепить и расширить теоретические знания и практические навыки по совершенствованию технологии и организации восстановления деталей и сборочных единиц. Общим направлением контрольной работы является совершенствование организации проведения ремонта.

## 4. КОМПЛЕКТ ТЕСТОВЫХ ЗАДАНИЙ

**5.**

**Тестовые задания, направленные на оценку знаний, формирующих компетенцию ОПК-3:** владением основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации (*знать*: - организацию и производственные процессы ремонта в машиностроении; *уметь*: - получить и переработать информацию для составления графика ППР); **ПК-15**: умением проверять техническое состояние и остаточный ресурс технологического оборудования (*знать*: организацию и производственные процессы ремонта в машиностроении; *уметь*: проверять техническое состояние и остаточный ресурс технологического оборудования.

**Тема №** 1

**Вариант 1**

1. Разрушению лучше противостоит сталь с качеством поверхности
   а) Rz 40
   б) 1,25
   в) 2,5
   г) Rz 20
2. Виды ремонта
   а) плановый
   б) аварийный
   в) гарантийный
   г) все перечисленные
3. Коэффициент долговечности – это
   а) отношение времени работы новой детали к времени работы

восстановленной детали

б) отношение времени работы восстановленной детали к времени работы новой детали

в) время работы новой детали

г) время работы восстановленной детали

4. По размерам поры в покрытии подразделяются на

а) микропоры, макропоры, промежуточные

б) микропоры, поры, макропоры

в) малые, большие, промежуточные

г) микропоры, макропоры, средние

5. Для восстановления детали следует использовать способ, коэффициент долговечности k которого

а) $k < 1$

б) $k = 1$

в) $k > 0,8$

г) $k > 0,5$

6. По форме поры в покрытии подразделяются на

а) длинные и короткие

б) канальчатые и точечные

в) вытянутые и круглые

г) канальчатые и шаровые

7. Для выбора способа восстановления детали используют критерии

а) технический, долговечности, технолого-экономический

б) технический, долговечности, технико-экономический половинчатый

в) технологический, долговечности, экономический

г) технологический, долговечности, технико-экономический

8. Технико-экономический критерий позволяет подобрать способ восстановления детали из условия, что стоимость восстановления

а) меньше стоимости изготовления данной детали

б) больше стоимости изготовления данной детали

в) равна стоимости изготовления данной детали

г) много меньше стоимости изготовления данной детали

9. Целью технологического процесса восстановления является

а) восстановление детали

б) ремонт детали

в) возвращение детали утраченной работоспособности

г) ремонт машины

10. Трудоемкость ремонта

а) затраты труда на ремонт машины (оборудования), выраженные в человеко-часах

б) затраты труда на ремонт машины (оборудования), выраженные в рублях

в) затраты труда на ремонт машины (оборудования), выраженные в машино-часах г) затраты труда на ремонт машины (оборудования), выраженные в часах

**Вариант 2**

1. Показателем ремонтопригодности является
   а) время, затрачиваемое на процессы и операции предупреждения, поиска и устранения неисправности путем проведения технического обслуживания и ремонта
   б) время, затрачиваемое на процессы и операции предупреждения, поиска и устранения неисправности или отказа путем проведения технического обслуживания
   в) время, затрачиваемое на процессы и операции предупреждения, поиска и устранения неисправности путем проведения ремонта
   г) затраты на процессы и операции предупреждения, поиска и устранения неисправности путем проведения технического обслуживания и ремонта
2. Технологическо-эксплуатационной наследственность
   а) влияние технологии обработки заготовок на качество деталей машин при их эксплуатации
   б) влияние технологии обработки деталей машин на их эксплуатацию
   в) влияние технологии обработки деталей машин на их долговечность
   г) влияние технологии обработки заготовок на качество деталей машин
3. Назначение ремонтного хозяйства предприятия:
   а) своевременное и в полном объеме удовлетворение потребностей производственных подразделений предприятия в техническом обслуживании и ремонте оборудования с минимальными затратами
   б) своевременное и в полном объеме удовлетворение потребностей производственных подразделений предприятия в техническом обслуживании и ремонте оборудования
   в) своевременное удовлетворение потребностей производственных подразделений предприятия в техническом обслуживании и ремонте оборудования с минимальными затратами.
   г) в полном объеме удовлетворение потребностей производственных подразделений предприятия в техническом обслуживании и ремонте оборудования с минимальными затратами
4. Основная задача ремонтного хозяйства
   а) обеспечить бесперебойную эксплуатацию оборудования при минимальных затратах на ремонт
   б) обеспечить бесперебойную эксплуатацию оборудования при минимальных затратах на ремонтообслуживание
   в) обеспечить эксплуатацию оборудования при минимальных затратах на ремонт
   г) обеспечить бесперебойную эксплуатацию оборудования
5. Техническая подготовка ремонта включает в себя
   а) конструкторскую и технологическую подготовку
   б) конструкторскую и техническую подготовку

в) конструкторскую и материальную подготовку

г) технологическую и техническую подготовку

6. На ремонтных чертежах указывают

а) все размеры, предельные отклонения, зазоры и другие данные, которые должны быть выполнены и проверены в процессе ремонта и сборки изделия повышается не меняется

б) только те размеры, предельные отклонения, зазоры и другие данные, которые должны быть выполнены и проверены в процессе ремонта и сборки изделия

в) только те размеры, которые должны быть выполнены и проверены в процессе ремонта и сборки изделия повышается понижается

г) только те размеры, предельные отклонения, зазоры и другие данные, которые должны быть выполнены и проверены в процессе сборки изделия

7. Ремонтные размеры деталей делятся на

а) категорийные и пригоночные

б) категорийные и свободные

в) стандартные и регламентируемые

г) категорийные и стандартные

8. На ремонтном чертеже

а) не допускается одновременно указывать несколько вариантов ремонта одних и тех же элементов детали

б) допускается одновременно указывать несколько вариантов ремонта одних и тех же элементов детали

в) допускается одновременно указывать несколько вариантов ремонта одних и тех же элементов детали только в единичной производстве

г) допускается одновременно указывать несколько вариантов ремонта одних и тех же элементов детали в исключительных случаях

9. Дефектация – это процесс

а) выявления технического состояния деталей и сопряжений

б) выявления технического состояния деталей и сопряжений путем сравнения фактических показателей с данными технической документации

в) выявления технического состояния деталей путем сравнения фактических показателей с данными технической документации

г) выявления технического состояния деталей и сопряжений путем сравнения с данными технической документации

10. В результате проведения дефектации все детали сортируются на три группы:

а) годные без восстановления, негодные без восстановления, неподлежащие восстановлению

б) негодные без восстановления, подлежащие полному восстановлению, неподлежащие восстановлению

в) годные без восстановления, подлежащие восстановлению, неподлежащие восстановлению

г) годные без восстановления, подлежащие частичному восстановлению,

неподлежащие восстановлению

**Вариант 3**

1. По последовательности сборки выделяют:
   а) последовательную
   б) параллельную степень перегрева
   в) последовательно-параллельную
   г) все перечисленные
2. По уровню механизация и автоматизации процесса сборку разделяют на:
   а) механизированную
   б) автоматизированную
   в) автоматическую
   г) все перечисленные
3. Планирование работ по всем видам ремонтов оборудования подразделяют на:
   а) долгосрочное, годовое и текущее (месячное)
   б) длительное, годовое и текущее (месячное)ударную вязкость
   в) долгосрочное, годовое и не срочное (текущее)
   г) долгосрочное, малосрочное и текущее
4. Целью технологического процесса восстановления является
   а) восстановление детали
   б) ремонт детали
   в) возвращение детали утраченной работоспособности
   г) ремонт машины
5. Трудоемкость ремонта
   а) затраты труда на ремонт машины (оборудования), выраженные в человеко-часах
   б) затраты труда на ремонт машины (оборудования), выраженные в рублях
   в) затраты труда на ремонт машины (оборудования), выраженные в машино-часах г) затраты труда на ремонт машины (оборудования), выраженные в часах
6. Целью технологического процесса восстановления является
   а) восстановление детали
   б) ремонт детали
   в) возвращение детали утраченной работоспособности
   г) ремонт машины
7. Технико-экономический критерий позволяет подобрать способ восстановления детали из условия, что стоимость восстановления
   а) меньше стоимости изготовления данной детали
   б) больше стоимости изготовления данной детали
   в) равна стоимости изготовления данной детали
   г) много меньше стоимости изготовления данной детали
8. Показателем ремонтопригодности является

а) время, затрачиваемое на процессы и операции предупреждения, поиска и устранения неисправности путем проведения технического обслуживания и ремонта

б) время, затрачиваемое на процессы и операции предупреждения, поиска и устранения неисправности или отказа путем проведения технического обслуживания

в) время, затрачиваемое на процессы и операции предупреждения, поиска и устранения неисправности путем проведения ремонта

г) затраты на процессы и операции предупреждения, поиска и устранения неисправности путем проведения технического обслуживания и ремонта

9. Технологическо-эксплуатационной наследственность

а) влияние технологии обработки заготовок на качество деталей машин при их эксплуатации

б) влияние технологии обработки деталей машин на их эксплуатацию

в) влияние технологии обработки деталей машин на их долговечность

г) влияние технологии обработки заготовок на качество деталей машин

10. По организации производства выделяют:

а) типовую поточную

б) групповую

в) единичную

г) все перечисленные

**Вариант 4**

1. В результате проведения дефектации все детали сортируются на три группы:

а) годные без восстановления, негодные без восстановления, неподлежащие восстановлению

б) негодные без восстановления, подлежащие полному восстановлению, неподлежащие восстановлению

в) годные без восстановления, подлежащие восстановлению, неподлежащие восстановлению

г) годные без восстановления, подлежащие частичному восстановлению, неподлежащие восстановлению

2. Дефектация – это процесс

а) выявления технического состояния деталей и сопряжений

б) выявления технического состояния деталей и сопряжений путем сравнения фактических показателей с данными технической документации

в) выявления технического состояния деталей путем сравнения фактических показателей с данными технической документации

г) выявления технического состояния деталей и сопряжений путем сравнения с данными технической документации

3. На ремонтном чертеже

а) не допускается одновременно указывать несколько вариантов ремонта одних и тех же элементов детали
б) допускается одновременно указывать несколько вариантов ремонта одних и тех же элементов детали
в) допускается одновременно указывать несколько вариантов ремонта одних и тех же элементов детали только в единичной производстве
г) допускается одновременно указывать несколько вариантов ремонта одних и тех же элементов детали в исключительных случаях

4. Техническая подготовка ремонта включает в себя
а) конструкторскую и технологическую подготовку
б) конструкторскую и техническую подготовку
в) конструкторскую и материальную подготовку
г) технологическую и техническую подготовку

5. На ремонтных чертежах указывают
а) все размеры, предельные отклонения, зазоры и другие данные, которые должны быть выполнены и проверены в процессе ремонта и сборки изделия повышается не меняется
б) только те размеры, предельные отклонения, зазоры и другие данные, которые должны быть выполнены и проверены в процессе ремонта и сборки изделия
в) только те размеры, которые должны быть выполнены и проверены в процессе ремонта и сборки изделия повышается понижается
г) только те размеры, предельные отклонения, зазоры и другие данные, которые должны быть выполнены и проверены в процессе сборки изделия

6. Ремонтные размеры деталей делятся на
а) категорийные и пригоночные
б) категорийные и свободные
в) стандартные и регламентируемые
г) категорийные и стандартные

7. Разрушению лучше противостоит сталь с качеством поверхности
а) Rz 40
б) 1,25
в) 2,5
г) Rz 20

8. Виды ремонта
а) плановый
б) аварийный
в) гарантийный
г) все перечисленные

9. Коэффициент долговечности – это
а) отношение времени работы новой детали к времени работы восстановленной детали
б) отношение времени работы восстановленной детали к времени работы новой детали

в) время работы новой детали
г) время работы восстановленной детали

10. По последовательности сборки выделяют:
а) последовательную
б) параллельную степень перегрева
в) последовательно-параллельную
г) все перечисленные

**Вариант 5**

1. Трудоемкость ремонта
а) затраты труда на ремонт машины (оборудования), выраженные в человеко-часах
б) затраты труда на ремонт машины (оборудования), выраженные в рублях
в) затраты труда на ремонт машины (оборудования), выраженные в машино-часах г) затраты труда на ремонт машины (оборудования), выраженные в часах

2. Целью технологического процесса восстановления является
а) восстановление детали
б) ремонт детали
в) возвращение детали утраченной работоспособности
г) ремонт машины

3. Технико-экономический критерий позволяет подобрать способ восстановления детали из условия, что стоимость восстановления
а) меньше стоимости изготовления данной детали
б) больше стоимости изготовления данной детали
в) равна стоимости изготовления данной детали
г) много меньше стоимости изготовления данной детали

4. Показателем ремонтопригодности является
а) время, затрачиваемое на процессы и операции предупреждения, поиска и устранения неисправности путем проведения технического обслуживания и ремонта
б) время, затрачиваемое на процессы и операции предупреждения, поиска и устранения неисправности или отказа путем проведения технического обслуживания
в) время, затрачиваемое на процессы и операции предупреждения, поиска и устранения неисправности путем проведения ремонта
г) затраты на процессы и операции предупреждения, поиска и устранения неисправности путем проведения технического обслуживания и ремонта

5. Технологическо-эксплуатационной наследственность
а) влияние технологии обработки заготовок на качество деталей машин при их эксплуатации
б) влияние технологии обработки деталей машин на их эксплуатацию

в) влияние технологии обработки деталей машин на их долговечность
г) влияние технологии обработки заготовок на качество деталей машин

6. По организации производства выделяют:
а) типовую поточную
б) групповую
в) единичную
г) все перечисленные

7. По последовательности сборки выделяют:
а) последовательную
б) параллельную степень перегрева
в) последовательно-параллельную
г) все перечисленные

8. По уровню механизация и автоматизации процесса сборку разделяют на:
а) механизированную
б) автоматизированную
в) автоматическую
г) все перечисленные

9. Планирование работ по всем видам ремонтов оборудования подразделяют на:
а) долгосрочное, годовое и текущее (месячное)
б) длительное, годовое и текущее (месячное)ударную вязкость
в) долгосрочное, годовое и не срочное (текущее)
г) долгосрочное, малосрочное и текущее

10. Целью технологического процесса восстановления является
а) восстановление детали
б) ремонт детали
в) возвращение детали утраченной работоспособности
г) ремонт машины

**Тестовые задания, направленные на оценку знаний, формирующих компетенцию ОПК-3:** владением основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации (*знать*: - прогрессивные технологические процессы восстановления и упрочнения изношенных деталей машин; *уметь*: проверять техническое состояние и остаточный ресурс технологического оборудования получить и переработать информацию для составления графика ППР); **ПК-15**: умением проверять техническое состояние и остаточный ресурс технологического оборудования (*знать*: прогрессивные технологические процессы восстановления и упрочнения изношенных деталей машин; *уметь*: разработать технологический процесс восстановления деталей и ремонта машин; разработать технологическую документацию).

## Тема № 2

**Вариант 1**

1. При какой наплавке температура детали не поднимается выше 80 $^{o}$C

а) газовой
б) электродуговой
в) вибродуговой
г) плазменной

2. Получаемое при электрохимическом осталивании покрытие по составу и свойствам соответствует
а) низкоуглеродистой стали
б) среднеуглеродистой стали
в) высокоуглеродистой стали
г) техническому железу

3. Электроискровая обработка позволяет
а) удалять из отверстия сломанные инструменты
б) удалять из отверстия сломанные болты
в) получать отверстия любой формы сечения
г) все указанные действия и фосфора

4. При химическом нанесении покрытий электроны для восстановления ионов металла берутся
а) из раствора электролита
б) из лигандов
в) от катода
г) от анода

5. После обработке под ремонтный размер деталь приобретает размеры
а) номинальные
б) ремонтные
в) фактические
г) действительные

6. Для регулировки мощности пламени используют сменные наконечники для горелок в количестве
а) 5
б) 9
в) 8
г) 7

7. Недостаток восстановления деталей металлизацией и напылением
а) большие потери металла на разбрызгивание
б) малая толщина покрытия
в) низкая производительность
г) низкая твердость покрытия

8. Температура дуги при ручной электродуговой сварке, $^{o}$C
а) 8000–10000
б) 2000–4000
в) 4000– 6000
г) 20000–30000

9. Число ремонтов вала при обработке под ремонтный размер определяется
а) из технологических соображений
б) из расчета на прочность

в) из конструктивных соображений
г) по условиям работы

10. Газовую сварку применяют при ремонте
а) в заводских условиях
б) в полевых условиях
в) в мастерской
г) в цехе

**Вариант 2**

1. Восстановление постановкой дополнительной деталью заключается в
а) удалении дефектного слоя механической обработкой и установке дополнительной детали
б) нанесении металлического слоя с последующей установкой дополнительной детали
в) слесарной обработке и установке дополнительной детали
г) установке дополнительной детали М

2. Недостаток восстановления деталей наплавкой в защитной атмосфере
а) малая толщина покрытия
б) низкая твердость покрытия
в) большие потери металла на разбрызгивание
г) низкая производительность

3. Источник питания сварочной дуги переменного тока, это сварочный
а) трансформатор
б) сварочный выпрямитель
в) преобразователь сплавы
г) генератор

4. При наплавке каждый следующий виток (проход) должен перекрывать предыдущий
а) не менее чем на 1/3
б) не менее чем на 0,1
в) не менее чем на 1/2
г) не должен

5. Наплавка это нанесение слоя металла на поверхность детали
а) под давлением
б) сваркой
в) в твердом состоянии
г) в жидком состоянии

6. Недостаток восстановления деталей наплавкой под слоем флюса
а) малая толщина покрытия
б) низкая твердость покрытия
в) значительный нагрев детали
г) низкая производительность

7. При модуле $\leq 5$ зубчатое колесо восстанавливают
а) сплошной круговой наплавкой

б) наплавкой каждого зуба в отдельности
в) металлизацией
г) сваркой

8. Какую операцию не проводят перед наплавкой
а) механическую обработку резанием
б) обезжиривание
в) очистка
г) мойку

9. Цифра в обозначении типа электрода Э150
а) предел прочности сварного шва
б) длина электрода
в) диаметр электрода
г) предел прочности электрода

10. При точечной сварке соединение поверхностей происходит за счет
а) образования сварной точки
б) образования межатомных связей в отдельных точках
в) сварки в разных точках
г) образования лито-сварной точки

**Вариант 3**

1). При заварке трещин сначала заваривают
1) 3) в любом порядке
2) 4),
а) концевые отверстия, затем трещину
б) трещину, затем концевые отверстия
в) первое отверстие
г) трещину, второе отверстие

2. Электрохимическое меднение применяют для
а) снижения трения
б) повышения пластичности
в) повышения износостойкости
г) снижения прочности и твердости

3. правка валов может проводиться в состоянии
а) холодном и теплом
б) горячем и теплом
в) холодном и горячем
г) подогретом и теплом

4. При модуле 10 и более зубчатое колесо восстанавливают
а) сваркой
б) сплошной круговой наплавкой
в) наплавкой каждого зуба в отдельности
г) металлизацией

5. Плотный герметичный шов обеспечивает сварка
а) стыковая оплавлением

б) точечная
в) шовная
г) стыковая сопротивлением

6. Стали, свариваемые в защитной атмосфере углекислого газа
а) малоуглеродистые и низколегированные
б) высокоуглеродистые
в) высоколегированные
г) среднеуглеродистые

7. Методом металлизации можно восстанавливать детали из
а) стали
б) дерева
в) любых материалов
г) цветных металлов

8. Аргонодуговую сварку не используют при сварке
а) титана
б) легированной стали
в) цветных металлов
г) углеродистой стали

9. Забитую резьбу на валу восстанавливают
а) наплавкой
б) метчиком
в) фрезерованием
г) прогонкой плашки

10. После правки вала необходимо провести
а) закалку
б) отжиг
в) отпуск
г) нормализацию

**Вариант 4**

1. Обломок крепежа можно удалить из глубины отверстия
а) забивкой квадратной оправки
б) приваркой поперечного стержня
в) отверткой
г) забивкой круглой оправки

2. При восстановлении, дополнительную деталь стопорят от продольного смещения
а) болтом
б) штифтом
в) штифтом или проваркой по контуру
г) проваркой по контуру серы

3. Сварочной дугой называется
а) мощный нестабильный разряд электричества в газе
б) маломощный нестабильный разряд электричества в газе

в) тлеющий разряд
г) мощный стабильный разряд электричества в газе

4. Технологический критерий позволяет
а) отобрать способы, не подходящие для восстановления данной детали
б) отобрать способы, подходящие для восстановления данной детали
в) подобрать технологию восстановления данной детали
г) сгруппировать детали с одинаковыми дефектами

5. Флюс при сварке используется для
а) обеспечения стабильности горения дуги
б) легирования металла
в) уменьшения пористости шва
г) защиты металла от окисления

6. Детали подлежат восстановлению, если их износ
а) меньше допустимого
б) меньше предельного
в) больше допустимого
г) больше предельного 60

7. При металлизации структура получаемого покрытия
а) неоднородная
б) неоднородная с неметаллическими включениями
в) плотная
г) однородная

8. Нахлесточные сварные соединения образуются при сварке
а) термитной
б) стыковой
в) точечной и шовной
г) трением

9. Толщина каждой из заготовок при шовной и точечной контактной сварке
а) до 5 мм
б) до 35 мм
в) любая
г) до 15 мм

10. Восстановление детали обработкой под ремонтный размер заключается в
а) удалении дефектного слоя механической обработкой
б) ремонте размеров
в) нанесении слоя с последующей механической обработкой
г) слесарной обработке

**Вариант 5**

1. Пористое покрытие используют для
а) уменьшения массы покрытия
б) запасания воздуха
в) проветривания детали
г) запасания масла

2. Задачей технологического процесса восстановления деталей является выбор наиболее

а) рационального способа восстановления

б) экономичного способа восстановления

в) рационального и экономичного способа восстановления

г) рационального и экономичного способа восстановления в условиях данного предприятия

3. Клей ВС-10Т применяют для склеивания

а) металлов

б) неметаллов

в) любых материалов

г) металлов и неметаллов

4. Лазерную сварку можно проводить в

а) вакууме

б) на воздухе

в) в защитной атмосфере

г) при всех условиях

5. Производительность при ручной электродуговой сварке зависит от

а) мощности дуги

б) квалификации сварщика

в) напряжения

г) силы тока колес

6. Тонкостенную деталь можно восстанавливать наплавкой

а) электродуговой

б) газовой

в) вибродуговой

г) плазменной

7. проволока для металлизации применяется

а) гладкая и твердая

б) гладкая и мягкая

в) полутвердая

г) мягкая и с пупырышками

8. Вытяжка – увеличение длины детали за счет

а) уменьшения ширины

б) локального уменьшения поперечного сечения

в) уменьшения высоты

г) уменьшения поперечного сечения

9. Оксидирование применяют для

а) повышения износостойкости

б) восстановления износа марганец

в) повышения твердости

г) защиты от коррозии

10. Электрическая дуга прямой полярности

а) переменного тока

б) минус – электрод, плюс – изделие

в) минус – изделие, плюс – электрод
г) постоянного тока

*Критерии оценивания:* правильность ответа
*Правила оценивания тестового задания:*
Правильный ответ – 1 балл.
Неправильный ответ, ответ с ошибкой – 0 баллов
*Критерии оценки:*

оценка «отлично» выставляется обучающемуся, если он набрал 9-10 баллов (90-100% правильных ответов)

оценка «хорошо» выставляется обучающемуся, если он набрал 7-8 баллов (70-89% правильных ответов)

оценка «удовлетворительно» выставляется обучающемуся, если он набрал 5-6 баллов (50-69% правильных ответов)

оценка «неудовлетворительно» выставляется обучающемуся, если он набрал 0-4 баллов (0-49% правильных ответов).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Восстановление деталей машин : справочник / Под ред. В. П. Иванова. - Москва: Машиностроение, 2003. - 672 с.

2 Воробьев Л. Н. Технология машиностроения и ремонт машин .: учебник - Москва: Высшая школа, 1981. - 344 с.

3 Дмитриев В. Т., Горшков Э. В., Зубов В. В. Основы эксплуатации и ремонта технологического оборудования : учебно-методическое пособие : для студентов направления бакалавриата 150700; Уральский государственный горный университет. - Екатеринбург: УГГУ, 2015. - 65 с.

4 Проектирование технологических процессов восстановления деталей и ремонтных баз горных предприятий: учебное пособие / В. Т. Дмитриев, Г. А. Боярских. - 2-е изд., стер. - Екатеринбург : УГГГА, 2001. - 140 с.

5 Солод Г. И., Морозов В. И., Русихин В. И. Технология машиностроения и ремонт горных машин : учебник. - Москва: Недра, 1988. - 421 с.

6 Технология, оснащение и организация ремонтно-восстановительного производства: учебник для студентов высших учебных заведений / В. А. Горохов [и др.]; под ред. В. П. Иванова. - Старый Оскол: ТНТ, 2016. - 552 с.

7 Хазин М. Л. Теория и методы восстановления деталей горных машин: учебное пособие. - Екатеринбург : УГГУ, 2006. - 308 с.

8 Хазин М. Л., Волегов С. А. Теория и технологические методы восстановления и повышения износостойкости деталей машин: учебное пособие по выполнению курсовой работы для студентов направления бакалавриата 15.03.01. Екатеринбург : УГГУ, 2015. - 80 с.

**Министерство науки и образования РФ**
**ФГБОУ ВО**
**«Уральский государственный**
**горный университет»**

**М. Л. Хазин, С. А. Волегов**

# ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА, ВОССТАНОВЛЕНИЯ И СБОРКИ МАШИН

***Учебное пособие***

**по выполнению курсовой работы**
**для студентов направления бакалавриата**
**15.03.01 – «Машиностроение»**
***очного и заочного обучения***

**Екатеринбург**
**2018**

Министерство науки и образования РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

**ОДОБРЕНО**
Методической комиссией
горно-механического факультета
«15» декабря 2017 г.
Председатель комиссии
проф. В. П. Барановский

М. Л. Хазин, С. А. Волегов

# ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА, ВОССТАНОВЛЕНИЯ И СБОРКИ МАШИН

*Учебное пособие*
по выполнению курсовой работы
для студентов направления бакалавриата
15.03.01 – «Машиностроение»
*очного и заочного обучения*

Издание УГГУ
Екатеринбург, 2018

Х12

Рецензент: *Бухмастов А. В.*, канд. техн. наук,
директор НП «Союз машиностроительных предприятий
Свердловской области»

Учебное пособие рассмотрено на заседании кафедры эксплуатации горного оборудования 05 декабря 2017года
(протокол № 4) и рекомендовано для издания в УГГУ

**Хазин М. Л., Волегов С. А.**

Х12 ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА, ВОССТАНОВЛЕНИЯ И СБОРКИ МАШИН: учебное пособие по выполнению курсовой работы для студентов направления бакалавриата 15.03.01 – «Машиностроение» очного и заочного обучения / М. Л. Хазин, С. А. Волегов. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2018. – 79 с.

В учебном пособии приведена последовательность выполнения практических и самостоятельных работ по дисциплине «Теория и технологические методы восстановления и повышения износостойкости деталей машин», изложена методика разработки технологического процесса восстановления деталей оборудования, анализа дефектов и технического состояния деталей, составления технологических карт, приведен порядок выбора способа восстановления при ремонте деталей оборудования.

Пособие предназначено для студентов направления бакалавриата 15.03.01 – «Машиностроение», подготовка которых требует знаний по ремонту промышленного оборудования.

© Хазин М. Л., Волегов С. А., 2018
© Уральский государственный
горный университет, 2018

# ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ……..... 5
1.1. Цель и задачи курсовой работы……. 5
1.2. Объем и содержание курсовой работы…… 6
1.3. Расчётно-пояснительная записка……. 6
1.4. Графическая часть……. 6
1.5. Оформление курсовой работы…….. 7
2. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА…….. 10
2.1. Порядок выполнения работы…… 10
2.2. Анализ технического состояния детали……. 11
2.3. Анализ дефектов и оценка пригодности детали……. 12
2.4. Выбор способа восстановления деталей……. 20
2.5. Разработка маршрута восстановления детали……. 26
2.6. Расчет припусков при восстановлении детали……. 28
3. ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ……. 30
3.1. Требования к материалам……. 30
3.2. Металлическая проволока и лента…….. 30
3.3. Штучные электроды и прутки…….. 31
3.4. Порошки……... 31
3.5. Порошковая проволока и ленты…….. 32
3.6. Синтетические материалы……. 33
3.7. Выбор и определение нормы расхода материала……. 34
4. ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ И ОСНАСТКИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ……..... 35
5. РАСЧЁТ РЕЖИМОВ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ……... 38
5.1. Наплавка…….. 38
5.2. Наварка ленты и проволоки……. 41
5.3. Нанесение электролитических покрытий……... 42
5.4. Механическая обработка…… 44
6. БРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ…….. 50
6.1. Особенности механической обработки восстановленных деталей…… 50
6.2. Базирование деталей……. 50
6.3. Обработка наплавленных поверхностей……. 52
6.4. Обработка деталей с газотермическими покрытиями…….. 53
6.5. Обработка синтетических материалов……. 53
6.6. Обработка деталей с электрохимическими покрытиями……. 54
7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМ ВРЕМЕНИ…… 55
7.1. Наплавка…….. 55
7.2. Электрохимические покрытия…….. 58
7.3. Механическая обработка……. 58
8. ОФОРМЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ…… 59
8.1. Оформление технологической документации…… 59

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ…….. 59
Приложение 1. ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ…….. 60
Приложение 2. ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ПЕРВОГО ЛИСТА ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ ……. 61
Приложение 3. ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ ПОСЛЕДУЮЩИХ ЛИСТОВ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ…… 62
Приложение 4. ХАРАКТЕРИСТИКИ СПОСОБОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ……... 63
Приложение 5. СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ……. 71
Приложение 6. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ……. 73
Приложение 7. РЕЖИМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ……. 75
Приложение 8. ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ МАРШРУТНОЙ КАРТЫ РЕМОНТА 79

# 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

## 1.1. Цель и задачи курсовой работы

*Цель* курсовой работы – научить студентов проектировать эффективные и экономичные технологические процессы восстановления деталей машин на основе современных достижений отечественного и зарубежного машиностроения и ремонтного производства.

В процессе работы решаются следующие *задачи*:

- проверка технического состояния и остаточного ресурса технологического оборудования, организация профилактических осмотров и текущего ремонта;

- составление заявок на оборудование и запасные части, подготовка технической документации на его ремонт,

В процессе работы студент формирует и демонстрирует следующие компетенции:

*общепрофессиональные*

владением основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации (ОПК-3);

*профессиональные*

умением проверять техническое состояние и остаточный ресурс технологического оборудования, (ПК-15).

Курсовая работа является завершающим этапом изучения дисциплины «Технология ремонта, восстановления и сборки машин» и служит для закрепления теоретических знаний, полученных при изучении ранее читаемых дисциплин.

## 1.2. Объем и содержание курсовой работы

Курсовая работа выполняется согласно заданию, выданному преподавателем, и состоит из расчетно-пояснительной записки (РПЗ) и графической части (чертежей, графиков).

В курсовой работе студент разрабатывает технологический процесс ремонта детали.

Объём курсового проекта определяют документы, поясняющие и раскрывающие его содержание:

- Задание на проектирование (прил. 1).
- Расчётно-пояснительная записка, представляющая собой все необходимые технические и технико-экономические расчёты, дающие обоснование принятым в проекте решениям.
- Технологическая документация (маршрутная, операционные и эскизные карты).
- Иллюстрации технологического процесса восстановления детали.

### 1.3. Расчётно-пояснительная записка

Расчетно-пояснительная записка является основным документом курсовой работы, в которой приводится исчерпывающая информация о выполненных расчетных и технологических разработках.

Расчётно-пояснительная записка должна быть написана в следующей последовательности:

- титульный лист;
- задание и рабочий чертеж детали;
- оглавление;
- введение;
- расчетно-технологическая часть;
- заключение;
- список литературы;
- приложение (технологические карты).

Основные положения расчетно-пояснительной записки иллюстрируются таблицами, схемами, рисунками, графиками. Они должны иметь сквозную нумерацию и соответствующие подрисуночные надписи.

### 1.4. Графическая часть

Графическая часть курсовой работы представляет собой рабочий чертеж детали, ремонтный чертеж детали и иллюстрация технологического процесса восстановления поверхности детали (формат А1). Обрабатываемые поверхности обозначаются сплошной основной линией толщиной от 2*s* до 3*s* или цветом.

Ремонтный чертеж детали выполняется в соответствии с требованиями ГОСТ 2.604-2000 ЕСКД. Чертежи ремонтные.

На ремонтных чертежах изображают только те виды, разрезы и сечения, которые необходимы для проведения ремонта детали или сборочной единицы. Указывают только те размеры, предельные отклонения, зазоры и другие данные, которые должны быть выполнены в процессе ремонта и сборки изделия.

### 1.5. Оформление курсовой работы

Пояснительная записка пишется от руки черными, синими или фиолетовыми чернилами или печатается на принтерных устройствах ЭВМ на листах формата А4 ГОСТ 2.105-95 шрифтом Times New Roman кеглем 14.

Первым листом пояснительной записки, после титульного, является лист, определяющий ее содержание, с основной надписью, выполненной по форме 2 ГОСТ 2.104-68. Все последующие листы выполняются с основной надписью 2а того же ГОСТ. В графу 2 основной надписи записывается код (обозначение). Код документа включает в себя наименование работы, обозначение учебной группы, номер группы, номер задания и наименование документа. Например,

КР МШС 012 025 ПЗ, где КР – курсовая работа; МШС – обозначение учебной группы; 12 – номер группы; 25 – номер задания; ПЗ – пояснительная записка.

Слово «Оглавление» записывается в виде заголовка (симметрично тексту) с прописной буквы. Наименования, включенные в содержание, записывают строчными буквами, начиная с прописной буквы.

Расстояние от рамки до границ текста в начале и в конце строки – не менее 3 мм.

Расстояние от верхней или нижней строки текста до верхней или нижней рамки должно быть не менее 10 мм.

Расчетно-пояснительная записка должна иметь ясную и четкую рубрикацию разделов. Текст записки разделяют на разделы и подразделы. Разделы должны иметь порядковые номера в пределах всей записки, обозначенные арабскими цифрами без точки и записанные с абзацного отступа. Подразделы должны иметь нумерацию в пределах каждого раздела. Номер подраздела состоит из номеров раздела и подраздела, разделенных точкой. Разделы и подразделы должны иметь заголовки. Заголовки следует писать с прописной буквы без точки в конце, не подчеркивая. Переносы слов в заголовках не допускаются. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой.

Расстояние между заголовками раздела, подраздела и текстом должно быть 1,5 – 2 интервала.

Формулы пишутся на отдельной строке симметрично основному тексту. Расчеты, выполненные по приведенной формуле, записываются на следующей строке. Промежуточные результаты не записываются. Расчётные формулы должны иметь чёткую связь с расчётными схемами и сквозную нумерацию (в круглых скобках с правой стороны листа). Буквенные обозначения формул должны иметь расшифровку, а цифровые константы – соответствующую ссылку на литературу (в квадратных скобках в тексте).

***Пример 1***

Минутная подача $S_м$, мм/мин, рассчитывается по формуле

$$S_м = S_о \cdot n,$$

где $S_о$ – подача на оборот детали, мм/об; $n$ – частота вращения детали, мин$^{-1}$.

Иллюстрации должны быть выполнены в соответствии с требованиями стандартов ЕСКД. Иллюстрации следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией. Допускается нумеровать иллюстрации в пределах раздела. В этом случае номер иллюстрации состоит из номеров раздела и порядкового номера иллюстрации, разделенных точкой.

Иллюстрации, при необходимости, могут иметь наименование и пояснительные данные (подрисуночный текст). Номер рисунка и наименование записывают следующим образом: «Рис. 2.1. Эскиз заготовки», – и помещают после пояснительных данных.

Цифровой материал, как правило, оформляют в виде таблицы в соответствии с рис. 1.1.

Таблицы следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией. Допускается нумеровать таблицы в пределах раздела.

Таблицу, в зависимости от ее размера, помещают под текстом, в котором впервые дана ссылка на нее, или на следующей странице.

Допускается помещать таблицу вдоль длинной стороны документа на отдельной странице. См. пример оформления таблицы (табл.1.1).

Таблица 1.1

**Химический состав качественных углеродистых конструкционных сталей в процентах**

| Марка стали | Элементы, % | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | C | Si | Mn | P | S |
| 20 | 0,20 | 0,17 – 0,37 | 0,35-0,65 | < 0,04 | < 0,04 |
| 25 | 0,25 | | | < 0,04 | < 0,04 |
| 30 | 0,30 | | | < 0,04 | < 0,04 |
| 35 | 0,35 | | | < 0,04 | < 0,04 |

Если строки или графы таблицы выходят за формат страницы, ее делят на части, помещая одну часть под другой или рядом, при этом в каждой части таблицы повторяют ее головку и боковик. При делении таблицы на части допускается ее головку или боковик заменять соответственно номером граф и строк. При этом нумеруют арабскими цифрами графы и (или) строки первой части таблицы.

Если в конце страницы таблица прерывается и ее продолжение будет на следующей странице, в первой части таблицы нижнюю горизонтальную линию, ограничивающую таблицу, не проводят.

Графу «Номер по порядку» в таблицу включать не допускается.

Слово «Таблица» указывают один раз – справа над первой частью таблицы, над другими частями пишут «Продолжение таблицы» с указанием ее номера.

Если все показатели в графах таблицы выражены в одной и той же единице физической величины, то ее обозначение необходимо помещать над таблицей справа, а при делении таблицы на части – над каждой ее частью.

На все использованные источники в тексте расчетно-пояснительной записки должны быть ссылки. В список литературы включают все использованные источники, которые следует располагать в порядке появления ссылок в тексте расчетно-пояснительной записки. Номер ссылки указывается в тексте в квадратных скобках (например, припуск берется по справочнику [4]).

Оформление ссылок проводится в соответствие с требованиями ГОСТ Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка».

Оформление технологической документации на восстановление детали – маршрутной и операционных карт, карт эскизов – проводится согласно ГОСТ 3.1103-82, ГОСТ 3.1104-81, ГОСТ 3.1105-84, ГОСТ 2.109-73.

Каждая операционная карта сопровождается картой эскизов (по ГОСТ 3.1104-81, 3.1105-84 на форматах А4 по ГОСТ 2.301-68 прил. 1), на которой указывается базирование и крепление детали, способ нанесения материала при восстановлении, режущий инструмент, форма, шероховатость и размеры (с допусками) поверхностей после обработки на данной операции.

# 2. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

## 2.1. Порядок выполнения работы

При разработке технологического процесса восстановления детали осуществляется:

- изучение реальных сочетаний дефектов на деталях;
- обоснование и выбор способа восстановления;
- разработка маршрутного и операционного технологических процессов;
- выбор рациональной последовательности выполнения операций;
- выбор оборудования, приспособлений, материалов, инструмента;
- определение оптимальных режимов восстановления и обработки;
- нормирование затрат труда и материалов при соблюдении всех технических требований и обеспечения требуемого уровня качества, минимальных материальных и трудовых затрат.

При этом обеспечивается строгое соблюдение всех технических требований, заданный уровень качества продукции при минимальных материальных трудовых затратах.

При разработке технологического процесса восстановления детали *рекомендуется следующий порядок работы*:

- анализ технического состояния детали;
- анализ дефектов и оценка пригодности детали;
- выбор рациональных способов устранения дефектов и обеспечения необходимого ресурса детали (сравниваются не менее трех вариантов технологического процесса восстановления детали по соответствующим критериям);
- разработка технологического маршрута восстановления детали:
- расчет припусков;
- выбор оборудования, приспособлений, инструмента;
- расчет режимов обработки в соответствии с требованиями точности и шероховатости (для заданной поверхности);
- нормирование операций;
- назначение контрольных операций по технологическому процессу;
- оформление технологической документации на процесс восстановления детали.

*Исходной базовой информацией служат*:

- программа выпуска ремонтируемой сборочной единицы или узла;
- сборочный чертеж ремонтируемого узла;
- рабочий чертеж детали;
- информация о технологических процессах восстановления деталей;
- перечень дефектов;
- указания о применимости различных способов устранения дефектов;
- условия эксплуатации и режимов работы детали (узла).

## 2.2. Анализ технического состояния детали

Анализ технического состояния изношенной детали начинают с установления причин потери работоспособности при эксплуатации машины. Для этого изучается конструкция сборочной единицы, в которую входят детали, а также условия ее работы. После этого дается характеристика детали.

*Характеристика детали включает:*

- наименование детали;
- назначение детали, ее конструктивные особенности и местонахождение в узле;
- наименование и марку материала детали;
- вид термической обработки заданных для восстановления поверхностей, глубину обработки и твердость материала детали;
- технологические и механические свойства материала детали: возможность обработки резанием, давлением, сваркой, термической обработкой и пр.;
- габаритные размеры детали: длину, диаметр (ширину и высоту); массу детали;
- указываются основные и вспомогательные конструкторские базы, исполнительные поверхности;
- анализ допусков на размеры, формы и взаимного расположения поверхностей детали.

***Пример 2***

Деталь – вал ступенчатый, предназначенный для передачи крутящего момента от ступицы зубчатого колеса на внешнюю нагрузку, выполненный из материала сталь 45 ГОСТ 1051-98. Термообработка – нормализация, глубина обработки – 3 мм, твердость – 600 НВ.

Материал детали (сталь 45) может обрабатываться резанием, давлением, сваркой, термической обработкой и пр. Свойства материала детали, с учетом термообработки [4], приведены в табл. 2.1

Таблица 2. 1

**Механические свойства стали 45 после нормализации**

| | |
|---|---|
| Временное сопротивление растяжению, $\sigma_в$, МПа | 610 |
| Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа | 360 |
| Предел выносливости при растяжении, $\sigma_{-1р}$, МПа | 220 |
| Предел выносливости при изгибе, $\sigma_{-1и}$, МПа | 275 |
| Относительное удлинение, $\delta$, % | 16 |
| Относительное сужение, $\psi$, % | 40 |
| Ударная вязкость, *KCU,* кДж/м$^2$ | 450 |

Габаритные размеры детали: длина – 800 мм, диаметр – 40 мм. Масса детали – 7,83 кг.

Деталь работает в условиях динамической нагрузки.

## 2.3. Анализ дефектов и оценка пригодности детали

При анализе состояния детали, прежде всего, возникают вопросы: к какой группе должна быть отнесена деталь, и какие критерии использовать для этого?

К *первой* группе (годные для повторного использования) относят детали с износом в пределах допуска на изготовление или имеющих отклонения в пределах, допустимых техническими требованиями на дефектацию и ремонт, а также с незначительными повреждениями (мелкие царапины или вмятины).

Ко *второй* группе (подлежащие восстановлению) относят детали с износом, превышающим допустимые значения, или с повреждениями, устранение которых (с учетом служебного назначения детали) по техническим и экономическим соображениям целесообразно (табл. 2.2).

Таблица 2.2

**Дефекты второй группы и способы их устранения**

| Дефекты деталей и узлов | Способы устранения дефектов |
|---|---|
| Размеры деталей соответствуют чертежам или техническим требованиям на дефектацию и ремонт, но требуется доводка | Довести поверхности деталей до требуемой чистоты путем зачистки шкуркой, шлифования, полирования |
| Износ поверхностей деталей больше допустимого техническими требованиями на дефектацию и ремонт | Восстановить поверхности до требуемых размеров согласно чертежам основного производства или ремонтным чертежам способами: ремонтных размеров, электродуговая наплавка под слоем флюса и в среде защитных газов, вибродуговая наплавка, осталивание, хромирование, плазменное напыление, электроэрозионное наращивание, электромеханическое восстановление, заливка или наплавка цветным металлом, и др. с последующей механической обработкой |
| Детали, имеющие небольшие изгибы, вмятины | Восстановить поверхности механической обработкой |
| Трещины | Засверлить конец трещины, произвести ее разделку и заварку или заделку эпоксидной смолой |
| Деталь и ее элементы изогнуты | Удалить изгиб рихтовкой или правкой |
| Резьба на валу имеет забоины, вмятины, срыв одного витка | Удалить забоины, вмятины, прорезать плашкой или резцом |
| Износ и повреждение резьбы сверх допустимых норм | Удалить поврежденную резьбу, наплавить, произвести механическую обработку |
| Изношены или деформированы резьбовые отверстия | Переход на ремонтный размер; изготовить на новом месте; заварить и изготовить резьбу на том же месте и др. |
| Износ шпоночных пазов по ширине на валу и во втулке | При износе до 5 % исправить форму паза и изготовить усиленную шпонку с соблюдением характера посадки; с износом свыше 5 % восстановить сваркой или путем фрезерования паза на новом месте |

*Окончание табл. 2.2*

| Дефекты деталей и узлов | Способы устранения дефектов |
|---|---|
| Наличие на зубьях шестерен ступеней в результате износа, коррозии и забоин на зубьях | Исправление профиля зубьев фрезерованием или зубошлифованием |
| Износ зубьев сверх допустимых норм, а также: сколы на зубьях неответственных зубчатых колес | Наплавка или осталивание после предварительного исправления формы зубошлифованием, дополнительным корригированием |

К *третьей* группе (неподлежащие восстановлению – брак) относят детали с повреждениями, устранение которых (с учетом служебного назначения детали) технически невозможно или экономически нецелесообразно. К третьей группе относятся, прежде всего, детали с изломом и неисправимыми деформациями (например, кручения), табл. 2.3.

Таблица 2.3

**Признаки дефектов третьей группы (брак) для типовых деталей**

| Деталь | Признаки дефектов третьей группы (брак окончательный) |
|---|---|
| Валы и оси | Крупные трещины, излом, остаточные деформации |
| Зубчатые колеса | Сколы торцов и вершин на ряде зубьев, выкрашивание цементационного слоя, износ и поднутрение зубьев, в результате которых изношено свыше 80 % толщины цементационного слоя, износ зубьев свыше предельного |
| Подшипники качения | Трещины, выкрашивание колец и тел качения, цвета побежалости, коррозия, шелушение, раковины, выбоины на беговых дорожках и сепараторах, оспы и отслоения, неравномерный износ беговых дорожек, радиальные и осевые зазоры сверх допустимых значений |
| Шлицевые валы | Сколы и изломы шлицев |
| Шпоночные пазы на валу и во втулке | Сколы цементированных и закаленных пазов, износ свыше предельного |

Сведения, касающиеся дефектов детали, студент получает в задании на курсовую работу. Эти данные следует занести в таблицу (пример оформления приведен в табл. 2.4).

***Пример 3***

Основными поверхностями вала, подвергшимися износу, являются шейки под шариковый и роликовый подшипники. После ремонта размеры шеек должны отвечать требованиям рабочего чертежа:

– диаметр шейки под шариковый подшипник должен быть равен $90(^{+0,11}_{-0,11})$.

Размер соответствует 6-му квалитету точности с отклонением *js*, т. е. диаметр $90\,js6(^{+0,11}_{-0,11})$. Шероховатость поверхности шейки *Ra* 0,2 мкм соответствует 9-му классу шероховатости.

Диаметр шейки под роликовый подшипник должен быть $100_{-0,022}$. Размер соответствует 6-му квалитету с отклонением *h*, т. е. $100h6(^{0}_{-0,022})$. Шероховатость поверхности шейки *Ra* 0,8 мкм (7-й класс шероховатости);

– отклонение от цилиндричности шеек под подшипник должно быть не более 0,01 мм, радиальное биение их относительно оси не более 0,03 мм.

Необходимо выявить, какие дефекты детали являются устранимыми при ремонте. Детали, имеющие неустранимые дефекты, восстановлению не подлежат.

Первоначально следует определить абсолютный износ ($\Delta_1$**)** поврежденных поверхностей:

$$\Delta_1 = D_{ср} - P_ф\,, \qquad (2.1)$$

где $D_{ср}$ – средний номинальный размер; $P_ф$ – фактический размер данной поверхности, полученный в задании.

Полученные данные также следует занести в табл. 2.4.

Таблица 2.3

**Признаки дефектов третьей группы (брак) для типовых деталей**

| Деталь | Признаки дефектов третьей группы (брак окончательный) |
|---|---|
| Валы и оси | Крупные трещины, излом, остаточные деформации |
| Зубчатые колеса | Сколы торцов и вершин на ряде зубьев, выкрашивание цементационного слоя, износ и поднутрение зубьев, в результате которых изношено свыше 80 % толщины цементационного слоя, износ зубьев свыше предельного |
| Подшипники качения | Трещины, выкрашивание колец и тел качения, цвета побежалости, коррозия, шелушение, раковины, выбоины на беговых дорожках и сепараторах, оспы и отслоения, неравномерный износ беговых дорожек, радиальные и осевые зазоры сверх допустимых значений |
| Шлицевые валы | Сколы и изломы шлицев |
| Шпоночные пазы на валу и во втулке | Сколы цементированных и закаленных пазов, износ свыше предельного |

При анализе следует сопоставить фактические размеры ($P_ф$), полученные при измерении детали (приведены в задании) с предельными ($P_{пр}$), с тем, чтобы по анализируемому размеру отнести деталь к 1-й или 2-й группе, если деталь не имеет признаков окончательного брака, с которыми деталь относят к 3-й группе – (табл. 2.5).

Рекомендуемые нормы допустимых и предельных допусков на гладкие цилиндрические соединения приведены в таблице 2.5. Полученные данные также следует занести в таблицу анализа дефектов (см. табл. 2.4)**.**

Таблица 2.4

**Сведения о дефектах детали**

| Наименование дефекта | Номинальный размер, мм | Фактический размер, мм | Предельный размер, мм | Абсолютный износ на сторону, $\Delta_1$, мм | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|
| Прогиб вала | – | 0,11 | | | |
| Износ шейки вала | 90$js$6 | 119,4 | | | |
| Износ шейки вала | 100$h$6 | 149,6 | | | |

Таблица 2.5

**Рекомендуемые нормы предельных и допустимых допусков на гладкие цилиндрические соединения в системе отверстия**

| Элементы | Характер посадки | Номинальные | Предельные |
|---|---|---|---|
| Отверстие | - с зазором | $H$6 | $H$11 |
| | | $H$7 | $H$11 |
| | | $H$8 | $H$12 |
| | | $H$9 | $H$12 |
| | | $H$11 | 3$H$12 |
| | | $H$12 | 5$H$12 |
| | - переходные | $Js$7 | 1,5$F$7 |
| | | $Js$9 | $D$10 |
| Вал | - с зазором | $h$6 | $h$11 |
| | | $h$8 | $h$12 |
| | | $h$9 | 3$h$12 |
| | | $h$12 | 5$h$12 |
| | | $f$7 | $b$12 |
| | | $e$7 | 1,25 $b$12 |
| | | $e$8 | 1,5 $b$11 |
| | | $b$12 | 5,25 $b$12 |
| | | $d$8 | 1,5 $d$11 |
| | | $d$9 | 5 $d$9 |
| | - переходные | $n$6 | $h$6 |
| | | $m$6 | $h$6 |
| | | $k$6 | $g$6 |
| | | $k$7 | $f$8 |
| | | $js$6 | $f$7 |
| | - с натягом | $u$7 | $k$6 |
| | | $z$6 | $k$6 |
| | | $s$6 | $k$7 |
| | | $u$8 | $k$7 |
| | | $s$8 | $k$7 |
| | | $x$8 | $k$7 |

*Например,* для вала:
- $P_ф > P_{пр}$ – годные для повторного использования (1-я группа);
- $P_ф < P_{пр}$ – подлежат ремонту (2-я группа).

Для отверстия:
- $P_ф < P_{пр}$ – годные для повторного использования (1-я группа);
- $P_ф > P_{пр}$ – подлежат ремонту (2-я группа).

### *2.3.1. Валы и оси*

Предельный износ шеек валов и осей, установленных на подшипниках скольжения, приводится в табл. 2.6, а шеек, сопряженных с подшипниками качения, не превышает 0,1 мм.

Таблица 2.6

**Предельный износ элементов вала**

| Назначение вала | Номинальный диаметр шеек, мм | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 20 – 50 | 50 – 80 | 80 – 120 | 120 – 180 | 180 – 200 |
| Валы и оси для:<br>- зубчатых колес<br>- ходовых колес и опорных роликов | <br>0,3<br>0,5 | <br>0,4<br>0,7 | <br>0,6<br>1,0 | <br>0,8<br>1,2 | <br>1<br>1,4 |
| Оси для канатных блоков | 0,5 | 0,7 | 1,0 | 1,2 | 1,4 |

В сопряжениях типа вал-втулка предельный износ при посадках с зазором наступает после увеличения номинального зазора в 2 раза для ответственных соединений и в 3 – 4 раза для неответственных. При посадках с натягом предельный износ наступает в случае уменьшения натяга ниже максимально допускаемого.

### *2.3.2. Предельный прогиб вала*

Предельные допустимые значения прогиба вала составляют 0,15 мм на 1 м длины, но не более 0,3 мм на всю длину вала при частоте вращения меньше 8,3 $с^{-1}$ и 0,1 мм на 1 м длины и 0,2 мм на всю длину вала при частоте вращения больше 8,3 $с^{-1}$.

Прогиб валов и осей менее 0,5 мм устраняют шлифованием, до 0,01 длины вала – правкой в холодном состоянии, при прогибе 0,02 – 0,03 длины вала и более – правкой в нагретом состоянии при температуре 600 – 650 °С.

### *2.3.3. Зубчатые колеса*

Величины допустимых износов зубьев зависят от конструкции, условий работы зубчатых колес. В общем случае для зубчатых колес горных машин допустимый износ зубьев принимают в пределах 8 – 15 % их толщины, причем меньшее значение износа для зубьев быстроходных и сильнонагруженных зубчатых передач, большее – для тихоходных и малонагруженных.

В процессе износа зубчатых колёс изменяется толщина зуба и искажается его форма, что приводит к увеличению нагрузки на зубья при одновременном снижении их сопротивлению изгиба.

В связи с этим предельный износ зубьев стальных зубчатых колёс, работающих при окружных скоростях 3 м/с, принимают равным 3 – 10 % толщины зуба, измеряемой по начальной окружности (табл. 2.7).

Предельный износ тихоходных зубчатых колес наступает при достижении им 30 % по начальной окружности, быстроходных – 3 – 10 %. Для чугунных зубчатых колес эти цифры снижаются на 40 %. Если в зубьях есть упрочненный слой, то предельный износ наступает после его срабатывания до толщины слоя 0,2 – 0,25 мм.

В зубчатых колесах с цементированными зубьями выбраковочным признаком является растрескивание и выкрашивание цементированного слоя. Появление признаков выкрашивания последнего практически соответствует моменту его полного износа. Обычно при толщине цементированного слоя зубьев 1 мм наибольший износ не должен превышать 0,8 толщины этого слоя и 10 % толщины зуба. В табл. 2.7 приведены значения предельного износа зубьев зубчатых колес горного и строительного оборудования.

Таблица 2.7

**Предельный износ зубьев зубчатых колес**

| Характер передачи мощности | Окружная скорость, м/с | Предельный износ, процент номинальной толщины зуба для ремонта | |
|---|---|---|---|
| | | текущего | капитального |
| Длительный в одном направлении | 2 | 12 – 15 | 25 – 30 |
| | 4 | 10 – 12 | 20 – 25 |
| | 5 | 8 – 10 | 15 – 20 |
| С частым реверсированием | 2 | 10 – 12 | 20 – 25 |
| | 4 | 9 – 11 | 15 – 20 |
| | 5 | 6 – 8 | 12 – 15 |

*Примечание.* Для чугунных зубчатых колес данные уменьшаются на 30 %.

Износ зубьев цементированных шестерен определяется в зависимости от толщины слоя цементации. Предельная величина износа в этих передачах берется такой, при которой толщина слоя цементации на зубьях остается не менее 0,2 – 0,25 мм. При этом возможны варианты:

а) зубья цементированы или закалены с нагревом ТВЧ. Предельный износ определяется в зависимости от глубины цементационного или закаленного поверхностного слоя:

$$\delta_{пр.} = 0{,}8 \cdot \delta_{ц}, \text{ мм},$$

где $\delta_{пр}$ – предельная глубина износа упрочненного поверхностного слоя зуба; $\delta_{ц}$ – глубина упрочненного слоя, мм.

б) зубья сырые или улучшенные (закалка с высоким отпуском). Предельный износ в этом случае принимается в зависимости от запаса прочности по изгибу:

$$\delta_{пр} = (0{,}1 – 0{,}24)m; \text{ или } \delta_{пр} = 0{,}25 \cdot S_c,$$

где $\delta_{пр}$ – предельный износ зуба с одной стороны, мм; $S_c$ – номинальная толщина зуба по постоянной хорде, мм; $m$ – модуль зуба, мм.

Предельные износы зубьев червячных передач составляют 8 – 10 % для червяков и 10 - 12 % для червячного колеса.

### *2.3.4. Цементированные шлицы*

Среднее уменьшение толщины каждого шлица на рабочей длине соединения для вала или втулки допускается не более 0,2 мм при диаметре вала до 50 мм и не более 0,3 мм – при диаметре вала более 50 мм. При этом неравномерность износа допустима в пределах до 0,1 мм на 100 мм длины шлица. В шлицевых соединениях допускается увеличение бокового зазора, но не более 2 – 2,5 % значения, указанного в чертежах.

Предельный износ по толщине цементированных шлицев соответствует, мм:

$$\delta_{пр} = (0{,}2 - 0{,}4)\ \delta_{ц},$$

где $\delta_ц$ – глубина цементационного слоя, мм.

Предельный износ улучшенных шлицев эвольвентного профиля составляет, мм:

$$\delta_{пр} = (0{,}06 - 0{,}1)\ m;$$

а прямобочных – $\delta_{пр} = (0{,}03 - 0{,}05)\ b,$

где $b$ – толщина шлицев, мм.

Износ центрирующих диаметров шлицев в отверстии $H8$ или $H9$ допускается до верхнего отклонения $H10$. Износ центрирующих диаметров шлицов на валах $h6$ допускается до нижнего отклонения $h9$; $h7$ – до нижнего отклонения $h10$ и $f7$ – до нижнего отклонения $f10$.

### *2.3.5. Шпоночные пазы*

Боковой зазор в шпоночном соединении не допускается. При креплении с помощью шпонки детали не должны покачиваться на валу.

Для шпоночных пазов допустим износ (разбивка) по ширине в пределах 5 % номинального размера паза. В этом случае механической обработкой исправляют форму паза и используют усиленную шпонку. За пределами большего износа переход на усиленную шпонку недопустим.

Зазоры между верхней гранью шпонки и ступицей шпоночных соединений при диаметре вала 20 – 40 мм составляют 0,1 ÷ 0,3 мм; при 41- 80 мм – 0,1 ÷ 0,4 мм; свыше 80 мм – 0,1 ÷ 0,5 мм.

Шпоночные пазы, имеющие незначительный износ, обрабатывают под ремонтный размер, который не должен превышать номинальный более чем на 15 %. Соответственно изменяется и размер шпонки.

Ниже для иллюстрации материала приводятся примеры.

***Пример 4***

Диаметр шейки вала равен $100n6(^{+0,045}_{-0,023})$. Средний номинальный размер $D_{ср}$ составляет (100,045 + 100,023)/2 = 100,034. Из данных табл. 2.5 следует, что за предельную величину износа вала при посадке $n6$ следует принять размер, соответствующий $h6$, т. е. диаметр $100n6(^{0}_{-0,022)})$ мм. Тогда средний предельный размер равен (100,000 + 99,978)/2 = 99,989 мм.

Значение фактического диаметра $P_ф$ (согласно заданию) равно 99,030 мм. Сопоставляя фактический размер 99,030 со средним предельным – 99,989, видно, что фактический размер вышел за рамки предельного размера. Следовательно, вал соответствует второй группе и подлежит восстановлению.

Полученные данные заносим в табл. 2.8.

При этом абсолютный линейный износ вала на сторону составляет

$$\Delta_1 = [D_{ср} - P_ф]/2 = [(100,045 + 100,023)/2 - 99,030]/2 = 0,5 \text{ мм}.$$

***Пример 5***

По результатам измерений зубьев толщиной $S_с = 16,64^{-0,41}_{-0,77}$ фактическая ширина зубьев ($S_ф$) составляет 14,30 мм. Предельный износ зуба равен

$$И_{пр} = 2\delta_{пр} = 0,25 \cdot S_с = 0,25\ (16,23+15,87)/2 = 4,0125 \text{ мм}.$$

Тогда предельная ширина зуба составит:

$$S_{пр} = S_с - И_{пр} = (16,23+15,87)/2 - 4,0125 = 16,05 - 4,0125 = 12,037 \text{ мм}.$$

При этом абсолютное уменьшение толщины зуба составит

$$\Delta = S_с - S_ф = 16,05 - 14,30 = 1,75 \text{ мм}.$$

**Вывод:** поскольку $S_ф > S_{пр}$, размер зубьев находится в пределах допустимых значений, деталь относится к 1-й группе, т. е. годна без восстановления.

Таблица 2.8

**Анализ дефектов детали**

| Наименование дефекта | Номинальный размер, мм | Фактический размер, мм | Предельный размер, мм | Абсолютный износ на сторону, $\Delta_1$, мм | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|
| Износ шейки вала | $100n6\left(^{+0,045}_{+0,023}\right)$ | 99,030 | $100h6\left(^{0}_{-0,022}\right)$ | 1,004 | $P_ф < P_{пр}$ подлежит ремонту |
| Износ … | | | | | |

***Пример 6***

Дан шлицевой вал с центрирующим внутреннем диаметром $36e8^{-0,055}_{-0,089}$). Из данных табл. 2.5 следует, что за предельную величину износа вала при посадке $e8$ следует принять размер, соответствующий $1,5b11(^{-0,170}_{-0,330})$, т. е. размеру

$36(^{-0,255}_{-0,495})$мм. Фактический диаметр $P_ф$ в месте наибольшего износа составил 34,14 мм. Из сопоставления размеров видно, что износ превышает предельный. Абсолютный максимальный износ шлицев по внутреннему диаметру составил

$$\Delta_1 = (35{,}950+35{,}911)/2 - 34{,}140 = 1{,}79 \text{ мм}.$$

Выбор способа восстановления определяется аналогично примеру 3. Проанализируем параметр «*b*» (толщина шлица). Размер по чертежу равен:

$7f8(^{-0,013}_{-0,035})$, тогда $b_{ср} = (6{,}987+6{,}965)/2 = 6{,}976$ мм.

Принимаем предельный износ по толщине шлица равным $0{,}05 \cdot b$. Тогда предельная толщина шлица $b_{пр} = b_{ср} - 0{,}05 \cdot b = 6{,}976 - 0{,}05 \cdot 7 = 6{,}626$ мм, принимаем $b_{пр} = 6{,}23$. Фактическая толщина шлица $b_ф = 6{,}15$ мм.

Сопоставляя фактический размер с предельным, убеждаемся, что шлицы подлежат восстановлению. С учетом размеров, целесообразным способом восстановления можно признать вибродуговую наплавку на боковые поверхности шлицев. Данный способ исключает высокий нагрев, фазовые и структурные изменения в материале детали.

Износ по ширине шлица составит:

$$И_{iш} = b_{ср} - b_ф = 6{,}976 - 6{,}150 = 0{,}826 \text{ мм}.$$

***Пример 7***

Шпоночный паз с размером по чертежу $16H9$ ($^{+0,043}$). Фактическая ширина паза 16,93 мм. Следовательно, износ паза по ширине составляет

$$\Delta_1 = b_ф - b_{ср} = 16{,}93 - (16{,}000 + 16{,}043)/2 = 0{,}909 \text{ мм}.$$

Предельный износ паза соответствует величине

$$b_{пр} = b_{ср} + 0{,}05 \cdot b = 16{,}021 + 0{,}05 \cdot 16 = 16{,}021 + 0{,}80 = 16{,}821 \text{ мм}.$$

Сопоставляя фактический и предельный размеры, убеждаемся, что износ паза выше предельного. Паз можно заплавить и профрезеровать на новом месте.

## 2.4. Выбор способа восстановления деталей

### *2.4.1. Особенности технологического процесса восстановления деталей*

В отличие от технологического процесса изготовления деталей, процесс их восстановления имеет специфические *особенности*. При изготовлении сырьем для готовой детали служит заготовка, в то время как при восстановлении заготовкой является сама деталь с измененными размерами, формой и свойствами материала.

*Целью* технологического процесса восстановления деталей является возвращение детали утраченной работоспособности.

*Задачей* проектирования технологического процесса восстановления деталей является выбор наиболее рационального способа, обеспечивающего необходимую долговечность детали при наименьшей стоимости ее восстановления в условиях данного предприятия.

Поверхности деталей могут быть восстановлены, как правило, несколькими способами. Наиболее прогрессивными являются способы, основанные на нанесении покрытия на поверхность детали.

Выбор рационального способа восстановления зависит от конструктивно-технологических особенностей деталей (формы и размера, материала и термообработки, поверхностной твердости и шероховатости), от условий ее работы (характера нагрузки, рода и вида трения) и величины износа, а также стоимости восстановления.

Для учета всех этих факторов выбор способа восстановления детали рекомендуется вести последовательно с *использованием трех критериев:*

- технологического критерия или критерия применимости;
- технического критерия или критерия долговечности;
- технико-экономического критерия.

Рассмотрим их по порядку.

### *2.4.2. Технологический критерий*

Знание структурных характеристик деталей, условий их работы и эксплуатационных свойств способов ремонта позволяет, в первом приближении, решить вопрос о применимости того или иного из них для восстановления отдельных деталей. При помощи такого анализа можно установить, какие из деталей могут восстанавливаться всеми или несколькими способами и какие по своим структурным характеристикам допускают только один способ восстановления.

Технологический критерий (критерий применимости) учитывает, с одной стороны, особенности подлежащих восстановлению поверхностей деталей, а с другой – технологические возможности соответствующих способов восстановления, т. е. определяет принципиальную возможность применимости того или иного способа восстановления к конкретным деталям (табл. П4.1 и П4.2).

Технологический критерий не может быть выражен числом и является по существу предварительным, поскольку при его помощи нельзя решить вопрос выбора рационального способа восстановления деталей, если этих способов может быть несколько.

Происходит сравнение технологических возможностей способов ремонта с теми требованиями, которые выдвигает данный дефект детали. Так, например, при помощи данного критерия заранее можно сказать, что детали небольшого диаметрального размера, имеющие высокую поверхностную твердость и незначительные износы (стержни клапанов и толкателей, шейки валов коробки передач под подшипники качения и т. п.), нерационально восстанавливать металлизацией и наплавками – ручной электродуговой и автоматической под слоем флюса. Внутренний диаметр 20 мм невозможно восстановить автоматизированной наплавкой, а коррозию поверхности не восстановить пластическим деформированием.

Отобранные по этому критерию способы восстановления должны удовлетворять трём условиям:

1) по своим технологическим особенностям они должны быть приемлемы к данной детали;

2) устранять имеющиеся дефекты;

3) способность данного способа восстановления обеспечить требуемую толщину наносимого покрытия

$$t_{тр} < t_{м}, \quad (2.2)$$

где $t_{тр}$ – требуемая толщина наносимого покрытия на сторону, мм;

$t_{м}$ – толщина наносимого покрытия на сторону, обеспечиваемая данным методом (табл. П4.3).

Требуемую толщину наносимого покрытия можно примерно оценить следующим образом:

$$t_{тр} = \delta_{max} + Z, \quad (2.3)$$

где $\delta_{max}$ – максимальный износ поверхности на сторону;

$Z$ – суммарный припуск на сторону на механическую обработку (табл. П4.3).

***Пример 8***

Оценить с позиций технологического критерия восстановления внешней цилиндрической поверхности 45*k*7, изношенной до 44,4 мм. Вал работает в условиях динамических нагрузок.

*Для восстановление детали можно применить нескольких способов*:

- Осталивание.

Обладает хорошими технико-экономическими показателями, высокой производительностью и относительной дешевизной.

- Хромирование.

Обладает хорошими технико-экономическими показателями, высокой поверхностной твердостью и износостойкостью.

- Наплавка в среде защитного газа.

В качестве защитной среды используется углекислый газ или водяной пар. Обеспечивает восстановление стальных и чугунных деталей диаметром более 12 мм, работающих в различных условиях. Восстановлению подлежат как гладкие, так и шлицевые валы.

- Плазменная наплавка.

Обеспечивает восстановление стальных и чугунных ответственных деталей.

- Газопламенное напыление (металлизация).

Наружные и внутренние цилиндрические поверхности неподвижных сопряжений при невысоких требованиях к прочности сцепления с основным материалом. Обеспечивает восстановление изношенных мест под неподвижные и подвижные посадки. Ограниченное применение для деталей, испытывающих динамические нагрузки.

- Наплавка под слоем флюса.

Наплавка деталей диаметром более 50 мм при повышенных требованиях к качеству наплавленного материала с толщиной наплавленного слоя более 1 мм.

Поскольку вал работает в условиях динамических нагрузок, то способ восстановления металлизацией (газопламенным напылением) не подходит.

Наплавка под слоем флюса также не подходит, так как диаметр вала меньше 50 мм.

Оставшиеся способы проверяем по толщине наносимого покрытия. Износ поверхности на сторону: $\Delta_1 = (45 - 44{,}4)/2 = 0{,}3$ мм. Суммарный припуск на сторону на механическую обработку $Z$ берем согласно таблице П4.3. Полученные результаты заносим в табл. 2.9.

Таблица 2.9

**Выбор способов восстановления по технологическому критерию**

| Способ восстановления | $t_м$, мм | $Z$, мм | $t_{тр}$, мм | $t_{тр} < t_м$, |
|---|---|---|---|---|
| Осталивание | 3,0 | 0,1 | 0,4 | Да |
| Хромирование | 0,3 | 0,1 | 0,4 | Нет |
| Наплавка в среде углекислого газа | 3 | 2 | 2,3 | Да |
| Плазменная наплавка | 4 | 2 | 2,3 | Да |

Из анализа таблицы следует, что при износе вала 0,3 мм на сторону его можно восстановить наплавкой в среде углекислого газа, плазменной наплавкой и осталиванием, но нельзя восстановить хромированием. Хромирование не проходит отбор по данному критерию.

### *2.4.3. Технический критерий (критерий долговечности)*

Технический критерий, в отличие от критерия применимости, численно выражается через коэффициент долговечности для каждого из способов восстановления и каждой конкретной детали (табл. П4.4, П4.5). Долговечность деталей, восстановленных теми или иными способами, зависит от эксплуатационных свойств покрытия. Наиболее рациональными способами будут те из них, которые обеспечивают наибольшую долговечность восстановленной детали.

После отбора способов, которые могут быть применены для восстановления той или иной изношенной поверхности детали, исходя из технологических соображений, отбирают те из них, которые обеспечивают наибольший последующий межремонтный ресурс этих поверхностей, т. е. удовлетворяют требуемому значению коэффициента долговечности $K_д$.

Коэффициент долговечности $K_д$ в общем случае является функцией трех других коэффициентов:

$$K_д = f(K_и\, K_в\, K_{сц}), \qquad (2.4)$$

где $K_и$ – коэффициент износостойкости; $K_в$ – коэффициент выносливости; $K_{сц}$ – коэффициент сцепляемости.

Для численного выражения критерия долговечности необходимо рассмотреть сравнительные характеристики эксплуатационных свойств способов.

В табл. П4.5 представлены значения коэффициентов износостойкости, выносливости и сцепляемости для наиболее распространенных методов восста-

новления. Коэффициент долговечности $K_д$ численно принимается равным значению того коэффициента, который имеет наименьшую величину.

При выборе способов восстановления применительно к деталям, не испытывающим в процессе работы значительных динамических и знакопеременных нагрузок, численное значение коэффициента долговечности определяется только численным значением коэффициента износостойкости.

Чтобы обеспечить работоспособность восстановленной детали в течение всего межремонтного периода, коэффициент долговечности должен превышать значение 0,8 (больше не требуется). Поэтому из числа способов, отобранных по технологическому критерию, к дальнейшему анализу принимаются те, которые обеспечивают коэффициент долговечности восстановленных поверхностей не менее 0,8.

***Пример 9***

Рассмотрим способы восстановления коленчатого вала диаметром 80$h$9, прошедшие технический критерий. Данные сведены в табл. 2.10.

Таблица 2.10

**Выбор способов восстановления по техническому критерию**

| Способ восстановления | Коэффициенты | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $K_и$ | $K_в$ | $K_ц$ | $K_д$ |
| Осталивание | 0,9 – 1,2 | 0, 8 | 0,65 – 0,8 | 0,7 |
| Наплавка в среде углекислого газа | 0,85 | 0,9 – 1,0 | 1,0 | 0,9 |
| Плазменная наплавка | 1,0 – 1,5 | 0,8 – 1,3 | 1,0 | 0,9 |
| Постановка дополнительной детали | 1,0 | 0,8 | 1,0 | 0,8 |

Способ восстановления коленчатого вала осталиванием не подходит, так как $K_д < 0,8$.

### *2.4.4. Технико-экономический критерий*

Первые два критерия выражают техническую часть задачи без учета экономической целесообразности того или иного способа. Поэтому необходима еще оценка способов восстановления при помощи экономического критерия, определяемого стоимостью восстановления деталей. Окончательное решение вопроса выбора рационального способа производится при помощи технико-экономического критерия, связывающего долговечность детали с экономикой ее восстановления.

Из всех прошедших отбор по техническому и технологическому критериям способов выбирают тот, у которого коэффициент экономической эффективности ($K_{эф}$) будет наименьшим

$$K_{эф} = C_у / K_д , \qquad (2.5)$$

где $K_д$ – коэффициент долговечности восстановленной поверхности; $C_У$ – удельная себестоимость восстановления, руб/м$^2$ (табл. П4.6).

Полученные результаты следует занести в таблицу.

***Пример 10***

Рассмотрим способы восстановления шпоночного паза шириной 5 мм, прошедшие технический и технологический критерии (табл. 2.11).

Минимальное значение $K_{эф}$ = 500 соответствует хромированию. Следовательно, выбираем данный способ.

Предварительно отобранные методы восстановления для каждого дефекта по техническому, технологическому и технико-экономическому критериям рекомендуется свести в таблицу и ранжировать по значению технико-экономического показателя. Заканчивается анализ окончательным выбором способа восстановления всей детали, в наибольшей степени удовлетворяющего всем трем критериям.

Таблица 2.11

**Сравнение способов восстановления**

| Способ восстановления | $C_у$, руб/м$^2$ | $K_д$ | $K_{эф}$ |
|---|---|---|---|
| Вибродуговая наплавка | 800 – 1000 | 0,82 | 1451,6 |
| Плазменное напыление | 1000 – 1400 | 0,5 | 2400 |
| Электромеханическая обработка | 800 – 900 | 1,1 | 727,8 |
| Хромирование | 400 – 900 | 1,3 | 500 |

***Пример 11***

Из проведенного анализа заданной детали для каждого вида дефекта был выбран способ восстановления, прошедший технический, технологический и технико-экономический критерии. Для окончательного выбора способа восстановления всей детали, в наибольшей степени удовлетворяющего всем трем критериям, данные сведены в табл. 2.12.

Таблица 2.12

**Выбор способа восстановления по техническому критерию**

| Дефект поверхности | Выбранный способ восстановления | $K_{эф}$ |
|---|---|---|
| Износ шейки вала | Наплавка под слоем флюса | 1625 |
| Износ шпоночного паза | Вибродуговая наплавка | 1451 |
| Срыв двух ниток резьбы | Плазменное напыление | 2400 |

Окончательно, для восстановления всей детали, выбираем вибродуговую наплавку, так как ей соответствует минимальное значение коэффициента экономической эффективности.

### *2.4.5. Рекомендации по выбору способов восстановления деталей*

По результатам работы ремонтных предприятий можно дать некоторые общие рекомендации по выбору рациональных способов восстановления деталей, применительно к различным видам сопряжений.

Для деталей *неподвижных соединений* при нанесении слоя толщиной 0,02 – 0,08 мм целесообразно применять электроискровое наращивание и осталивание.

Для деталей *подвижных соединений:*

- работающих в условиях трения-скольжения, при нанесении слоя толщиной до 1 мм, рационально хромирование и твердое осталивание;
- при толщине нанесения до 2 мм лучше всего вибродуговая наплавка и металлизация; при восстановлении деталей, входящих в группу подвижных соединений и работающих в условиях трения-качения;
- при толщине нанесения слоя 2,5 – 3 мм рекомендуется применять вибродуговую наплавку;
- при толщине нанесения слоя свыше 3 мм – автоматическую электродуговую сварку под слоем флюса или вибродуговую наплавку.

## 2.5. Разработка маршрута восстановления детали

При разработке технологического маршрута ремонта следует выбрать методы восстановления и обработки поверхностей, определить состав и содержание операций, в том числе назначить число и последовательность переходов, а также определить тип применяемого оборудования. В курсовой работе разрабатывается технологический процесс, исходя из необходимости устранения всех дефектов детали.

Разработка технологического маршрута может быть представлена следующей схемой:

1. Если технологические базовые поверхности детали нарушены или отсутствуют, то в первую очередь необходимо их обработать.
2. Затем восстанавливают другие поверхности в последовательности, обратной их степени точности.
3. Заканчивается обработка поверхностью, которая является наиболее точной и имеет наибольшее значение для детали.
4. При наличии термической или химико-термической обработки, она выделяется в отдельную операцию.
5. Контрольные операции выполняют в конце технологического процесса ремонта детали, и после выполнения наиболее ответственных операций.

Другими словами, первоначально выполняются работы по восстановлению базовых поверхностей, затем грубые и черновые (сварка, наплавка, обдирка и т. п.) и, наконец, чистовые отделочные операции. В начале технологического процесса выполняют подготовительные операции: очистку, обезжиривание, правку и восстановление базовых поверхностей.

Следует иметь в виду, что перед нанесением покрытия необходимо проводить механическую обработку поверхности детали, чтобы пространственно разделить межфазную границу «покрытие-деталь» и плоскость действия наибольших касательных напряжений. В противном случае, при дальнейшей механической обработке или при эксплуатации может произойти локальное или

полное отделение покрытия от детали, что сведет на нет все усилия по её восстановлению.

Затем производят наращивание изношенных поверхностей (наплавку, металлизацию и др.). При этом в первую очередь выполняют операции, связанные с нагревом детали до высокой температуры (сварку, наплавку, термическую обработку). Затем выполняют операции, не требующие нагрева деталей (хромирование, осталивание и др.). После «наращивания» выполняют операции механической обработки ремонтируемых деталей.

Необходимо учитывать, что *механическая обработка в условиях ремонтного производства имеет ряд особенностей:*

- нестабильность физико-механических свойств по поверхности восстанавливаемой детали и неравномерность припусков на обработку;
- значительную твердость и хрупкость большинства видов покрытий.

Полученные данные рекомендуется свести в таблицу. В качестве примера в табл. 2.13 приведен вариант технологического маршрута восстановления коленчатого вала двигателя автомобиля, размеры шеек которого вышли за пределы «последнего» ремонтного размера, поэтому их восстанавливают наплавкой.

Таблица 2.13

**Технологический маршрут восстановления коленчатого вала**

| Номер операции | Наименование | Содержание операции | Оборудование |
|---|---|---|---|
| 05 | Моечная | Промыть и очистить | Моечная машина |
| 10 | Дефектовочная | Выявить трещины на шейках вала | Магнитоэлектрический дефектоскоп |
| 15 | Слесарная | Править вал | Пресс |
| 20 | Токарная | Расточить отверстие под подшипник | Токарный станок |
| 25 | Запрессовывание | Запрессовать втулку в отверстие под подшипник | Пресс |
| 30 | Токарная | Расточить отверстие во втулке | Токарный станок |
| 35 | Наплавочная | Наплавить шатунные и коренные шейки | Установка для автоматической наплавки |
| 40 | Круглошлифовальная | Шлифовать шейки вала предварительно (начерно) | Круглошлифовальный станок |
| 45 | Круглошлифовальная | Шлифовать шейки вала окончательно (начисто) | Круглошлифовальный станок |

Для ремонта детали составляют обычно несколько вариантов маршрутного технологического процесса (обычно 2 – 3 варианта), сопоставив которые, выбирают оптимальный. Варианты могут отличаться методами восстановления и обработки поверхностей, технологическими базами, последовательностью

восстановления и обработки поверхностей и выполнения операций, применяемым оборудованием и др.

Одним из критериев выбора маршрута технологического процесса служит анализ точности ремонта, в соответствии с которым для реализации принимают маршрут, обеспечивающий получение детали с заданными параметрами качества (точности).

## 2.6. Расчет припусков при восстановлении детали

При назначении режимов обработки восстанавливаемых поверхностей деталей машин необходимо рассчитать толщину снимаемого слоя при удалении износа с поверхности детали и значение величины наносимого слоя, компенсирующего износ и обеспечивающего получение номинального размера поверхности детали ($D_н$), с заданными требованиями по точности и шероховатости.

Расчётная схема при определении величины слоя наносимого материала при восстановлении работоспособности поверхности (наружной цилиндрической) приведена на рис. 2.1.

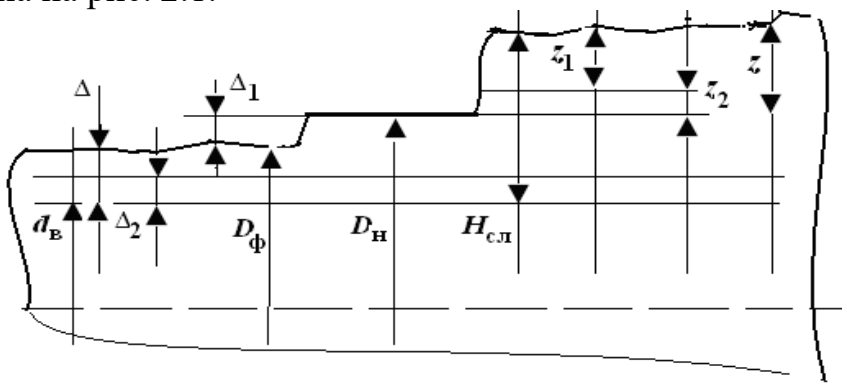



Рис. 2.1. Схема расчета наносимого слоя при восстановлении поверхности: $H_{сл}$ – толщина слоя наносимого материала; Δ – толщина снимаемого слоя; $Δ_1$ – величина износа; $Δ_2$ – толщина дефектного слоя материала; $z$ – припуск на механическую обработку, $z_1$ – припуск на черновую обработку; $z_2$ – припуск на чистовую обработку; $d_в$ – диаметр поверхности, подготовленной к восстановлению, $D_н$ – номинальный размер; $D_ф$ – фактический размер

Толщина наносимого слоя $H_{сл}$ зависит от требований по точности и шероховатости размера восстанавливаемой поверхности и определяется величиной толщины снимаемого слоя Δ и припуском на последующую механическую обработку $z$:

$$H_{сл} = Δ + z\ . \qquad (2.6)$$

Толщина снимаемого слоя с изношенной поверхности перед восстановлением определяется износом поверхности $Δ_1$ и толщиной дефектного слоя $Δ_2$. Толщина дефектного слоя принимается равной $0{,}1Δ_1$. Тогда

$$Δ = Δ_1 + Δ_2 = Δ_1 + 0{,}1Δ_1 = 1{,}1\ Δ_1. \qquad (2.7)$$

Припуск на механическую обработку $z$ включает в себя припуски на черновую $z_1$ и чистовую $z_2$ обработки (табл. П4.6, П4.7). Припуски на черновую $z_1$

и чистовую $z_2$ обработки определяются в зависимости от требований по точности и шероховатости номинального размера поверхности и во многом зависят от способа устранения дефекта поверхности (сварка, наплавка, металлизация, электролитические покрытия и т. д.).

Таким образом, величина слоя материала, наносимого на изношенную поверхность, зависит от величины износа, квалитета точности и класса шероховатости номинального размера поверхности и способа восстановлении износа. Как правило, чем ниже квалитет точности поверхности и выше класс шероховатости поверхности, тем величина слоя материала, наносимого на изношенную поверхность, больше (требуется большее количество переходов при обеспечении номинального значения размера, восстанавливаемой поверхности).

Значения всех припусков сводятся в таблицу. Полученное значение величины толщины наносимого слоя $H_{сл}$ для всех способов восстановления, кроме электрохимического и химического, округляется в большую сторону до целого числа $H^*_{сл}$. Увеличение величины $H^*_{сл}$ следует учесть при расчетах режимов резания.

# 3. ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ

## 3.1. Требования к материалам

Восстановление изношенной поверхности детали предполагает нанесение покрытия, основные эксплуатационные свойства которого близки к свойствам изношенного слоя. Обычно используют тот же материал, из которого изготовлена восстанавливаемая деталь. Исключение составляет чугун. При восстановлении деталей из чугуна используется сталь 20.

Формирование на изношенной поверхности покрытия, полностью идентичного по химическому составу, структуре и свойствам изношенному слою, является, как правило, технически сложной и экономически нецелесообразной задачей. Поэтому нанесенные покрытия значительно отличаются от металла изношенного слоя.

При выборе материала для защитного покрытия руководствуются следующей исходной информацией:

– воздействию каких видов изнашивания подвержена деталь;

– из какого материала изготовлена деталь;

– какой технологический процесс предпочтителен;

– каковы свойства восстановленной поверхности;

– какова допустимая стоимость восстановления.

Определяющими являются эксплуатационные свойства поверхностного слоя детали, которые, в свою очередь, зависят от условий эксплуатации и характера разрушения. Условия работы восстанавливаемых и упрочняемых деталей разнообразны (табл. 3.3 [1]).

Для обеспечения высокой стойкости против разрушения при различных видах изнашивания наплавленный металл по структуре и свойствам должен отвечать требуемым свойствам. Свойства материала определяются химическим составом и структурой.

## 3.2. Металлическая проволока и лента

*Стальная сварочная проволока* согласно ГОСТ 2246-70 делится на низкоуглеродистую, легированию и высоколегированную. Предусмотрено 77 марок проволок диаметром 0,3–12 мм. Проволоку применяют для наплавки, электроконтактной приварки и газотермического напыления [1].

Для механизированной наплавки по ГОСТ 10543-98 выпускается специальная *наплавочная проволока* типа Нп диаметром 0,3; 0,5; 0,8; 1,2; 1,4; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0; 4.0; 5,0; 6,5 и 8,0 мм. Наплавочная проволока разделена на три группы: из углеродистых сталей, из легированных сталей и высоколегированных сталей (табл. 3.7 [1]). На практике в наплавочных работах находит также применение стандартная сварочная проволока по ГОСТ 2246-70 и проволока, предназначенная для изготовления пружин по ГОСТ 9389-75.

*Проволока для напыления.* Для газотермических покрытий применяют сварочную и наплавочную (Св-О8Г2С, Св-07Х19Ц9ТЮ, НП-65Г, НП-4ОХ13 и

др.) проволоку. За рубежом ряд фирм выпускают специальную проволоку для газотермических покрытий. Фирма «Metco» (в настоящее время «Sulzer Metco», Швейцария) длительное время занимается разработкой технологии и проволочных материалов для газотермических покрытий (табл. 3.8 [1]).

### 3.3. Штучные электроды и прутки

*Наплавочные покрытые электроды* представляют собой электродный стержень с толстым электродным покрытием. Как правило, для электродного стержня применяют низкоуглеродистую сварочную проволоку, а требуемый химический состав наплавки формируется за счет легирующих порошков, вводимых в электродное покрытие. Электроды применяют для ручной электродуговой наплавки различных деталей. Предпочтительна наплавка на постоянном токе обратной полярности. Реже применяется наплавка на переменном токе.

В группу электродов для наплавки входят электроды, предназначенные для ручной дуговой наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами. Электроды изготовляют и поставляют в соответствии с требованиями ГОСТ 9466-75 и 1005-75. Для наплавочных работ в некоторых случаях также используют сварочные электроды, например электроды, предназначенные для сварки высоколегированных коррозионностойких и жаропрочных сталей.

Согласно ГОСТ 10051-75 электроды для наплавки по химическому составу наплавленного металла и твердости при нормальный температуре классифицированы на 44 типа [1].

К группе электродов для сварки и наплавки чугуна относятся электроды, предназначенные для устранения дефектов в чугунных отливках с помощью холодной сварки и наплавки, а также электроды, используемые при ремонте вышедшего из строя оборудования и восстановлении изношенных деталей. В табл. 3.11 [1] представлены электроды, которые применяются для сварки и наплавки алюминиевых, медных и никелевых сплавов.

*Наплавочные прутки.* Прутки применяют в основном для газопламенной и аргонодуговой наплавки в качестве присадочных материалов без приложения к ним электрического напряжения. Прутки получают литьем. Их изготовляют диаметром 4; 6; 8; 10: 12; 14 и 16 и длиной 250; 300; 350; 400; 450 и 500 мм.

Литые прутки используют также для изготовления покрытых электродов для ручной дуговой наплавки (табл. 3.12 [1])), например, марки ГН-1 со стержнем из сплава Сормайт и ЦН-2 со стержнем из стеллита ВЗК.

Присадочные прутки, используемые при сварке чугуна, в зависимости от назначения (ГОСТ 2671-70) ШИКП марки ПЧ1, ПЧ2, ПЧН1, ПЧН2 и др.

### 3.4. Порошки

Номенклатура порошковых материалов для наплавки и напыления включает металлические и композиционные порошки, порошковые смеси, тугоплавкие соединения (рис. 3.6 [1]).

В табл. 3.15 [1] представлены марки порошков высокоуглеродистых легированных сплавов. Эти наплавочные сплавы применяются для упрочнения и восстановления деталей машин, систем гидравлических приводов и др. Они наносятся плазменной и индукционной наплавкой. Сплавы ПР-Х30ГСР и ПР-ФМИ могут также наплавляться газопламенной горелкой с добавлением флюса в ее факел.

Наиболее распространенными самофлюсующимися порошками являются сплавы на основе никеля, легированные бором и кремнием. Они отличаются высокими технологическими свойствами и низкой температурой плавления, что позволяет наплавлять стальные детали на воздухе. Покрытия стойки к воздействию агрессивных сред, повышенных температур, износоустойчивы при трении по металлу со смазкой и без нее, а также при абразивном изнашивании. По уровню износостойкости покрытия из самофлюсующихся сплавов в 3–5 раз превосходят закаленные инструментальные стали. По американской спецификации эти сплавы называют Колмонои, а в Японии – Фукудалои.

В табл. 3.19- 3.21 [1] представлены марки и области применения самофлюсующихся порошков на никелевой основе, в разное время выпускавшихся в СНГ и за рубежом.

Специфические свойства присущи *порошкам тугоплавких соединений.* К ним относятся карбиды, оксиды, бориды, нитриды, интерметаллиды и их комбинации. Наиболее часто их применяют для напыления газотермических покрытий. Широко используют оксиды и карбиды. По сравнению с другими высокотемпературными материалами оксиды имеют наиболее низкую тепло- и электропроводность, но значительную прочность при высоких температурах.

Сочетание положительных свойств различных типов порошков и получение частиц, удовлетворяющих комплексу требований, реализуется в *композиционных порошках.* В зависимости от конструкции различают плакированные и конгломератные композиционные частицы. Первые представляют собой исходную частицу одного из материалов, на поверхности которой расположен слой или несколько слоев других материалов. Конгломератная частица сформирована из множества исходных частиц нескольких материалов.

### 3.5. Порошковая проволока и ленты

Порошковая проволока состоит из мягкой тонколистовой металлической оболочки и сердцевины, которая представляет собой смесь порошков ферросплавов, чистых металлов, карбидов, боридов, раскислителей, шлакообразующих и стабилизирующих горение дуги веществ. Наиболее распространенный диаметр порошковой проволоки 2,6 – 3,6 мм, однако для наплавки крупногабаритных деталей используют проволоку диаметром до 8 мм.

Порошковую проволоку выпускают четырех типов: для наплавки под флюсом, в среде защитных газов, в атмосфере воздуха, универсальную. В странах СНГ изготовляют легированную и высоколегированную порошковую проволоку, обеспечивающую износостойкую и коррозионно-стойкую наплавку (табл. 3.27 [1]).

Ленточные электроды позволяют повысить производительность процесса наплавки и уменьшить глубину проплавления основного металла. Холоднокатаную ленту можно изготовить только из пластичных деформируемых сплавов с невысоким содержанием углерода, поэтому изготовляют спеченную и порошковую ленты. *Спеченную металлокерамическую ленту* на железной основе производят из смеси металлических порошков ферросплавов, графита и других компонентов путем холодной прокатки смеси и последующего спекания в защитной среде.

Важными преимуществами проволочного и стержневого процессов по сравнению с порошковым являются нагрев материала до жидкого состояния и нанесение на поверхность изделия покрытий из таких расплавленных частиц с высокой скоростью. При напылении некоторых материалов (оксидов) скорость полета частиц достигает 200 м/с. Полученные таким образом покрытия по прочности и плотности не уступают плазменным, а стоимость их ниже плазменных в 2 – 3 раза.

### 3.6. Синтетические материалы

В настоящее время на ремонтных предприятиях большое количество различных деталей машин изготовляют из полимерных материалов. Например, подшипники опорных катков экскаваторов и тракторов, втулки шарниров рессорных подвесок грузовых автомобилей, втулки ходовых колес кранов, штуцера, манжеты, прокладки и другие детали гидравлических систем, блоки грузоподъемных машин, рабочие органы насосов и вентиляторов, детали воздухоочистителей, фрикционных муфт, зубчатые и червячные колеса и др.

При выборе пластиков необходимо учитывать следующие основные требования. Физико-механические свойства выбираемых пластиков должны быть близки к свойствам материала детали или соответствовать нагрузкам, которые возникают в сопряжениях. Износостойкость пластиков должна быть не ниже износостойкости восстанавливаемых деталей. Адгезия (прилипаемость) пластиков к материалу детали должна быть высокой. Для повышения адгезии возможно применение различных клеев. При выборе пластиков необходимо учитывать размер и направление усадки пластмассового слоя. Направление сил усадки пластмассы должно совпадать с направлением сил адгезии, т. е. усадка должна улучшать сцепление слоя пластмассы с материалом детали.

На поверхности деталей пластмассу наносят намазкой, напылением, оплавлением и др. способами.

Не рекомендуется покрывать пластмассой сопрягаемые поверхности валов и отверстий одновременно, в связи с тем, что пластмассы плохо отводят тепло.

## 3.7. Выбор и определение нормы расхода материала

По своему назначению материалы для восстановления деталей подразделяются на основные и вспомогательные. Выбранные материалы – наплавочная проволока, лента, порошок, флюс, технологические газы – должны обеспечивать выполнение технических требований к восстановленной детали, изложенных на ремонтном чертеже. Современные способы восстановления деталей характеризуются разнообразием применяемых материалов. Их назначение и характеристики даны в специальной справочной и учебной литературе [1, 7, 9]. Марки и назначение основных материалов для дуговой сварки и наплавки приведены в прил. 5.

Для ручной дуговой сварки и наплавки применяются различные электроды. Марки, типы электродов, их назначение даны в справочнике [1]. Там же приведены марки и назначение стальной наплавочной и сварочной проволоки.

В последние годы при восстановлении деталей в больших объемах применяют порошковые проволоки и ленты. Марки и назначение порошковых спеченных лент даны в справочнике [1]. Для дуговой наплавки применяются плавленые и керамические флюсы и их смеси.

Норму расхода основных и вспомогательных материалов для восстановления деталей рассчитывают различными методами, в том числе опытно-экспериментальным и опытно-статистическим. Допускается определение нормы расхода материалов по типовым технологическим процессам или литературным источникам, путем их пересчета к конкретной детали. Нормы расхода материалов сводят в таблицу.

Для примера в табл. 3.1 даны нормы расхода порошковых материалов, необходимых для устранения различных дефектов распределительного вала двигателя СМД-62 газопламенным напылением.

Таблица 3.1

**Нормы расхода порошковых материалов при восстановлении распределительного вала двигателя СМД – 62 газопламенным напылением**

| Наименование дефекта | Марка порошка | Норма расхода на 1 деталь, кг |
|---|---|---|
| Износ поверхностей опорных шеек | ПТ-НА-01 (подслой) | 0,03 |
| | ПГ-19М-01 (основной слой) | 0,09 |
| Износ поверхностей кулачков | ПГ-10Н-01 | 0,6 |

# 4. ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ И ОСНАСТКИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ

Выбор технологического оборудования во многом зависит от типа производства. В условиях единичного производства используют универсальные станки, а при серийном производстве применяют универсальные станки, станки с ЧПУ. В условиях массового производства используют специальное технологическое оборудование.

При проектировании технологических *процессов выбор станка производят по следующим показателям:*

- типу производства, размеру партии обрабатываемых деталей;
- виду обработки (токарная, фрезерная, сверлильная и т. п.);
- требованиям к точности, шероховатости и экономичности обработки;
- площади рабочей зоны станка, габаритным размерам детали, расположением обрабатываемых поверхностей;
- габаритным размерам станка (высота и расстояние между центрами, размеры стола);
- точности и жесткости станка;
- частоте вращения шпинделя;
- скорости подачи;
- мощности станка.

Выбор технологической оснастки производится на основе анализа возможности реализации технологического процесса при выполнении технических требований к детали, технических возможностей оснастки, а также конструктивных характеристик детали и восстанавливаемых поверхностей и др.

Выбор оборудования и технологической оснастки производится по специальным каталогам или справочникам [1, 4, 5, 8]. Технические характеристики некоторых установок для наплавки деталей даны в прил. 6.

***Например***

1. Наплавочная, наплавлять поверхность 3. Станок – сварочный полуавтомат НДГ-312УЗ. Патрон трехкулачковый 7100-0009, ГОСТ 2675-80, центр вращающийся, ГОСТ 8742-75, штангенциркуль ШЦ-II-160-0,02, ГОСТ 166-80, наплавочная проволока Св-08А, флюс 7И-348-В.
2. Токарная, точить поверхность 2. Станок токарно-винторезный 1Л62, патрон трехкулачновый 7100-0009, ГОСТ 2675-80, центр вращающийся, ГОСТ 8742-75, штангенциркуль ШЦ-II-160-002 ГОСТ 166-80.
3. Фрезерная, фрезеровать шпоночный паз, поверхность 3. Станок вертикально фрезерный 6Б12ПБ, патрон цанговый 6151-0003, ГОСТ 3025-75, тиски 7827-0259, ГОСТ 4045-75, фреза концевая 2252-0152 Р18, ГОСТ 7063-75. Штангенциркуль ШЦ-II-160-002, ГОСТ 166-80.

После выбора оборудования и оснастки для проектируемого технологического процесса восстановления детали заполняют ведомость и приводят

техническую характеристику. Пример ведомости оборудования и оснастки по технологическому процессу восстановления деталей типа «вал» газопламенным напылением порошковых материалов дан в табл. 4.1.

Таблица 4.1

**Ведомость оборудования и оснастки для восстановления деталей типа «вал» газопламенным напылением порошковых материалов**

| Наименование оборудования и оснастки | Обозначение |
|---|---|
| Аппарат для напыления | 021-4 ВНПО «Ремдеталь» |
| Вращатель | 011-1-09 «Ремдеталь» |
| Установка для струйной обработки деталей | 026-7 «Ремдеталь» |
| Станки токарные и круглошлифовальные | 3В1161, 3А151, 3Б12, 3А423 |
| Печь для сушки порошка | ТХ8-1479 |
| Набор сит с сетками | N-01, N 004, №-0071 |
| Стол сварщика | Мод. С 10020 «Ремдеталь» |
| Стеллаж | ОРГ-1468-06-92А |

Основной задачей, стоящей перед студентом при выборе моделей станков, является достижение наивысшей производительности, заданной точности деталей, наименьшей себестоимости их обработки. При этом необходимо помнить, что разные станки дают различную точность обработки. Нельзя, например, получить на обычном токарном станке при обработке резцом валик с допуском 0,01 мм по диаметру. В то же время эту точность легко получить на шлифовальном станке.

С целью экономного расходования электроэнергии обработку небольших деталей следует планировать на станках меньших размеров, имеющих соответственно менее мощные электродвигатели.

*Выбор технологической оснастки*. К технологической оснастке относятся станочные приспособления, вспомогательный, режущий, слесарный инструмент и средства контроля.

В зависимости от выбранного типа производства определяют систему приспособлений, рекомендуемую для применения в данных условиях.

Универсальные многоцелевые, широко переналаживаемые приспособления выбираются по справочной литературе, например [8]. При этом необходимо учитывать размеры посадочных мест приспособлений, чтобы они подходили к выбранным моделям станков, а также возможности соответствующих приспособлений, позволяющие устанавливать в них детали, для которых разрабатывается технологический процесс.

В зависимости от вида обработки, свойств обрабатываемого материала, точности обработки и качества обрабатываемой поверхности детали выбирают тип, конструкцию и размеры режущего инструмента, например: «Резец проходной Т5К10». При выборе резцов указывают сечение державки и геометрические параметры режущей части. Материал режущего инструмента выбирают в зависимости от вида обработки, материала и твердости детали [4, 8].

Выбор абразивного инструмента производится с учетом того, что для обработки сталей используются круги из электрокорунда, а для чугунов и цветных металлов из карбида кремния. Конкретные рекомендации по выбору абразивных инструментов можно найти в [4, 8]. Выбор шлифовального круга производится в зависимости от вида обработки поверхности, твердости и материала обрабатываемой детали.

*Например,* резец токарный проходной упорный отогнутый с углом 90° с пластинами из твердого сплава Т15К6.

$h$ = 20 мм; $l$ = 120 мм; $B$ = 16 мм; $r$ = 1 мм.
Круг шлифовальный ПВК 23А 32П С1 К1 35 м/с.
$D_к$ = 600 мм; $B_к$ = 63 мм; ГОСТ2424-84.

Вспомогательный инструмент предназначен для закрепления режущего инструмента в соответствующих посадочных местах металлорежущих станков. Он должен иметь, с одной стороны, посадочные поверхности и элементы крепления, соответствующие режущему инструменту, а с другой – установочные поверхности и элементы крепления, соответствующие посадочным местам станков.

Если применяются специальные приспособления (неразборные специальные приспособления – НСП), то следует иметь в виду, что такие приспособления необходимо проектировать самостоятельно в соответствии с существующими методиками. Специализированные, стандартные системы приспособлений могут быть следующих видов: универсально-сборные приспособления (УСП), сборно-разборные (СРП), универсальные наладочные (УНП), специализированные наладочные (СНП).

При разработке технологического процесса восстановления детали необходимо выбрать те приспособления и инструменты, которые способствуют повышению производительности труда, точности обработки, улучшению условий труда, ликвидации предварительной разметки детали и выверке ее при установке на станке.

# 5. РАСЧЁТ РЕЖИМОВ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Принятые режимы операций (особенно нанесение покрытий) существенно влияют на ресурс восстановленных деталей. Поэтому они должны обеспечивать выполнение технических требований к детали, изложенных на ремонтном чертеже. Параметры режимов нанесения покрытий различными способами приведены в справочной и технической литературе [1–3, 6, 11].

Режим обработки определяют отдельно для каждой операции с разбивкой ее на переходы.

## 5.1. Наплавка

Наплавка на деталь металла позволяет не только восстановить первоначальные свойства изделия, но и придать ему совершенно новые ценные качества. Цель наплавки может быть различной: восстановление утраченной геометрии детали или придание ей новой формы, образование поверхностного слоя с заданными физико-механическими свойствами (такими как повышенная твердость, износостойкость, антифрикционность, коррозионная стойкость, жаростойкость и пр.), упрочнение наплавкой.

Наплавку можно производить на любые поверхности - плоские, конические, цилиндрические, сферические. В больших пределах может меняться и ее толщина - от нескольких долей миллиметра до сантиметра и более.

### *5.1.1. Дуговая наплавка под флюсом и в среде защитных газов*

Дуговая наплавка под флюсом и в среде защитных газов является наиболее распространенным способом восстановления деталей в ремонтном производстве не только в России, но и за рубежом. Марка флюса и проволоки определяется требованиями, предъявляемыми к наплавленному слою. Детали из малоуглеродистых и низколегированных сталей наплавляют проволокой диаметром 1,2 – 1,5 мм марок Св-0,8, Св-10А, Нп-30, Нп-40 и др., а из легированных сталей – марок Св-18ХГСА, Нп-30ХГСА, порошковыми проволоками марок ПП-3Х2В8, ПП-Х42ВФ и др. Высокую износостойкость наплавленного слоя можно получить наплавкой проволоки Нп-2Х13.

Для наплавки применяют плавящиеся марганцовистые флюсы марок АН-318А и ОСЦ-45, с помощью которых наплавляемый слой легируется марганцем, повышающим его твердость, вязкость и износостойкость. Наплавкой проволокой Св-08 под керамическим флюсом АНК-19 можно получить твердость наплавленной поверхности HRC 45-49.

Наплавка под слоем флюса широко применяются при восстановлении валов, осей и других деталей диаметром более 50 мм, имеющих износ более 1 – 1,5 мм на сторону. Наплавка деталей диаметром до 50 мм затруднена из-за стекания металла, осыпания флюса, возможности прижога и коробления.

Отличительной особенностью процесса автоматической сварки под флюсом является то, что сварочная дуга горит не на открытом воздухе, а под слоем

зернистого сыпучего флюса. Электродная проволока подаётся вниз в зону наплавки со скоростью её плавления, плавится и переходит на деталь в виде отдельных капель.

Расплавленный флюс образует плотную эластичную оболочку – флюсогазовый пузырь, поверх которого находится слой жидкого шлака.

Процесс широко применяется для восстановления цилиндрических поверхностей деталей. Режимы наплавки характеризуются силой тока, напряжением, скоростью наплавки, скоростью подачи проволоки, шагом наплавки, вылетом и смещением электрода. Силу тока при наплавке определяют в зависимости от диаметра детали (табл. 5.1).

Таблица 5.1

**Зависимость тока при наплавке от диаметра детали**

| Диаметр детали, мм | Сила тока, А | |
|---|---|---|
| | при диаметре электродной проволоки, мм | |
| | 1,2–1,6 | 2–2,5 |
| 50–60 | 120–140 | 140–160 |
| 65–75 | 150–170 | 180–220 |
| 80–100 | 180–200 | 230–280 |
| 150–200 | 230–250 | 300–350 |
| 250–300 | 270–300 | 350-380 |

Основные параметры режимов наплавки определяют по следующим формулам:

- *скорость наплавки*, м/ч

$$V_{н} = \frac{\alpha_{н} \cdot I}{h \cdot s \cdot \gamma}, \quad (5.1)$$

- *частота вращения детали*, об/мин

$$n_{д} = \frac{1000 \cdot V_{н}}{60 \cdot \pi \cdot d}, \quad (5.2)$$

- *скорость подачи проволоки*, м/ч

$$V_{пр} = \frac{4 \cdot \alpha_{Н} \cdot I}{\pi \cdot d_{пр}^{2} \cdot \gamma}, \quad (5.3)$$

- *шаг наплавки*, мм/об

$$S = (2 - 2{,}5) \cdot d_{пр}, \quad (5.4)$$

- *вылет электрода*, мм $\delta = (10 - 12) \cdot d_{пр}$, (5.5)

- *смещение электрода*, мм $l = (0{,}05 - 0{,}07) \cdot d$, (5.6)

где $\alpha_{н}$ – коэффициент наплавки, г/А·ч (при наплавке постоянным током обратной полярности $\alpha_{н} = 11 – 14$); $h$ – толщина наплавленного слоя, мм; $\gamma$ – плотность электродной проволоки, г/см$^3$ ($\gamma = 7{,}85$ ); $d_{пр}$ – диаметр электродной проволоки, мм; $I$ – сила тока, А; $d$ – диаметр детали, мм.

Ориентировочные параметры режимов наплавки под слоем флюса цилиндрических деталей даны в табл. 5.2.

Таблица 5.2

**Режимы наплавки цилиндрических деталей (толщина слоя 1,0 – 1,2 мм)**

| Параметр | Диаметр детали, мм | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 10 ÷20 | 20 ÷30 | 40 ÷50 | 90 ÷100 |
| Сила тока, А | 70 ÷ 90 | 85 ÷110 | 110 ÷ 180 | 100 ÷300 |
| Скорость наплавки, м/ч | 40÷ 45 | 40 ÷45 | 30 ÷ 35 | 70 ÷ 80 |
| Смещение электрода, мм | 2 ÷ 4 | 3÷ 5 | 6÷ 10 | 8÷ 10 |
| Шаг наплавки, мм/об | 2,5÷3,0 | 2,8÷ 3,2 | 3,0÷3,5 | 5,0 ÷7,0 |
| Вылет электрода, мм | 7÷10 | 8 ÷11 | 10÷15 | 20÷27 |

### *5.1.2. Вибродуговая наплавка*

Вибродуговой наплавкой восстанавливают большую номенклатуру деталей типа «вал» и др. Параметры режима нанесения покрытий определяют по следующим формулам:

сила тока, А

$$I = \frac{\pi \cdot d_{\text{пр}}^{\,2}}{4(60 \div .75)}, \tag{5.7}$$

скорость подачи электродной проволоки, м/ч

$$V_{\text{пр}} = \frac{0{,}1 \cdot I \cdot U}{d_{\text{пр}}^{\,2}}, \tag{5.8}$$

где $d_{\text{пр}}$ – диаметр проволоки, мм; $U$ – напряжение, В ($U$ = 14÷20 В);

скорость наплавки, м / ч

$$V_{\text{н}} = \frac{0{,}785 \cdot d_{\text{пр}}^{\,2} \cdot V \cdot \eta}{h \cdot S \cdot \alpha}, \tag{5.9}$$

где $\eta$ – коэффициент перехода электродного материала в наплавленный металл ($\eta$ = 0,8 ... 0,9); $h$ – толщина наплавленного слоя (без механической обработки) мм; $S$ – шаг наплавки, мм/об; $\alpha$ – коэффициент, учитывающий отклонения фактической площади сечения наплавленного слоя от площади четырехугольника с высотой $h$ ($\alpha$ = 0,8);

- *шаг наплавки*, мм/об

$$S = (1{,}6 \div 2{,}2) d_{\text{пр}}, \tag{5.10}$$

- *амплитуда колебаний*

$$A = (0{,}75 \div 1{,}0) d_{\text{пр}}. \tag{5.11}$$

### *5.1.3. Плазменная наплавка*

При плазменной наплавке расчет таких параметров режима, как скорость, частота вращения, толщина покрытий рекомендуется выполнять по формулам, принятым для расчета режима наплавки под слоем флюса.

Наибольшее применение для плазменной наплавки деталей получили сормайт, сплавы ФБХ–9–2, Ус–25, ПГ–СР3 и СНГН–50. Технологические режимы плазменной наплавки деталей при работе с аргоном следующие: сила тока 150 – 200 А; напряжение холостого хода 120 – 160 В, рабочее напряжение 40 – 45 В; расход плазмообразующего газа 1,5 – 2,5 л/мин, расход транспортирующего газа 5 – 7 л/мин. Расход защитного газа 15 – 20 л/мин; скорость наплавки 0,15 – 0,18 м/мин, расстояние от горелки до детали 10 – 18 мм; число колебаний горелки в минуту 40 – 100.

Рациональное значение силы тока при плазменной наплавке находится в пределах 200 – 230 А. Коэффициент наплавки $\alpha_н$ = 10 – 13 г/А·ч.

Расход порошка определяется по формуле

$$Q = 0{,}1 \cdot V_н \cdot S \cdot h \cdot \gamma \cdot K_п \,, \qquad (5.12)$$

где $Q$ – расход порошка, г/с; $S$ – шаг наплавки, мм/об (S = 0,4 – 0,5); $h$ – толщина наплавленного слоя, мм; γ – плотность наплавленного металла, г/см$^3$.

Для порошковых твердых сплавов на железной основе γ = 7,4; для сплавов на никелевой основе – γ = 0,8; $K_п$ – коэффициент, учитывающий потери порошка, $K_п$ = 1,12 – 1,17

## 5.2. Наварка ленты и проволоки

Часто применение металлизации не оправдано из-за слишком большого размера пятна напыления, из-за чего невозможно восстанавливать узкие шатунные шейки. В этих случаях применяется наварка ленты и проволоки. Процесс контактной наварки ленты производится на специальных установках совместным деформированием навариваемого металла и поверхностного металла, нагретых в очаге деформации до пластического состояния короткими (0,02 – 0,16 с) импульсами тока 7 – 30 мА. Образуемые при этом сварочные точки располагаются по винтовой линии и частично перекрывают друг друга, что достигается вращением детали со скоростью, пропорциональной частоте импульсов, и продольным перемещением сварочных клещей.

Наибольшее распространение контактная наварка проволоки нашла для восстановления резьбовых участков валов. Диаметр проволоки подбирают таким, чтобы при наварке она полностью заполнила впадину резьбы и выступала на величину припуска, необходимого для последующей обработки. Учитывая износ витков резьбы, продольную подачу сварочных клещей принимают равной шагу резьбы.

Частота вращения детали, продольная подача сварочных клещей и частота следования импульсов являются важными параметрами процесса, определяющими его производительность. Соотношение этих величин подбирают так, чтобы обеспечить 6 или 7 сварочных точек на 1 см длины сварного шва. Режимы приварки ленты приведены в табл. 5.3.

Частоту вращения детали, норму времени на наплавку рассчитывают аналогично расчету этих параметров при наплавке под слоем флюса.

Таблица 5.3

**Рекомендуемые режимы приварки ленты, толщиной 1 мм**

| | |
|---|---|
| Сила сварочного тока, кА | 16,1 – 18,1 |
| Длительность сварочного цикла, с | 0,04 – 0,08 |
| Длительность паузы, с | 0,1 –0,12 |
| Подача сварочных клещей, мм/об | 3 – 4 |
| Усилия сжатия электродов, кН | 1,30 –1,60 |
| Ширина рабочей части сварочных роликов, мм | 4 |
| Скорость наплавки, м/мин. | 3 – 4 |

## 5.3. Нанесение электролитических покрытий

Восстановление деталей электролитическими покрытиями заключается в нанесении на изношенную поверхность детали металла путем электролиза.

Толщина осажденного покрытия

$$h = \frac{cJ_k t\eta}{1000\gamma}, \qquad (5.13)$$

где $J_к = I/S$ – катодная плотность тока, А/дм$^3$; γ – плотность осаждаемого металла, г/см$^3$; $c$ – электрохимический эквивалент, г/А·ч; η – выход по току или к. п. д. процесса, % (табл. 5.4).

Таблица 5.4

**Электрохимический эквивалент и выход по току или к. п. д.**

| Параметр | Элемент | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Fe | Cr | Ni | Cu, кислый электролит | Cu, цианистый электролит | Zn |
| Электрохимический эквивалент, г/А·ч | 1,042 | 0,324 | 1,095 | 1,186 | 2,372 | 1,220 |
| Выход по току или к. п. д., % | 85–95 | 13–18 | 90 | 98 | 98 | 92 |

*Электрохимическим эквивалентом* называется количество вещества в граммах, выделившегося на катоде за 1 А·ч.

По приведенной формуле можно определить продолжительность электролиза при заданной толщине покрытия. Придание анодам формы, соответствующей форме детали, способствует более равномерному распределению осадка, так как при этом расстояние участков катодов (деталей) от анода получается более равномерным.

### *5.3.1. Хромирование*

Для восстановления деталей широкое распространение получило хромирование. Хромированием восстанавливают детали с износом до 0,3 мм на сторону, работающие при значительных удельных давлениях, больших скоростях

скольжения, поверхности которых должны обладать высокой твердостью, термокоррозионной и износостойкостью.

В качестве анода при хромировании применяют нерастворимый в электролите сплав свинца и сурьмы (5 – 10 %). Площадь анодов должна быть в 1,5 – 2 раза больше площади катода, а форма должна повторять форму детали, что повышает равномерность покрытия. Требуемое расположение анодов в ванне относительно катодов обеспечивается с помощью подвесных приспособлений.

При хромировании используют различные электролиты (табл. 5.5). Время хромирования 90–380 мин.

Таблица 5.5

**Состав электролитов и режимы хромирования**

| Компоненты и параметры режима | Номер электролита | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Хромовый ангидрид, г/л | 120÷150 | 220÷250 | 300÷350 | 225÷300 | 380÷ 420 |
| Серная кислота, г/л | 1,2÷ 1,5 | 2,2÷2,5 | 3÷3,5 | – | – |
| Температура электролита, °С | 50÷60 | 45÷60 | 4÷ 50 | 50÷ 65 | 18÷25 |
| Плотность тока, А/дм$^2$ | 30÷100 | 20÷60 | 15÷ 30 | 40÷100 | 100÷300 |
| Выход по току, % | 15÷18 | 12÷14 | 8÷10 | 18÷20 | 35÷ 40 |

После нанесения слоя хрома поверхность подвергают шлифованию и полировке.

### *5.3.2. Осталивание*

Для восстановления деталей широкое распространение получило осталивание (железнение). При осталивании применяют аноды из малоуглеродистой стали толщиной 5 – 9 мм, материал которых постепенно переносится на поверхность детали. Осталиванием восстанавливают отверстия в корпусных деталях, шейки валов агрегатов трансмиссий, валики приводов насосов, шкивы, катки, кронштейны, ступицы, чугунные втулки и другие детали с износом до 3 мм на сторону.

Процесс осталивания по сравнению с хромированием имеет более высокую производительность. Он дает возможность получать покрытия толщиной до 3 мм, не требует дефицитных химических реактивов. Выход по току в этом процессе равен 85–95 %, скорость осаждения 0,3 – 0,6 мм/ч, расход электроэнергии – 1,5 кВт·ч/дм$^2$. Предел прочности осажденного покрытия составляет 350–450 МПа, пластичность 5–10 %, твердость НВ 100–240 (в зависимости от состава электролита и условий электролиза). Твердость осадков при осталивании увеличивается при снижении концентрации солей в электролите, росте плотности тока, понижении температуры, введении в электролиты различных органических и минеральных добавок.

Процесс осталивания осуществляется в водных растворах хлорида или сульфата железа (табл. 5.6). Растворимые аноды изготовляют из малоуглеродистой стали.

Таблица 5.6

**Состав распространенных электролитов и режимы осталивания**

| Компоненты и параметры режима | Номер электролита | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| Хлористое железо, г/л | 300÷350 | 400÷600 | 150 ÷200 |
| Сернокислое железо, г/л | – | – | 200 |
| Аскорбиновая кислота, г/л | – | 0,5÷2,0 | – |
| Кислотность, pH | 0,8÷1,2 | 0,5÷ 1,3 | 0,6 ÷1,2 |
| Температура электролита, °С | 70÷ 80 | 20 ÷ 50 | 30÷ 50 |
| Плотность тока, А/дм$^2$ | 20÷50 | 10÷ 30 | 20 ÷ 25 |
| Выход по току, % | 85÷ 95 | 85÷92 | 85÷ 92 |

К недостаткам способа осталивания относятся: сравнительно слабое сцепление наносимого слоя с основным металлом и малая твердость осажденного слоя без термической обработки.

## 5.4. Механическая обработка

### *5.4.1. Особенности режимов механической обработки*

Процесс восстановления деталей может быть условно разделен на два этапа. На первом этапе восстанавливают геометрические размеры детали различными способами, среди которых наибольшее применение нашли способы, основанные на нанесении на изношенную поверхность покрытий. На втором этапе проводят последующую механическую обработку нанесенных покрытий.

Механическая обработка при восстановлении деталей имеет специфические особенности. После механической обработки поверхности детали должны иметь не только заданные размеры, правильную геометрическую форму, требуемую шероховатость, но и соответствующее расположение обработанных поверхностей относительно базовых поверхностей и по отношению друг к другу.

Выбор баз при восстановлении осложняется тем, что обработке подвергается не заготовка с соответствующими припусками, а деталь с неравномерно изношенными поверхностями и остаточными деформациями.

Технологические базы деталей, установленные в процессе изготовления, в большинстве своем сохраняются. Однако в ряде случаев они могут быть повреждены, а в некоторых случаях и вовсе отсутствовать. При базировании деталей на изношенные или повреждённые базовые поверхности погрешности установки детали возрастают, что не позволяет обеспечить требуемую точность обработки. Поэтому механическую обработку деталей надо начинать с проверки и исправления базовых поверхностей. Если необходимо использовать рабочие поверхности детали в качестве базовых, то выбирают те из них, которые не изношены. В том случае, когда первоначальные базы вообще отсутствуют, обработку начинают или с восстановления баз, или, если это возможно, выбирают такие поверхности, которые имеют наиболее точные размеры и связаны жёсткими допусками с обрабатываемой поверхностью.

При выборе баз для обработки восстанавливаемых деталей *необходимо руководствоваться следующими правилами:*

- принимать в качестве базовых те поверхности, которыми определяется положение детали в узле;
- базовые поверхности должны быть связаны наиболее жёсткими допусками с обрабатываемыми поверхностями деталей;
- при обработке нескольких поверхностей необходимо стремиться к соблюдению единства баз, т. е. к обработке всех поверхностей при одной и той же установочной базе;
- выбранная база должна обеспечить минимальную деформацию детали от условий резания и закрепления.

### *5.4.2. Обработка под ремонтный размер*

При восстановлении деталей обработкой под ремонтный размер обычно обрабатывают наиболее сложную и дорогостоящую деталь, а сопрягаемую с ней заменяют новой или восстановленной также до ремонтного размера. Различают ремонтные размеры категорийные (регламентированные) и нерегламентированные. Регламентированные ремонтные размеры и допуски на них устанавливает предприятие-изготовитель. Детали с регламентированными размерами выпускает промышленность: поршни, поршневые кольца, поршневые пальцы, вкладыши подшипников шеек коленвала. Значение и число регламентированных ремонтных размеров зависят от износа деталей за межремонтный период, припуска на механическую обработку, запаса прочности детали или глубины термической обработки ее поверхностного слоя.

Расчетные формулы для определения ремонтных размеров для наружных и внутренних цилиндрических поверхностей (валов и отверстий) имеют вид [6 – 8, 12, 17, 18]:

$$d_{\text{рп}} = D_{\text{н}} - \gamma\, n;$$

$$D_{\text{рп}} = D_{\text{н}} + \gamma\, n, \qquad (5.14)$$

где $d_{\text{н}}$ и $D_{\text{н}}$ – соответственно номинальный размер вала и отверстия по рабочему чертежу, мм; $n$ – номер ремонтного размера; $\gamma$ – ремонтный интервал, мм;

$$\gamma = 2\,(U \cdot \beta + Z_{\text{о}}),$$

где $\beta = (0{,}5–1{,}0)$ – коэффициент неравномерности износа (табл. 5.7); $U$ – максимальный износ на диаметр, мм; $Z_{\text{о}}$ – общий припуск на механическую обработку на сторону, мм.

Число ремонтных размеров определяют по следующим формулам:

- *для валов*

$$n_{\text{в}} = \Delta_d / \gamma,$$

- *отверстий*

$$n_{\text{о}} = \Delta_D / \gamma\,, \qquad (5.15)$$

где $\Delta_d$ и $\Delta_D$ – соответственно допустимое уменьшение диаметра вала и увеличение диаметра отверстия, мм:

$$\Delta_{\underline{d}} = d_{\text{н}} - d_{\min};$$

$$\Delta_D = D_{max} - D_н, \quad (5.16)$$

где $d_{min}$ – минимально допустимый диаметр вала, мм; $D_{max}$ – максимально допустимый диаметр отверстия, мм.

Для определения величины ремонтного размера при обработке восстанавливаемой детали можно использовать следующие зависимости:

- *для наружной цилиндрической поверхности (вала)*

$$d_р \le d_и - \gamma, \quad (5.17)$$

- *внутренней цилиндрической поверхности (отверстия)*

$$D_р \ge D_и + \gamma, \quad (5.18)$$

где $d_и$, $D_и$ – наибольший предельный размер вала и наименьший размер отверстия, мм. В частном случае, если деталь не подвергалась восстановлению («новая»), то $d_и = d_н$ , $D_и = D_н$ .

Таблица 5.7

**Коэффициент β неравномерности износа деталей**

| Деталь | Изнашиваемая поверхность | Коэффициент β |
|---|---|---|
| Коленчатый вал | Коренные и шатунные шейки | 0,75 |
| Гильза цилиндров | Отверстие гильзы | 0,60 |
| Картер коробки передач | Посадочные гнезда подшипников | 0,90 |

***Пример 12***

Определить ремонтный размер коренных шеек коленчатого вала двигателя автомобиля при следующих исходных данных: $d_и$ = 75,0 мм; β = 0,75; $U$ = 0,03 мм.

Припуск на шлифование шеек коленчатого вала при ремонте примем 0,05 мм [1, 5].

Ремонтный интервал

$$\gamma = 2\ (0{,}75 \cdot 0{,}03 + 0{,}05) = 0{,}15 \text{ мм}.$$

Ремонтный размер

$$d_р \le d_и - \gamma\ ;$$
$$d_р = 75{,}0 - 0{,}15 = 74{,}85 \text{ мм}.$$

Первый и второй категорийные ремонтные размеры коренных шеек коленвала двигателя составляют $74{,}95_{-0{,}02}$ и $74{,}7_{-0{,}02}$ мм соответственно. Первый размер превышает значение $d_р$, поэтому обработать коленвал под этот регламентированный размер невозможно, следовательно, коленвал целесообразно обрабатывать под второй регламентированный ремонтный размер, равный $74{,}7_{-0{,}02}$ мм.

Толщину слоя металла, наносимого на поверхность восстанавливаемых деталей, рассчитывают по формуле:

$$t_{тр} \ge \Delta + Z_о\ ,$$

где Δ – износ детали (односторонний), т. е. $U/2$, мм.

### *5.4.3. Постановка дополнительной детали*

При ремонте постановкой дополнительной детали посадочный диаметр ($d_п$) сопрягаемых поверхностей ремонтируемой и дополнительной детали определяется:

*- при ремонте наружной цилиндрической поверхности детали (вала)*

$$d_п = d_ф - 2Z; \quad (5.19)$$

*- при ремонте внутренней цилиндрической поверхности (отверстия)*

$$d_п = D_ф + 2Z, \quad (5.20)$$

где $d_ф$ и $D_{ф.}$ – фактические размеры вала и отверстия соответственно, мм; $Z$ – суммарный припуск (см. табл. П4.3). Минимально допустимую толщину дополнительной ремонтной детали (втулки) определяют из условия прочности

$$\delta_1 = \frac{p n_з d_п}{2[\sigma]}, \quad (5.21)$$

где $p$ – давление в контакте поверхностей ремонтируемой и дополнительной детали, Па; $\delta_1$ – минимальная толщина дополнительной ремонтной детали (втулки), мм; [σ] – допускаемое напряжение для материала втулки, Па [4]:

$$n_з = \sigma_т / [\sigma], \quad (5.22)$$

где $\sigma_т$ – предел текучести материала втулки, Па [4].

Толщину втулки δ рассчитывают исходя из ее минимально допустимой толщины $\delta_1$ и величины припуска на обработку $z_o$:

$$\delta = \delta_1 + z_o . \quad (5.23)$$

Припуск на обработку поверхностей ремонтируемых деталей может быть назначен по справочным таблицам.

Значение $p$ определяется из уравнения

$$p = \frac{2M}{\pi \cdot d_п^2 \cdot l \cdot f}, \quad (5.24)$$

где $M$ – крутящий момент, стремящийся повернуть одну деталь относительно другой, Н·м; $l$ – длина контакта сопрягаемых поверхностей, м; $f$ – коэффициент трения при установившемся процессе распрессовки или проворачивания (табл. П5.2). Принимать $M = 40$ Н·м.

По полученным значениям $p$ определяется необходимое значение наименьшего расчетного натяга $N_{min}$ (мкм):

$$N_{min} = p d_п \left( \frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right), \quad (5.25)$$

где $N_{min}$ – расчетный натяг; $E_1$ и $E_2$ – модули упругости материалов соответственно охватываемой (вала) и охватывающей (отверстия) деталей, Па, (табл. П5.3); $C_1$ и $C_2$ – коэффициенты Ляме, определяемые по формулам

$$C_1 = \frac{d_n^{\,2} + d_1^2}{d_n^{\,2} - d_1^2} - \mu_1 ; \quad C_2 = \frac{d_2^2 + d_n^2}{d_2^2 - d_n^{\,2}} + \mu_2 , \quad (5.26)$$

где $\mu_1$ и $\mu_2$ коэффициенты Пуассона соответственно охватываемой (вала) и охватывающей (отверстия) деталей, (табл. П5.3).

Максимальное допустимое удельное давление $P_{max}$, при котором отсутствует пластическая деформация на контактных поверхностях деталей, определяется как наименьшее из двух значений:

$$P_1 = 0{,}58\sigma_{T1}\left[1-\left(\frac{d_1}{d_п}\right)^2\right], \qquad P_2 = 0{,}58\sigma_{T2}\left[1-\left(\frac{d_п}{d_2}\right)^2\right], \tag{5.27}$$

где $\sigma_{т1}$ и $\sigma_{т2}$ – предел текучести материалов охватываемой и охватывающей деталей.

Наибольший расчетный натяг (мм):

$$N_{max} = P_{max} d_п \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2}\right). \tag{5.28}$$

При сборке соединения неровности контактных поверхностей деталей срезаются и сглаживаются; для компенсации этого действительный натяг соединения $N_д$ должен быть больше расчетного натяга $N$, вычисляемого по формуле (5.28). Зависимость между $N_д$ и $N_{max}$ определяется формулой

$$N_д = N_{max} + 1{,}2(Rz_1 + Rz_2), \tag{5.29}$$

где $Rz_1$ и $Rz_2$ – высоты неровностей профилей сопрягаемых поверхностей.

По величине $N_д$ подбирают соответствующую стандартную посадку, у которой для надежности соединения наименьший натяг $N_{min}$ должен быть равен $N_д$ или очень близок к нему [13]. Выбирается посадка из таблиц системы допусков и посадок при следующих условиях: $N_{max} \le [N_{max}]$ и $N_{min} > [N_{min}]$.

Необходимое усилие при запрессовке ($F$, Н) собираемых деталей рассчитывается по формуле

$$F = 10^{-6} \cdot f \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot p, \tag{5.30}$$

где $f$ – коэффициент трения при запрессовке (табл. П5.2); $d$ – диаметр контактируемых поверхностей; $l$ – длина запрессовки; $p$ – давление на поверхности контакта.

Коэффициенты трения при запрессовке зависят от материала сопрягаемых деталей, чистоты поверхностей контакта, величины $p_1$, наличия и характера смазки.

### *5.4.4. Правка*

Детали, у которых во время эксплуатации появились остаточные деформации (изгиб, коробление), подлежат правке. Существует *два способа правки: статическая правка и объемной чеканкой.*

Статическая правка может производиться в холодном состоянии или с нагревом.

Для повышения качества холодной правки применяют в основном следующие способы.

1. Выдерживание детали под прессом в течение длительного времени из-за опасности обратного действия (при холодной правке возникают неуравновешенные внутренние напряжения, которые со временем, уравновешиваясь, приводят к объемной деформации детали).

2. Двойная правка детали заключается в первоначальном перегибе детали с последующей правкой в обратную сторону.

3. Стабилизация правки детали последующей термообработкой.

Усилие холодной правки можно определить по формуле

$$P = 6{,}8\frac{\sigma_т d^3}{l}\ , \qquad (5.3)$$

где $P$ – усилие холодной правки, Н; $\sigma_т$ – предел текучести материала выправляемой детали, Па; $d$ – диаметр выправляемой детали, мм; $l$ – расстояние между опорами или призмами правильного пресса, мм.

Горячая правка производится при необходимости больших деформаций детали. Нагрев 600 – 800 °С. После правки необходимо произвести термическую обработку детали.

Правка объемной чеканкой осуществляется с применением молотов. От наносимых ударов в поверхностном слое детали возникают местные напряжения сжатия, которые вызывают устойчивую деформацию.

# 6. ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

## 6.1. Особенности механической обработки восстановленных деталей

Механическая обработка деталей при ремонте является не только способом восстановления, как, например, при ремонте под ремонтный размер, но и необходимой стадией предварительной обработки для придания детали правильной геометрической формы, снятия дефектного слоя, специальной подготовки поверхности под нанесение различного рода покрытий, а также как окончательная стадия обработки восстанавливаемых деталей.

Механическая обработка ремонтных заготовок применяется для подготовки поверхностей под нанесение покрытий, обеспечения точности восстанавливаемых элементов, а также для упрочнения поверхностей. Эта обработка является основным средством достижения точности геометрических параметров деталей (их номинальных и ремонтных размеров, формы, взаимного расположения, шероховатости и волнистости поверхностей). На операции механической обработки приходится 40 – 60 % общей трудоемкости восстановления деталей.

Механическая обработка заготовок при восстановлении деталей отличается от изготовления деталей из отливок, проката или поковок. Это объясняется такими причинами: преднамеренным разрушением некоторых технологических баз в конце процесса восстановления деталей, износом или повреждением группы баз во время работы машины, деформацией деталей в эксплуатации; небольшими значениями толщины припусков, материал которых, как правило, отличается от материала основы различием в свойствах припусков при изготовлении и восстановлении деталей, требованием обеспечения необходимой точности взаимного расположения поверхностей, обрабатываемых при восстановлении, и поверхностей, обрабатываемых при изготовлении, а при восстановлении остающихся необработанными.

Механическая обработка восстановительно-упрочняющего покрытия включает следующие операции: черновые, чистовые и отделочные. Восстанавливаемые поверхности в зависимости от толщины и твердости сминаемого слоя проходят лезвийную и (или) абразивную обработку.

## 6.2. Базирование деталей

Механическая обработка в условиях ремонтного производства имеет ряд специфических особенностей – отсутствие или износ первичных технологических баз, нестабильность физико-механических свойств, например, твердости по поверхности восстанавливаемых деталей и припусков на обработку, значительная твердость и хрупкость большинства видов покрытий, широкая номенклатура обрабатываемых деталей.

Точность обработки деталей во многом зависит от правильного выбора установочных баз и применяемых приспособлений. При восстановлении деталей желательно использовать те же базы, что и при их изготовлении. Однако

ввиду их повреждения или уничтожения это условие выполнить нельзя. В этом случае установочные базы исправляют или выбирают новые. При выборе новых установочных баз необходимо исходить из условия обеспечения требований технических условий по точности, положению осей и поверхностей детали в узле, качеству обработки.

*Последовательность выполнения данного раздела:*

– изучить рабочий чертеж детали для выявления размеров, по которым в процессе обработки должна быть обеспечена требуемая чертежом точность;

– определить для каждого размера конструкторскую базу;

– разработать схему базирования детали, при которой конструкторская база выдерживаемого размера по возможности совмещалась бы с технологической базой;

– определить схему базирования на первой операции механической обработки (подготовка, или восстановление основных технологических баз) и на последующих операциях.

Выбор баз (технологической, конструкторской, измерительной) производится в соответствии с ГОСТ 3.1107-81 и 21495-76.

Выбор схем базирования и схем установки детали при восстановлении производится с использованием схем, приведенных в ГОСТ 21495-76 и 3.1107-81.

*При выборе баз руководствуются следующими положениями:*

– за технологические базы целесообразно принимать центровые отверстия валов, плоскости или (и) технологические отверстия в корпусных деталях, точные цилиндрические поверхности в дисках и втулках и т. п.;

– при восстановлении отдельных поверхностей за технологическую базу принимают основные или вспомогательные поверхности, которые сохранились и не подлежат восстановлению;

– если в процессе восстановления деталь должна быть обработана по всем основным и вспомогательным поверхностям, то за технологическую базу необходимо принять такую, от которой можно обрабатывать все основные и вспомогательные поверхности за одну установку. Если такой возможности нет, то технологической базой должна быть поверхность (или совокупность поверхностей), которая позволяет обработать с одной установки, в первую очередь, основные или вспомогательные поверхности;

– принятая технологическая база должна сохраняться на всех операциях технологического процесса, если это невозможно, то за следующую базу необходимо принимать обработанную поверхность детали, которая имеет точные размерные связи с поверхностью, обрабатываемой на последующих операциях;

– при выборе технологической базы необходимо помнить, что поверхность или совокупность поверхностей, принятых за технологические базы, должна лишить деталь минимально необходимого и в то же время достаточного числа степеней свободы. В соответствии с теорией базирования деталь должна быть лишена шести степеней свободы, в том числе и за счет обеспечения силового замыкания.

В зависимости от точности размеров на данной операции технологические базы могут быть сформированы одной, двумя или тремя поверхностями. Однако при этом нужно учитывать некоторые особенности процесса восстановления детали по сравнению с изготовлением. А именно: технологические базы деталей, установленные в процессе их изготовления, в большинстве своем сохраняются, и только в ряде случаев они бывают изношенными, или вовсе отсутствуют. При базировании деталей на изношенные поверхности погрешность базирования возрастает, что нередко не позволяет выдерживать требуемую точность обработки и относительного расположения поверхностей. Это может иметь место при всех встречающихся видах установки деталей при механической обработке. Заметим, что величина допустимого износа по техническим условиям на ремонт назначается исходя из условий возможности расширения той или иной посадки сопряжения. Базирование деталей на изношенную поверхность вызывает повышение погрешности базирования и снижение точности обработки.

Механическую обработку деталей необходимо начинать с исправления базовых поверхностей, а при использовании в качестве технологических баз рабочих поверхностей деталей следует использовать неизношенные участки.

При исправлении базовых поверхностей в качестве баз можно использовать другие базы, связанные с исправляемой базой точными размерами и техническими требованиями.

В качестве технологических баз могут быть приняты вспомогательные базы, например центровые отверстия коленчатых, распределительных и других валов, привалочные плоскости и установочные отверстия корпусных деталей и т. п.

Таким образом, выбор технологических баз, схем базирования и установки должен быть обоснован с точки зрения обеспечения минимальной погрешности установки и качества отремонтированной детали. Следует помнить, что погрешность установки складывается из погрешности базирования и погрешности закрепления.

Целесообразно рассмотреть несколько вариантов схем установки и принять те, которые отвечают требуемым техническим условиям. Выбор схемы установки детали при механической обработке выполняется в пояснительной записке и служит исходной информацией при формировании технологического маршрута восстановления детали и разработке технологических схем наладки оборудования.

### 6.3. Обработка наплавленных поверхностей

Поверхности деталей, восстановленные наплавкой, обладают по сечению неоднородными физико-механическими свойствами, химическим составом и микроструктурой. Механические свойства наплавленного слоя (прочность, твердость и др.) зачастую значительно выше, чем у материала самой детали. К особенностям наплавленных деталей также относятся микронеровности наплавки, неметаллические включения и пористость наружного слоя. Толщина

наносимого покрытия значительно больше величины износа. Так, для компенсации износа 0,2 – 0,5 мм наплавляют слой до 1,0 – 1,2 мм. Эти факторы оказывают значительное влияние на технологию и трудоемкость обработки резанием наплавленных на детали слоев.

Выбор вида обработки наплавленных поверхностей зависит от их твердости и хрупкости, припуска для удаления дефектного слоя, производительности процессов, требуемой точности. Предварительная обработка деталей после наплавки, как правило, выполняется резцами с пластинами из твердого сплава Т5К10 и Т15К6.

Для чернового точения поверхностей, наплавленных проволокой 30ХГСА, 65Г, электродом ЭН60М и др. проволоками, с твердостью 46 – 61,5 HRC, рекомендуется инструмент из мелкозернистых твердых сплавов ВК3М и ВК6М. Обязательным условием для черновой обработки является применение резцов с отрицательными передними углами, обеспечивающими повышенную прочность рабочей части резца при точении «по корке».

Для чистовой обработки наплавленных деталей с повышенной твердостью рекомендуется инструмент из эльбора-Р и гексанита-Р.

### 6.4. Обработка деталей с газотермическими покрытиями

Чтобы увеличить прочность сцепления газотермических покрытий с основным металлом, перед напылением проводят предварительную механическую обработку детали на токарных станках, которая заключается в нарезании рваной резьбы, кольцевых канавок, косой сетчатой накатки поверхности. Режим обработки и выбор материала инструмента зависят от материала и габаритов детали и от требуемой шероховатости поверхности.

Детали с напыленными покрытиями подвергают различным видам механической обработки – точению, шлифованию, сверлению, строганию, хонингованию, а также слесарной опиловке, шабровке, анодно-механической и элёктроискровой обработке. Механическая обработка металлических покрытий может осуществляться не только в результате съема материала, но и методами пластической деформации – обкаткой роликом, обработкой металлическими щетками, дробью и т. п. Однако своеобразие структуры напыленных покрытий, сложенных из отдельных частиц, обладающих пониженными когезионной прочностью и теплопроводностью и содержащих при напылении на воздухе включения оксидов и нитридов, требует выбора наиболее целесообразного вида инструмента и использования специальных режимов обработки.

### 6.5. Обработка синтетических материалов

Перед обработкой под номинальный размер, выполняемой после нанесения покрытия, для точного центрирования и базирования детали в станке необходимо проверить центровые отверстия и базы, удалить случайные наплывы пластмассы, не повредив металлическую основу. Нанесение покрытий всегда

целесообразно выполнять таким образом, чтобы центровые отверстия оставались совершенно чистыми. Если они находятся вблизи покрываемых поверхностей, то их следует прикрывать. С края поверхности, покрытой пластмассовым слоем, который при сборке должен соответствовать точной посадке детали, в процессе доводки до номинального размера (вала и отверстия) должна быть снята фаска 30 х 3 или 30 х 5 мм для предупреждения перекосов при сборке.

Режим обработки резанием термопластов (в том числе покрытий из полиамида) зависит от температуры плавления материала. Параметры заточки режущего инструмента и скорость резания отличаются от условий, характерных для металлов. Общее правило – режущий инструмент должен контактировать с обрабатываемым материалом на возможно меньшей поверхности и возможно меньшее время.

Величины припусков на механическую обработку одной и той же детали, восстановленной различными способами, могут значительно отличаться. При обработке поверхностей деталей, восстановленных хромированием, припуск на обработку составляет 0,05 – 0,07 мм на сторону. Наплавленная поверхность детали может иметь неровности, поры, раковины, окислы и шлаковые включения, поэтому припуски на обработку назначаются несколько большими, чем обычно: для деталей диаметром до 50 мм припуск принимают до 3 мм, а для деталей диаметром от 50 мм и более величина припуска составляет 3 ÷ 5 мм.

## 6.6. Обработка деталей с электрохимическими покрытиями

Детали с электрохимическими покрытиями подвергаются (при необходимости) только чистовой обработке.

# 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМ ВРЕМЕНИ

Нормирование труда это определение его необходимых затрат на изготовление единицы продукции в конкретных организационно технических условиях. Целью нормирования труда является наиболее точное определение необходимых затрат. ,

## 7.1. Наплавка

Норма времени при восстановлении деталей способом вибродуговой наплавки и наплавки под слоем флюса определяется из выражения

$$T_{\text{н}} = T_{\text{о}} + T_{\text{в}} + T_{\text{доп}} + \frac{T_{\text{пз}}}{n_{\text{шт}}}, \qquad (7.1)$$

где $T_{\text{о}}$ – основное время, мин; $T_{\text{в}}$ – вспомогательное время, мин; $T_{\text{доп}}$ – дополнительное время, мин; $T_{\text{пз}}$ – подготовительно-заключительное время, мин; $n_{\text{шт}}$ – количество деталей в партии, шт.

*Основное время* – это время, в течение которого происходит наращивание слоя металла заданной толщины на изношенные поверхности детали или его удаление в процессе механической обработки детали.

*Вспомогательное время* – это время выполнения комплекса подготовительных и заключительных (вспомогательных) переходов (операций).

Сумма основного и вспомогательного времени называется оперативным временем, т. е.

$$T_{\text{оп}} = T_{\text{о}} + T_{\text{в}} . \qquad (7.2)$$

*Дополнительное время* – это время обслуживания рабочего места. Оно затрачивается на подготовку сварочной проволоки, замену мундштуков, очистку наконечника и уход за станком, за рабочим местом и поддержание его в надлежащем состоянии в течение рабочей смены, на отдых, личные надобности и производственную гимнастику. Оно берется в процентах от оперативного времени и определяется по формуле

$$T_{\text{доп}} = \frac{T_{\text{оп}} \cdot K}{100}, \qquad (7.3)$$

где $K$ – отношение дополнительного времени к оперативному в процентах ($K = 0{,}1 \div 0{,}14$).

*Подготовительно-заключительное время* – это время, затрачиваемое на получение, ознакомление и сдачу работы, на подготовку оборудования и оснастки, на оформление документации на партию одноименных деталей.

Основное время подсчитывается по формуле, мин

$$T_{\text{о}} = \frac{\pi \cdot d \cdot L \cdot i}{1000 \cdot V_{\text{н}} \cdot S}, \qquad (7.4)$$

где $L$ – длина наплавляемой поверхности с учетом захода и выхода электрода, мм; $V_{\text{н}}$ – скорость наплавки, м/ч; $d$ – диаметр детали, мм; $i$ – число ходов; $S$ – шаг наплавки, мм/об.

Ориентировочные режимы вибродуговой наплавки приводятся в табл. 7.1, а наплавки под слоем флюса – в табл. 7.2.

Таблица 7.1

**Режимы вибродуговой наплавки**

| Толщина наплавляемого слоя, мм | Скорость подачи электрода, м/мин | Сила тока, А | Скорость наплавки, м/мин | Шаг наплавки, мм/об | Припуск на механическую обработку на сторону, мм | Примечания |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,6 – 0,7 | 1,3 | 120 – 140 | 1,2 | 1,8 – 2,2 | 0,4 | Наплавка проволокой 1,6 – 1,8 мм |
| 1,5 | 1,7 | 160 – 190 | 1,0 | 2,3 – 2,8 | 0,8 | |
| 2,5 – 3,0 | 1,7 | 160 – 190 | 0,4 | 2,8 – 3,6 | 1 | |

Вспомогательное время включает в себя время на установку и снятие детали (табл. 7.3 и 7.4), и время на проход при наплавке.

Вспомогательное время на проход при наплавке обычно принимается равным 0,8 – 0,9 мин на проход для вибродуговой наплавки и 0,5 мин для наплавки под слоем флюса.

Таблица 7.2

**Режимы автоматической наплавки под слоем флюса**

| Диаметр наплавляемой детали, мм | Величина тока, А | Скорость наплавки, м/мин | Шаг наплавки, мм/об | Высота наплавляемого слоя, мм | Скорость подачи электродной проволоки, м/мин | Диаметр проволоки, мм |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 50 – 60 | 140 – 150 | 0,4 | 3 | 1,4 – 2,0 | 0,8 | 1,5 |
| 65 – 75 | 170 – 180 | 0,4 | 4 | 1,5 | 1,3 | 1,6 |
| 80 – 100 | 180 – 200 | 0,5 | 4 | 1,5 – 2,0 | 1,7 | 2,0 |
| 150 – 200 | 200 – 240 | 0,5 | 5 | 2,0 – 3,0 | 2,2 | 2,0 |
| 250 – 300 | 250 – 275 | 0,5 | 6 | 2,0 – 3,0 | 3,3 | 3,0 |

Таблица 7.3

**Вспомогательное время на установку и снятие детали (наплавка), мин**

| Вид наплавки | Масса наплавляемой детали, кг | Время на установку и снятие детали, мин | | |
|---|---|---|---|---|
| | | в трехкулачковом патроне | в центрах | в центрах с люнетом |
| Вибродуговая наплавка | До 10 | 1,0 | 0,5 | 1,0 |
| | Свыше 10 | 1,5 | 1,0 | 1,5 |
| Наплавка под слоем флюса | 5 | 0,7 | 0,6 | – |
| | 10 | 1,0 | 0,8 | – |
| | 20 | 1,5 | 1,1 | – |
| | 30 | 2,0 | 1,4 | – |

Подготовительно-заключительное время затрачивается на получение наряда и инструктажа, установление и проверку режимов наплавки детали, на сдачу работы и уборку станка. Оно определяется по табл. 7.4.

Таблица 7.4

**Подготовительно-заключительное время (наплавка), мин**

| Элемент работы | Время, мин | | |
|---|---|---|---|
| | при простой работе | при работе средней сложности | при сложной работе |
| Получение производственного задания, указания, инструктажа | 5 | 7 | 10 |
| Ознакомление с работой | 3 | 5 | 7 |
| Подготовка приспособлений | – | 3 | 5 |
| Сдача работы | 2 | 2 | 2 |
| Итого: | 10 | 17 | 24 |

***Пример 13***

Определить $T_{шт.к}$ на операцию наплавки шатунной шейки коленчатого вала двигателя КамАЗ-740.

*Исходные данные*: материал коленчатого вала – сталь 42ХМФА; диаметр шейки $D = 80_{-0,013}$ мм; длина шейки – $b = 67^{+0,12}$ мм.

Наплавку производят проволокой Нп-30ХГСА диаметром $d$ = 5 мм под слоем флюса АН-348А. Партия деталей – 40 штук.

Площадь поперечного сечения шва $F = \pi \cdot r^2$, где $r$ = 2,5 мм – радиус проволоки; $F$ = 19,6 мм$^2$.

Длина наплавленного шва $L = \pi \cdot D \cdot n$, где $n$ – количество швов на шейке. $n = b / S$, где $S$ – шаг наплавки, мм, равный 2 – 6 диаметрам проволоки.

При $S = 2d$ = 10 количество швов $n$ = 7; $L$ = 1758,4 мм.

При $\gamma$ = 7,8 г/см$^3$ $k_п$ = 0,9; $d_н$ = 12 г/(А ·ч); $I$ = 180 А; $k_с$ =1.

$$T_о = \frac{0,06 \cdot 19,6 \cdot 1758,4 \cdot 7,8 \cdot 0,9}{12 \cdot 180} = 6,72 \text{ мин.}$$

Вспомогательное время $T_в$ = 2,0 мин [12], дополнительное время на обслуживание рабочего места $T_{обс}$, а также на отдых и личные потребности $T_{о.л}$:

$$T_д = 0,05\ (T_о + T_в) = 0,05 \cdot (6,72 + 2,0) = 0,44 \text{ мин.}$$

Подготовительно заключительное время $T_{пз}$ = 20 мин.

Штучно-калькуляционное время на наплавку одной шатунной шейки

$$T_{шт.к} = T_{оп} + T_д + \frac{T_{пз}}{n_п};$$

$$T_{шт.к} = 6,72 + 2,0 + 0,44 + 20/40 = 9,66 \text{ мин.}$$

### 7.2. Электрохимические покрытия

Норму времени при нанесении электрохимических покрытий определяют по формуле

$$T_{\text{н}} = \frac{(T_{\text{о}} + T_i)k_{\text{пз}}}{n_{\text{д}} \cdot \eta_{\text{в}}}, \qquad (7.5)$$

где $T_{\text{о}}$ – продолжительность осаждения покрытия, ч; $T_i$ – время на загрузку и выгрузку деталей из ванны, принимают равным 0,1 ÷ 0,2 ч; $k_{\text{пз}}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное и подготовительно- заключительное время, при односменной работе принимают равным 1,1 ÷1,2; при двухсменной – 1,03 ÷ 1,05; $n_{\text{д}}$ – число деталей, одновременно наращиваемых в ванне, шт.; $\eta_{\text{в}}$ – коэффициент использования ванны ($\eta_{\text{в}}$ = 0,8 ÷ 0,95).

Продолжительность осаждения покрытия определяют по формуле

$$T_{\text{о}} = \frac{1000 \cdot h \cdot \gamma}{c \cdot I \cdot S \cdot \eta}, \qquad (7.6)$$

где $h$ – толщина наращиваемого слоя на сторону, мм; $\gamma$ – плотность осаждаемого металла (для хромирования – 6,9, осталивании – 7,8 г/ см$^3$); $c$ – электрохимический эквивалент осаждаемого металла (см. табл. 5.4); $S$ – площадь хромирования, дм$^2$; $I$ – сила тока, А; $\eta$ – выход металла по току (см. табл. 5.4).

### 7.3. Механическая обработка

Расчет норм времени при механической обработке приведен в работе [12].

## . ОФОРМЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

### 8.1. Оформление технологической документации

В комплект технологической документации на восстановление детали входят: ремонтный чертеж, маршрутная карта ремонта (МК), операционная карты (ОК), карты эскизов (КЭ). Примеры оформления операционных и эскизных карт приведены в работе [12].

Пример оформления маршрутной карты ремонта приведен в прил. 8

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Восстановление деталей машин*: справочник / Ф. И. Пантелеенко, В. П. Лялякин, В. П. Иванов [и др.]. М.: Машиностроение, 2003. 672 с.

2. *Воробьев Л. Н.* Технология машиностроения и ремонт машин. М.: Высшая школа, 1981. 344 с.

3. *Иванов В. П.* Технология и оборудование восстановления деталей машин: учебник. М.: Техноперспектива, 2007. 458 с.

4. *Краткий справочник металлиста* / под общ. ред. А. Е. Древаля, Е. А. Скороходова. 4-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2005. 960 с.

5. *Молодык Н. В., Зенкин А. С.* Восстановление деталей машин: справочник. - М.: Машиностроение, 1989. 480 с.

6. С*олод Г. И., Морозов В. И., Русихин В. И.* Технология машиностроения и ремонт горных машин: учебник для вузов. М.: Недра, 1988. 421 с.

7. *Хазин М. Л.* Теория и методы восстановления деталей горных машин: уч. пособие. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2005. 308 с.

8. *Обработка металлов резанием*. Справочник технолога / под ред. А. А. Панова. М.: Машиностроение, 2004. 784 с.

9. *Общемашиностроительные нормативы времени*: вспомогательного, на обслуживание рабочего места и подготовительно-заключительного для технического нормирования станочных работ. М.: Машиностроение, 1974. 345 с.

10. *Справочник технолога-машиностроителя*. Т. 1 и 2 / под. ред. А. Г. Косиловой. М.: Машиностроение, 2001.

11. *Глинникова Т. П., Волегов С. А.* Справочно-методическое пособие по оформлению технологической части ВКРБ, ВКРИ и курсового проекта для студентов направления 150400 – «Технологические машины и оборудование». Екатеринбург: УГГУ, 2008. 75 с.

12. *Глинникова Т. П., Волегов С. А.* Технология машиностроения. Технологическая часть ВКРИ: пособие по выполнению технологической части ВКР инженера для студентов специальности 130602 – «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов» (МНГ) направления 130600 – «Оборудование и агрегаты нефтегазового производства» очного и заочного обучения. Екатеринбург: УГГУ, 2010. 80 с.

13. *Рябов В. Ю., Новикова Н. А.* Методическое руководство для самостоятельной работы студентов специальности 150402 ГМО по дисциплине «Метрология, стандартизация и сертификация». Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2006. 36 с.

Приложение 1

**ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ**

Министерство науки и образования РФ
ФБГОУ ВПО
«Уральский государственный горный университет»

# КУРСОВАЯ РАБОТА

по дисциплине
Технология ремонта, восстановления и сборки машин
*на тему*

«РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ _____»
(наименование детали)

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Вариант задания № _____

Студент _____
(Ф. И. О.)

Группа _____
(номер группы)

Преподаватель _____
(Ф. И. О.)

Екатеринбург – 2018

Приложение 2

**ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ПЕРВОГО ЛИСТА ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ**

## СОДЕРЖАНИЕ


1. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛИ
2. АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ И ОЦЕНКА ПРИГОДНОСТИ ДЕТАЛИ
   - 2.1. Дефект № 1
   - 2.2. Дефект № 2
   - 2.3. Дефект № 3
3. ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ
   - 3.1. Выбор по технологическому критерию
   - 3.2. Выбор по техннческому критерию
   - 3.3. Выбор по техннико-экономическому критерию
   - 3.4. Окончательный выбор способа восстановления детали
4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ
5. РАСЧЕТ ПРИПУСКОВ
6. ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ, ПРИСПОСОБЛЕНИЙ, ИНСТРУМЕНТА
   - 6.1. Выбор оборудования
   - 6.2. Выбор приспособлений
   - 6.3. Выбор инструмента
7. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ
   - 7.1. Предварительная механическая обработка
   - 7.2. Электрохимическое хромирование
   - 7.3. Механическая обработка
8. НОРМИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ
   - 8.1. Токарная обработка
   - 8.2. Наплавочная
   - 8.3. Токарная обработка
   - 8.4. Фрезерная обработка
9. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ
10. ЛИТЕРАТУРА


| | | | | | КР МШС-17 025 ПЗ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | | | |
| Разработал | | Пупкин В.М. | | | Разработка технологического процесса восстановления вала | Лит. | Лист | Листов |
| Руководитель | | Зверев Р.Г. | | | | | 2 | 36 |
| Консультант | | Волков А.С. | | | | | | |
| Н. Контр. | | Крокодилов П.В. | | | 61 | УГГУ группа МШС –17 | | |
| Утвердил | | Боярских Г.А. | | | | | | |

Приложение 3

**ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ПОСЛЕДУЮЩИХ ЛИСТОВ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ**

## 1. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛИ

Заданная деталь представляет собой вал-шестерню.

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | КР МШС-12 025 ПЗ | Лист |
| Изм | Лист | № документа | Подпись | Дата | | 3 |

Приложение 4

## ХАРАКТЕРИСТИКИ СПОСОБОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Таблица П4.1

## СПОСОБЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

| Способ восстановления | Область применения |
|---|---|
| *Сварка* | |
| – ручная дуговая | Заварка трещин, приварка накладок, вставок, заплат, наплавка износостойких материалов. |
| – автоматическая и механизированная дуговая | Заварка трещин, приварка накладок, вставок, заплат, сварка тонколистового материала. |
| – аргонодуговая | Сварка и наплавка алюминия и коррозионностойкой стали. |
| – газовая | Заварка трещин, приварка накладок, сварка тонколистового материала. |
| – ультразвуковая | Сварка цветных металлов, стали, негабаритных деталей |
| *Наплавка* | |
| – электродуговая под флюсом | Наплавка деталей диаметром более 50 мм при повышенных требованиях к качеству наплавленного материала с толщиной наплавленного слоя более 1 мм |
| – электродуговая в углекислом газе | Наплавка стальных деталей диаметром более 16 мм широкой номенклатуры, работающих в различных условиях |
| – вибродуговая | Наплавка стальных деталей, работающих в различных условиях при невысоких требованиях к сопротивлению усталости |
| – электродуговая порошковой проволокой или лентой | Наплавка износостойких слоев на деталях, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания, ударных нагрузок, в узлах трения |
| – плазменная | Наплавка ответственных деталей при повышенных требованиях к износостойкости и сопротивлению усталости |
| – контактная | Наплавка гладких цилиндрических наружных и внутренних поверхностей с износами не более 1 мм |
| – газовая | Наплавка цилиндрических и профильных поверхностей с местным износом и повышенных требованиях к износостойкости |
| – аргонодуговая | Наплавка алюминиевых деталей и деталей из коррозионно-стойкой стали |
| – электроискровая | Наращивание и упрочнение поверхностей с износом до 0,2 мм при невысоких требованиях к сплошности покрытия |
| – высокочастотная | Наплавка износостойких материалов на рабочие органы и лезвия |

*Продолжение табл. П4.1*

| Способ восстановления | Область применения |
|---|---|
| *Нанесение газотермических покрытий* | |
| – пламенное порошковыми материалами без оплавления (на ацетилене или пропан-бутане) | Наружные и внутренние цилиндрические поверхности неподвижных сопряжений при невысоких требованиях к прочности сцепления с основным материалом |
| – плазменное порошковыми материалами и проволокой | Наружные и внутренние цилиндрические поверхности |
| – ионно- плазменное | Нанесение износостойких и защитных покрытий толщиной до 0,02 мм |
| – детонационное | Нанесение износостойких покрытий с особыми свойствами |
| – электродуговое и высокочастотное | Наружные и внутренние цилиндрические поверхности с невысокими требованиями к прочности сцепления |
| *Холодное пластическое деформирование* | |
| – раздача | Восстановление наружных поверхностей полых деталей с нежесткими требованиями к внутреннему размеру |
| – вытяжка | Восстановление длины деталей с нежесткими требованиями к наружным размерам |
| – дорнование и калибровка | Восстановление поверхностей в отверстии после осадки или термического воздействия. Упрочнение и выглаживание |
| – правка | Восстановление формы |
| – накатка | Восстановление поверхности неответственных деталей, восстановление рифленой и шлицевой поверхностей |
| – осадка | Восстановление наружных и внутренних поверхностей деталей при нежестких требованиях к длине |
| – обжим | Восстановление внутренних поверхностей деталей при нежестких требованиях к размерам наружных поверхностей |
| *Горячее пластическое деформирование* | |
| – давление в закрытом штампе | Восстановление формы и элементов деталей за счет перераспределения металла из нерабочих поверхностей на рабочие для компенсации износа |
| – накатка | Восстановление зубчатых профилей шестерен и звездочек |
| – ротационное деформирование | Восстановление зубчатых и шлицевых поверхностей. |
| – обжим | Восстановление внутренних размеров деталей при нежестких требованиях к наружным |
| – правка | Восстановление формы |
| – вытяжка | Восстановление длины деталей с нежесткими требованиями к наружным размерам |
| – осадка | Восстановление наружных и внутренних рабочих поверхностей |

*Продолжение табл. П4.1*

| Способ восстановления | Область применения |
|---|---|
| *Электрохимические процессы* | |
| – осталивание | Восстановление наружных и внутренних поверхностей деталей преимущественно с износом, не превышающим 0,2–0,5 мм, высокой поверхностной твердостью и при нежестких требованиях к прочности сцепления покрытия с основным металлом |
| – хромирование | Восстановление наружных и внутренних поверхностей деталей с износом, не превышающим 0,2 мм, и высокими требованиями по износостойкости восстановленных поверхностей |
| – никелирование | Восстановление наружных и внутренних поверхностей деталей с износом, не превышающим 0,05 мм |
| – цинкование | Защитное покрытие от коррозии. |
| – меднение | Восстановление наружных и внутренних поверхностей деталей из меди и ее сплавов |
| – кадмирование | Защитные антикоррозионные покрытия |
| *Нанесение полимерных материалов* | |
| – напылением, намазыванием | Восстановление посадочных поверхностей неподвижных сопряжений, заделка трещин, пробоин |
| – литьем: под давлением, опрессовкой | Восстановление антифрикционных, электроизоляционных и декоративных покрытий, изготовление деталей |
| – намазыванием жидких прокладок, герметиков | Восстановление герметичности соединений |
| *Обработка под ремонтный размер* | |
| – категорийный | Обработка детали под заданный ремонтный размер сопрягаемой детали с ремонтными стандартными размерами |
| – индивидуальный | Восстановление формы и посадок поверхностей обработкой более дорогостоящей детали, подгонка менее дефицитной и дорогой детали по размерам основной с обеспечением заданной посадки |
| *Постановка дополнительных деталей* | |
| – обрезка и приварка быстроизнашивающихся элементов | Восстановление рабочих органов строительных и горных машин |
| – бандажирование | Восстановление наружных поверхностей деталей с предварительной механической обработкой и без нее |
| – постановка втулок и компенсационных шайб | Восстановление отверстий, размерных цепей |
| – постановка свертных колец с закрепляющим раскатыванием | Восстановление отверстий |
| – постановка фигурных вставок и стяжек | Устранение трещин, восстановление герметичности |
| – приварка и приклеивание накладок и заплат | Устранение трещин, пробоин, восстановление герметичности |

*Окончание табл. П4.1*

| Способ восстановления | Область применения |
|---|---|
| *Электромеханическая обработка* | |
| – высаживание и выглаживание | Восстановление поверхностей с износом до 0,2 мм у неподвижных сопряжений |
| *Электрофизическая обработка* | |
| – электроконтактная электроабразивная, анодномеханическая | Обработка наплавленных поверхностей с высокой твердостью, удаление остатков обломанных инструментов |
| *Электрохимическая обработка.* | |
| – инструментом с подачей электролита | Обработка наплавленных поверхностей с высокой твердостью |

Таблица П4.2

**Способы ремонта, применяемые при устранении некоторых типовых дефектов деталей**

| Вид дефекта | Рекомендуемые способы ремонта |
|---|---|
| Нарушение формы поверхностей или требований к их взаимному расположению | Холодная или горячая правка<br>Механическая обработка |
| Износ шпоночного паза | Обработка под ремонтный размер<br>Заделка изношенного паза, фрезерование нового паза под углом в 90° или 120° к изношенному |
| Износ шлицев | Пластическое деформирование<br>Заваривание изношенных шлицев, фрезерование (протягивание) новых шлицев номинального размера |
| Срыв более двух ниток, износ, смятие резьбы (наружной и внутренней) | Заваривание резьбы, нарезание резьбы номинального размера<br>Нарезание резьбы ремонтного размера<br>Постановка дополнительной детали |
| Нарушение защитного покрытия | Цинкование, кадмирование, оксидирование, фосфатирование, хромирование |
| Трещины | Разделка и заварка |
| Усталостные трещины (выкрашивание) | Деталь бракуется |

Таблица П4.3

**Технологические характеристики способов восстановления**

| Способ восстановления | Толщина слоя, мм | | Суммарный припуск, *Z*, мм | Минимальный наружный диаметр поверхности, мм | Минимальный внутренний диаметр поверхности, мм | Снижение усталостной прочности, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | наименьшая | наибольшая | | | | |
| *Наплавка* | | | | | | |
| – ручная электродуговая | 1 | 5 | 2 | 10 | 40 | 30 |
| – в среде углекислого газа | 0,5 | 3 | 2 | 15 | – | 15 |
| – в среде водяного пара | 1 | 3 | 2 | 15 | – | 15 |
| – под слоем флюса | 1,5 | 3 | 2 | 35 | – | 15 |
| – вибродуговая | 0,5 | 2 | 1 | 15 | 50 | 50 |
| – плазменная | 0,2 | 6,5 | 1 | | | |
| – контактная наплавка | 0,3 | 1,5 | 1 | 5 | – | 15 |
| *Электрохимическое наращивание* | | | | | | |
| – хромирование | 0,05 | 0,3 | 0,1 | 5 | 40 | 20 |
| – осталивание | 0,1 | 3 | 0,1 | 12 | 40 | 25 |
| *Электромеханическое выглаживание* | 0,2 | | 0,1 | | | |
| *Пластическое деформирование* | 0,5 | 2 | 0,2 | | | |
| *Постановка дополнительной детали* | 1 | 5 | 0,2 | | | |
| *Напыление* | | | | | | |
| – дуговая металлизация | 0,3 | 3 | 2 | 30 | – | 12 |
| – электрометаллизация | | | | 30 | 100 | 45 |
| – газопламенное напыление | 0,3 | 1,5 | 2 | 30 | – | 45 |
| – плазменное | 0,3 | 3 | | | | |

Таблица П4.4

**Коэффициенты износостойкости, выносливости, сцепляемости**

| Способы восстановления | Значения коэффициентов | | |
|---|---|---|---|
| | износостойкости, $K_{и}$ | выносливости, $K_{в}$, | сцепляемости, $K_{сц}$ |
| Ручная электродуговая наплавка | 0,9 | 0,8 | 0,8 |
| Электродуговая наплавка в углекислом газе | 0,85 | 0,9÷1,0 | 1,0 |
| Вибродуговая наплавка | 0,85 | 0,62 | 1,0 |
| Электродуговая наплавка под слоем флюса | 0,90 | 0,82 | 1,0 |
| Газовая наплавка | 0,7 | 0,7 | 1,0 |
| Плазменная наплавка | 1,0 | 0,7 | 0,4 |
| Дуговая металлизация | 1,0÷1,3 | 0,6÷1,1 | 0,2÷0,3 |
| Газопламенное напыление | 1,0÷1,3 | 0,6÷0,1 | 0,3÷0,4 |
| Плазменное напыление | 1,0÷1,5 | 0,7÷1,3 | 0,4÷0,5 |
| Хромирование (электрохимическое) | 1,0÷1,3 | 0,7÷1,3 | 0,4÷0,5 |
| Осталивание (электрохимическое) | 0,9÷1,2 | 0,8 | 0,65÷0,8 |
| Контактная наплавка (приварка металлического слоя) | 0,9÷1,1 | 0,8 | 0,8÷0,9 |
| Ручная наплавка | 0,9 | 0,8 | 1,0 |
| Клеевые композиции | 1,0 | – | 0,7 |
| Электромеханическая обработка (высадка и сглаживание) | До 3,00 | 0,8 | 1,0 |
| Обработка под ремонтный размер | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Установка дополнительной детали | 1,0 | 0,8 | 1,0 |
| Пластическое деформирование | 0,8÷1,0 | 1,0 | 1,0 |

Таблица П4.5

**Удельная себестоимость восстановления изношенных поверхностей деталей различными способами**

| Способы восстановления | Удельная себестоимость восстановления, руб/дм$^2$ | Способы восстановления | Удельная себестоимость восстановления, руб/дм$^2$ |
|---|---|---|---|
| *Наплавка* | | *Металлизация (напыление)* | |
| – ручная электродуговая | 97 | – дуговая металлизация | 71 |
| – электродуговая в углекислом газе | 45 | – газопламенная | 46 |
| – электродуговая в водяном паре | 44 | – плазменная | 44 |
| – вибродуговая | 68 | Обработка под ремонтный размер | 12 |
| – электродуговая под слоем флюса | 47 | Электромеханическая обработка (высадка и сглаживание) | 58 |
| – контактная (приварка металлического слоя) | 40 | Установка дополнительной детали | 34 |
| – электроискровая | 28 | *Электрохимическое осаждение* | |
| – плазменная | | – хромирование | 68 |
| – газовая | 77 | – осталивание | 30 |
| Пластическое деформирование | 38 | Клеевые композиции | 22 |

Таблица П4.6

**Припуск на механическую обработку после нанесения покрытий**

| Способ получения покрытия | Припуск на сторону, мм |
|---|---|
| Ручная дуговая наплавка | 1,4 – 1,7 |
| Дуговая наплавка под слоем флюса | 0, 8 – 1,1 |
| Наплавка в среде углекислого газа. | 0,6 – 0,8 |
| Электроконтактная наплавка | 0,8 – 1,0 |
| Вибродуговая наплавка | 0,6 – 0,8 |
| Плазменная наплавка | 0,4 – 0, 6 |
| Контактная наварка | 0,2 – 0,5 |
| Газотермическое напыление | 0,2 – 0,5 |
| Осталивание | 0,1 – 0,2 |
| Хромирование | 0,05 – 0,1 |

Таблица П4.7

## Припуски на снятие цементированного слоя

| Глубина цементированного слоя, мм | Размеры, мм | Припуск, мм | |
|---|---|---|---|
| | | на диаметр для цилиндрических наружных и внутренних поверхностей | на сторону для плоских (в том числе торцевых) поверхностей |
| 0,46 – 0,6 | До 30 | 1,5 | 1,0 |
| | 30 – 80 | 1,7 | 1,1 |
| | 80 – 180 | 2,0 | 1,2 |
| 0,6 – 0,8 | До 30 | 2,0 | 1,0 |
| | 30 – 180 | 2,2 | 1,2 |
| | 180 – 260 | 2,5 | 1,5 |
| 0,8 – 1,1 | До 30 | 2,5 | 1,5 |
| | 30 – 120 | 2,7 | 1,7 |
| | 120 – 500 | 3,0 | 2,0 |
| 1,1 – 1,4 | До 30 | 3,2 | 1,8 |
| | 30 – 120 | 3,5 | 2,0 |
| | 120 – 500 | 4,0 | 2,3 |

Приложение 5

# СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Таблица П5.1

## Материал режущего инструмента

| Способ обработки | Материал детали | Материал инструмента |
|---|---|---|
| Наружное продольное и поперечное точение проходными резцами с углом φ = 45, 60 и 90°; подрезными резцами; растачивание отверстий расточными резцами с углом φ = 45, 60 и 90°: | | |
| – черновое | Сталь | Т5К10 |
| – получистовое и чистовое | Сталь<br>Сталь < 49 HRC<br>Сталь > 50 HRC | Т30К4,Т15К6<br>Т14К8, Т30К4, Т15К4, ВК6<br>ВК4, ВК6, ВК9 |
| – черновое | Серый чугун | ВК6, ВК8 |
| – чистовое | Серый чугун | ВК2, ВК3 |
| – черновое и чистовое | Ковкий чугун<br>Цветные металлы | ВК8<br>ВК6 |
| Подрезка канавок отрезными резцами | Сталь<br>Чугун | Т15К6, Т5К10 ВК6,<br>ВК8 |
| Нарезание резьбы резьбовыми резцами | Сталь<br>Чугун | Т30К4, Т15К6, Т14К3<br>ВК6, ВК8, ВК2, ВК3, ВК4 |
| Сверление, рассверливание, зенкерование и развертывание | Сталь, чугун<br>Алюминиевые сплавы | Р18<br>Р18 |
| Фрезерование торцевыми фрезами | Сталь<br>Чугун<br>Алюминиевые сплавы | Т3К10,Т15К6, Т14К8<br>ВК8, ВК6<br>Р18 |
| Фрезерование цилиндрическими, дисковыми, прорезными фрезами | Сталь, чугун | Р18 |
| | Алюминиевые сплавы | Р18 |

Таблица П5.2

## Коэффициенты трения для материалов

| Материал сопрягаемых деталей | Коэффициент трения |
|---|---|
| Сталь – сталь | 0,06 – 0,13 |
| Сталь – чугун | 0,07 – 0,12 |
| Сталь – латунь | 0,05 – 0,1 |
| Сталь пластмассы | 0,15 – 0,25 |

Таблица П5.3

**Модули упругости и коэффициенты Пуассона для некоторых материалов**

| Материал | Модуль упругости, $E \cdot 10^9$, Па | Коэффициент Пуассона | Материал | Модуль упругости, $E \cdot 10^9$, Па | Коэффициент Пуассона |
|---|---|---|---|---|---|
| Сталь углеродистая | 2,0 – 2,1 | 0,26 | Бронза фосфо-ристая | 1,15 | 0,33 |
| Сталь легированная | 2,1 – 2,2 | 0,28 | Бронза марган-цевая | 1,10 | 0,35 |
| Чугун белый, серый | 1,15 – 1,60 | 0,25 | Бронза алюми-ниевая | 1,05 | 0,34 |

Приложение 6

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Таблица П6.1

**Характеристики наплавочных станков для дуговой наплавки**

| Параметр | В защитных газах У-651 | Под слоем флюса У-652 |
|---|---|---|
| *Размеры наплавляемого изделия, мм:* | | |
| – диаметр | 20 – 500 | 40 – 150 |
| – длина | 1300 | 1200 |
| *Диаметр электродной проволоки, мм:* | | |
| – сплошной | 1,6 – 3,5 | 1,6 – 2,5 |
| – порошковой | 2,0 – 3,0 | – |
| *Скорость подачи электродной проволоки, м/ч* | 50 – 500 | 50 – 500 |
| *Скорость линейного перемещения сварочной головки, м/ч* | 0,5 – 150,0 | 0,5 – 150,0 |
| *Частота вращения шпинделя, мин$^{-1}$* | 0,025 – 8,7 | 0,03 – 10,4 |

Таблица П6.2

**Характеристики установок «Ремдеталь» для электродугового напыления**

| Показатель | УД-609.01 | УД-609.10 |
|---|---|---|
| | детали типа «вал» | плоские детали |
| Производительность, кг/ч | До 10 | 18,8 (сталь)<br>12 (алюминий)<br>40 (цинк) |
| Рабочее напряжение, В | 24–36 | 17–40 |
| Сварочный ток, А | 240–310 | 50–400 |
| Частота вращения детали, об/мин | 80 | – |
| Диаметр применяемых проволок, мм | 1,6–2,0 | 1,5–2,0 |
| Расход сжатого воздуха, м$^3$/ч | 120 | До 150 |
| Рабочее давление сжатого воздуха, МПа | 0,5–0,6 | 0,3–0,6 |
| Максимальная толщина покрытия, мм | 5 | – |
| *Максимальные размеры восстанавливаемых деталей, мм* | | |
| Длина | 2500 | 600 |
| Диаметр (ширина) | 400 | 450 |
| Занимаемая площадь, м$^2$ | 9 | 6 |
| Габаритные размеры, мм | 2620x760x1600 | 1420x760x1600 |
| Масса комплекта, кг | 700 | 600 |

Таблица П6.3

**Характеристики гальванических установок**

| Установка | Вместимость ванны, л | Производительность, $дм^2/ч$ | Род тока | Ток, А | Мощность, кВт | Габаритные размеры, мм | Масса, кг | Назначение |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0013-040 Ремдеталь | 160 | 20 ($h$ = 0,2)* | Асимметричный, постоянный | 200 | 42** | 1035x1725x3230 | 950 | остаивание |
| 0013-024 Ремдеталь | 560 | 17 | То же | 630 | 12** | 1180x2146x4305 | 1250 | остаивание |
| 0013-022 Ремдеталь | 390 | 20 ($h$ = 0,25)* | Постоянный | 50 $А/дм^2$ | 42** | 9750x4000x3500 | 5500 | остаивание |
| 0013-031 Ремдеталь | 600 | – | Ассиметричный, постоянный | 630 | 15** | 1560x2500x1940 | 956 | холодное остаивание |
| 0013-035 Ремдеталь | 200 | 8 ($h$ = 0,05)* | То же | 400 | 16,8** | 4800x1400x2500 | 1370 | хромирование |

*Примечания:* * В скобках дана толщина покрытия, при которой достигается указанная производительность.

** Мощность источника питания без учета мощности нагревателей.

Приложение 7

# РЕЖИМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Таблица П7.1

**Зависимость тока при наплавке под флюсом и в среде защитных газов от диаметра детали**

| Диаметр детали, мм | Сила тока, А при диаметре электродной проволоки, мм | |
|---|---|---|
| | 1,2 – 1,6 | 2 – 2,5 |
| 50 – 60 | 120 – 140 | 140 – 160 |
| 65 – 75 | 150 – 170 | 180 – 220 |
| 80 – 100 | 180 – 200 | 230 – 280 |
| 150 – 200 | 230 – 250 | 300 – 350 |
| 250 – 300 | 270 – 300 | 350 – 380 |

Таблица П7.2

**Режимы токарной обработки восстанавливаемых деталей**

| Способ восстановления | Вид обработки | Материал инструмента | Режимы резания | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | скорость резания, *V*, м/мин | подача, *S*, мм/об | глубина обработки, *t*, мм |
| Наплавка | Черновая | Т15К6, Т14К8, ВК6, ВК8 | 46,0 | 0,2 | 1,0 |
| | | | 27,5 | 0,3 | 2,0 |
| | Чистовая | Т15К6, Т14К8, ВК3, ВК6, ВК8 | 138 | 0,15 | 0,25 |
| | | | 104 | 0,20 | 0,50 |
| Газотермическое напыление порошковых материалов | То же | Т15К6, Т14К8, ВК6, ВК8 | 20 | 0,30 | 0,50 |
| | То же | Т15К6, Т14К8, ВК6, ВК8 | 40 | 0,15 | 0,20 |
| Осталивание | -«- | Т15К6, ВК6, ВК8, Т30К4 | 30 | 0,50 | 2,00 |
| | -«- | Т15К6, ВК6, ВК8, Т30К4 | 60 | 0,12 | 0,20 |

Таблица П7.3

**Режимы шлифования восстанавливаемых деталей**

| Способ восстановления | Вид обработки | Характеристика шлифовального круга | Режимы обработки | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $v_к$, м/с | $v_д$, м/мин | $S_{пр}$, м/мин | $t$, мм |
| Наплавка | Черновая | Нормальный электрокорунд, зернистость 40-50, твердость СТ-СТ1, связка | 25 – 30 | 10 – 15 | 0,7 – 1,2 | 0,01 – 0,05 |
| | Чистовая | Белый электрокорунд, зернистость 25-40, твердость СМ2-СМ1, связка керамическая | 30 – 32 | 12 – 15 | 0,4 – 0,7 | 0,008 – 0,01 |
| Газотермическое напыление порошковых материалов | Черновая | Нормальный электрокорунд, зернистость 46-60, твердость СМ2-СМ1, связка керамическая | 10 – 30 | 6 – 15 | 0,5 – 0,7 | 0,01 – 0,03 |
| | Чистовая | То же | 20 – 30 | 3 – 6 | 0,3 – 0,5 | 0,008 – 0,01 |
| Контактная наварка металлической ленты | Чистовая | Белый электрокорунд, зернистость 25-40, твердость СМ2-СМ1, связка керамическая | 30 – 40 | 25 – 30 | 0,2 – 0,3 | 0,008 – 0,01 |
| Осталивание | Чистовая | Синтетический алмаз АСП10К6, АСП15К8, АСП25К6-50, АСП30К6-50 | 25 – 35 | 20 – 25 | 1,0 – 1,5 | 0,01 – 0,02 |
| Хромирование | Чистовая | Нормальный электрокорунд, зернистость 40-50, твердость С1-С2, связка керамическая | 30 – 40 | 15 – 20 | 1,0 – 1,5 | 0,008 – 0,01 |

Таблица П7.4

**Средняя точность и параметр шероховатости обработанных наружных поверхностей тел вращения**

| Способ обработки | Квалитет | Параметр шероховатости | |
|---|---|---|---|
| | | *Ra*, мкм | *Rz*, мкм |
| *Обтачивание* | | | |
| – однократное | 12 | 6,3 | 30 |
| – черновое + обтачивание чистовое | 11 – 10 | 3,2 | 15 |
| – однократное + шлифование однократное | 10 – 8 | 1,6 – 0,63 | 8,0 – 3,2 |
| – обтачивание чистовое + шлифование однократное | 8 – 6 | 0,63 | 3,2 |
| – однократное + шлифование черновое + +шлифование чистовое | 7 – 6 | 0,4 | 1,8 |
| – черновое + обтачивание чистовое + +шлифование черновое + шлифование чистовое | 6 | 0,4 | 1,8 |
| – черновое + обтачивание чистовое + +шлифование чистовое + шлифование тонкое | 5 | 0,2 – 0,1 | 0,9 – 0,5 |
| *Растачивание* | 12 | 12,5 – 3,2 | 50 – 15 |
| Сверление | 12 | 25,0 – 12,5 | 100 – 50 |
| Сверление + зенкерование | 11 | 6,3 – 3,2 | 30 – 15 |
| Сверление + развертывание | 9 – 8 | 3,2 – 1,6 | 30 – 8,0 |
| Сверление + протягивание | 9 – 8 | 3,2 – 0,4 | 30 – 1,8 |
| Рассверливание | 12 | 25,0 – 6,3 | 100 – 3,2 |
| Зенкерование | 12 | 12,5 – 3,2 | 50 – 15 |
| *Фрезерование цилиндрическими и торцевыми фрезами* | | | |
| – черновое | 14 – 11 | 12,5 – 3,2 | 50 – 15 |
| – получистовое и однократное | 12 – 11 | 3,2 – 1,6 | 30 – 8,0 |
| – чистовое | 10 | 1,6 – 0,63 | 8,0 – 3,2 |
| *Шлифование* | | | |
| – однократное | 8-7 | 1,6 – 0,4 | 8,0 – 1,8 |
| – черновое | 9-8 | 0,63 – 0,4 | 3,2 – 1,8 |
| – чистовое | 7 | 0,4 – 0,1 | 1,8 – 0,5 |

Таблица П7.5

**Основные параметры процесса нанесения гальванических покрытий**

| Вид покрытия | $h$, мм, | $\gamma$, г/см$^3$ | $J_к$, А/дм$^2$ | $C$, г/(А · ч) | $\eta$, % |
|---|---|---|---|---|---|
| Хромирование: | | | | | |
| – износостойкое | 0,2 – 0,3 | 6,9 | 30 – 60 | 0,324 | 13 |
| – защитно-декоративное | 0,001 | 6,9 | 30 – 25 | 0,324 | 13 |
| Осталивание | 0,2 – 0,6 | 7,8 | 30 – 50 | 1,042 | 95 |
| Меднение | 0,003 – 0,030 | 8,9 | 3 | 1,195 | 100 |
| Никелирование | 0,015 – 0,020 | 8,9 | 3 | 1,095 | 95 |
| Цинкование | 0,020 – 0,010 | 7,1 | 2 | 1,230 | 95 |

Приложение 8

# ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ МАРШРУТНОЙ КАРТЫ РЕМОНТА

ГОСТ 3.1105-74 Форма 5

| | Маршрутная карта ремонта | Обозначение и наименование детали (сборочная единица) | Наименование, марка матер. | Код технологического оснащения | Код ремонта |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Ведущий вал | 40Х | | |

| | Код и наименование дефекта | | Наименование и содержание операций | Оборудование (код, наименование, инвентарный номер, шифр наладки) | Оснастка (код, наименование) | | Тшк. | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Износ шейки под | 005 | Кругло-шлифовальная | Круглошлифов. | | | | |
| | подшипником | | | 3М161Е | | | | |
| | | 010 | Гальваническая | Гальваническая | | | | |
| | | | | ванна | | | | |
| | | 015 | Кругло-шлифовальная | Круглошлифов. | | | | |
| | | | | 3М161Е | | | | |
| 2 | Износ шпоночной | 020 | Наплавочная | Трансформатор | | | | |
| | канавки | | | сварочный | | | | |
| | | | | ТС-500 | | | | |
| | | 025 | Вертикально-фрезерная | Верт-фрезерн. | | | | |
| | | | | 6Н12 | | | | |
| | | 030 | Кругло-шлифовальная | Круглошлифов. | | | | |
| | | | | 3М161Е | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

| Изм. | Лист | N докум. | Подпись | Дата | Изм. | Лист | N докум. | Подпись | Дата | Изм. | Лист | N докум. | Подпись | Дата | Разраб. | | Листов | Лист |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Учебное издание

Хазин Марк Леонтьевич
Волегов Сергей Александрович

# ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА, ВОССТАНОВЛЕНИЯ И СБОРКИ МАШИН

*Учебное пособие*
по выполнению курсовой работы
для студентов направления бакалавриата
15.03.01 – «Машиностроение»
*очного и заочного обучения*

Редактор *В. В. Баклаева*

Подписано в печать
Бумага писчая. Формат 60 × 84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. 5,0. Уч.-изд. л. 4,65. Тираж 100. Заказ №

Издательство УГГУ
620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

Минобрнауки России
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»



**УТВЕРЖДАЮ**
Проректор по учебно-методическому комплексу
_____С.А. Упоров

**Г. А. Боярских, И. Г. Боярских**

# ТРИБОТЕХНИКА

***Методические указания***
**к практическим занятиям**
**и самостоятельной работе студентов**
**направления**
**15.03.01 – «Машиностроение»**

**Екатеринбург**
**2019**

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Уральский государственный горный университет»
(ФГБОУ ВО «УГГУ»)

**ОДОБРЕНО**
Методической комиссией
горно-механического
факультета
Председатель комиссии
проф. В. П. Барановский

Г. А. Боярских, И. Г. Боярских

# ТРИБОТЕХНИКА

*Методические указания*
к практическим занятиям
и самостоятельной работе студентов
направления
15.03.01 – «Машиностроение»

*1-е изд.*

Издание УГГУ Екатеринбург, 2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский государственный горный университет»

# РАСЧЕТ ПАРЫ ТРЕНИЯ ПО КРИТЕРИЮ ИЗНОСА

контрольная работа по дисциплине

«Триботехника»

по направлению 15.03.01 «Машиностроение»

Выполнил

Студент ФИО группа

Проверил

доц. ФИО

Екатеринбург 2019

## 1. Пример решения задачи

Определить максимальную величину износа на рабочих поверхностях колес открытой фрикционной цилиндрической передачи (5).

Параметры передачи:

диаметры колес $D_1$ = 70 мм и $D_2$ = 230 мм;

ширина колес $b$=*50* мм;

передаваемая мощность на ведущем валу $P_1$=*4* кВт;

частота вращения ведущего вала $n_1$=970 мин$^{-1}$;

коэффициент сцепления $K_{сц}$=1,5;

коэффициент трения скольжения материала без смазки $f$с=0,15;

модуль нормальной упругости $E$=2,1-10$^5$ МПа (сталь 45) время работы $t$ =1000 ч.

*Решение*

Необходимая сила нажатия для передачи вращающего момента $T_t$ определяется:

$$F_n \geq \frac{k_{сц} T_1}{f_c \cdot D_1} = \frac{2 \cdot 1{,}5 \cdot 39{,}38}{0{,}15 \cdot 0{,}07} = 11250 \qquad (1)$$

где

$$T_1 = \frac{30 \cdot P_1}{\pi \cdot n_1} = \frac{30 \cdot 4000}{\pi \cdot 970} = 39{,}38 \text{ Н·м.} \qquad (2)$$

Полуширина полоски контакта при действии силы нажатия F,,=11250 Н определяется:

$$b = 1{,}522 \cdot \sqrt{11250 \cdot 26{,}8} \qquad (3)$$

где приведенный радиус кривизны,

$$b_{H(1,2)} = 1{,}522 \cdot \sqrt{\frac{11250 \cdot 26{,}83}{50 \cdot 2{,}15 \cdot 10^5}} = 0{,}18 \text{ мм}, \quad (4)$$

где приведённый радиус кривизны,

$$R_{\text{пр}(1,2)} = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} = \frac{D_1 \cdot D_2}{2(D_1 + D_2)} = \frac{70 \cdot 230}{2 \cdot (70 + 230)} = 26{,}83 \text{ мм}. \quad (5)$$

Контактные напряжения

$$\sigma_{H(1,2)} = 0{,}418 \sqrt{\frac{11250 \cdot 2{,}15 \cdot 10}{50 \cdot 26{,}83}} \quad (6)$$

Определяем интенсивность изнашивания рабочих поверхностей колес фрикционной передачи.

Для 8-го класса шероховатости при круглом шлифовании рабочих поверхностей колес v=l,9;

A = 9,6· $10^{-2}$, с приработкой рабочих поверхностей [приложение 1];

*k*=0,2; αпер=1;

$t_y$=7,9; $a_o$=700 МПа (приложение 2);

$K_{tv}$=3,9 (приложение 3);

$f_M$=0,119 (приложение 4);

$$I_{h(1,2)} = 0{,}2 \cdot 0{,}5^{\left(7{,}9-1-\frac{1}{2 \cdot 1{,}9}\right)} \cdot 2^{\left(\frac{1}{2 \cdot 1{,}9}\right)} \cdot 1{,}0 \cdot 3{,}9 \cdot 561{,}3^{\left(1+\frac{7{,}9}{2 \cdot 1{,}9+1}\right)} \times \quad (7)$$

$$\times \left(2{,}15 \cdot 10^5\right)^{\left(\frac{2 \cdot 1{,}9 \cdot 7{,}9}{2 \cdot 1{,}9+1}-1\right)} \cdot \left(9{,}6 \cdot 10^{-2}\right)^{\left(\frac{1{,}9 \cdot 7{,}9}{2 \cdot 1{,}9+1}\right)} \cdot \left(\frac{0{,}2 \cdot 0{,}119}{700}\right)^{7{,}9} = 5{,}67 \cdot 10^{-6}. \quad (8)$$

Толщина изношенного слоя ведущего $h_1$ и ведомого $h_2$ колес:

$$h_1 = 2 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}18 \cdot \frac{3555 - 3484}{3555} \cdot 970 \cdot 6 \cdot 10^4 = 2{,}36 \text{ мм;} \quad (9)$$

$$h_2 = 2 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}18 \cdot \frac{3555 - 3484}{3484} \cdot \frac{970}{3{,}29} \cdot 6 \cdot 10^4 = 0{,}74 \text{мм,} \quad (10)$$

где окружные скорости ведущего и ведомого колес

$$V_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{30} \cdot \frac{D_1}{2} = \frac{\pi \cdot 970}{30} \cdot \frac{70}{2} \quad (11)$$

где ς - коэффициент скольжения. (12)

Передаточное отношение $i = \frac{D_2}{D_1} = \frac{230}{70} = 3{,}29.$ (13)

Максимальная величина изношенного слоя $h_{max}=h_1=2{,}36$ мм. Максимально допустимый износ составляет [h] = 2 мм.

Допустимый ресурс работы ведущего колеса передачи

$$L_h = \frac{[h] \cdot t}{h_{max}} = \frac{2 \cdot 1000}{2{,}36} = 847 \text{ч,} \quad (14)$$

что меньше заданного, поэтому при данном износе 2,36 мм.

## 2. Справочно-методические материалы для выполнения практических и самостоятельных работ по дисциплине

Приложение 1

Значения параметров шероховатости поверхностей деталей

| Вид обработки | Класс шероховатости | $R_{max}$, мкм | $R_a$, мкм | Приведенный радиус кривизны вершин выступов $r$, мкм | Параметры опорной кривой | | Комплексная характеристика шероховатости, $\Delta$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $\nu$ | $b$ | |
| Обработанные стальные поверхности | | | | | | | |
| Точение | 5 | 37 | 5 | 15 | 2,1 | 1,0 | $2{,}5\cdot10^{0}$ |
| | 6 | 18 | 2,5 | 20 | 1,9 | 1,4 | $7{,}9\cdot10^{-1}$ |
| | 7 | 3,4 | 1,25 | 35 | 1,8 | 1,8 | $1{,}9\cdot10^{-1}$ |
| | 8 | 4,7 | 0,63 | 55 | 1,6 | 2,0 | $6{,}3\cdot10^{-2}$ |
| Торцевое фрезерование | 5 | 37 | 5 | 420 | 2,2 | 0,4 | $1{,}4\cdot10^{-1}$ |
| | 6 | 18 | 2,5 | 900 | 2,0 | 0,5 | $3{,}0\cdot10^{-2}$ |
| | 7 | 9,4 | 1,25 | 1300 | 1,8 | 0,6 | $1{,}0\cdot10^{-2}$ |
| Круглое шлифование | 7 | 9,4 | 1,25 | 8 | 2 | 0,6 | $1{,}6\cdot10^{-1}$ |
| | 8 | 4,7 | 0,63 | 12 | 1,9 | 0,9 | $9{,}6\cdot10^{-2}$ |
| | 9 | 2,4 | 0,32 | 20 | 1,9 | 1,3 | $4{,}1\cdot10^{-2}$ |
| | 10 | 1,2 | 0,16 | 30 | 1,9 | 2,0 | $2{,}8\cdot10^{-2}$ |
| Внутреннее шлифование | 6 | 18 | 2,5 | 5 | 2 | 0,6 | $49{,}6\cdot10^{-1}$ |
| | 7 | 9,4 | 1,25 | 8 | 1,9 | 0,9 | $13{,}0\cdot10^{-1}$ |
| | 8 | 4,7 | 0,63 | 13 | 1,8 | 1,1 | $3{,}6\cdot10^{-1}$ |
| | 9 | 2,4 | 0,32 | 18 | 1,7 | 1,4 | $1{,}1\cdot10^{-1}$ |
| Плоское шлифование | 5 | 37 | 5 | 35 | 2,2 | 0,6 | $1{,}24\cdot10^{0}$ |
| | 6 | 18 | 2,5 | 100 | 1,9 | 0,9 | $2{,}0\cdot10^{-1}$ |
| | 7 | 9,4 | 1,25 | 180 | 1,8 | 1,0 | $6{,}0\cdot10^{-1}$ |
| | 8 | 4,7 | 0,63 | 370 | 1,8 | 1,6 | $1{,}3\cdot10^{-2}$ |
| | 9 | 2,4 | 0,32 | 550 | 1,6 | 2,3 | $2{,}64\cdot10^{-3}$ |
| Полирование | 8 | 4,7 | 0,63 | 230 | 1,7 | 2,0 | $1{,}4\cdot10^{-2}$ |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 9 | 2,4 | 0,32 | 450 | 1,6 | 2,5 | $3{,}0\cdot10^{-3}$ |
| | 10 | 1,2 | 0,16 | 670 | 1,5 | 3,5 | $7{,}8\cdot10^{-4}$ |
| Хонингование | 8 | 4,7 | 0,63 | 15 | 1,8 | 0,7 | $0{,}37\cdot10^{-2}$ |
| | 9 | 2,4 | 0,32 | 20 | 1,7 | 1,0 | $1{,}2\cdot10^{-1}$ |
| | 10 | 1,2 | 0,16 | 35 | 1,6 | 1,9 | $2{,}26\cdot10^{-2}$ |
| | 11 | 0,6 | 0,08 | 70 | 1,6 | 2,5 | $4{,}65\cdot10^{-3}$ |
| Вид обработки | Класс шероховатости | $R_{max}$, мкм | $R_a$, мкм | Приведенный радиус кривизны вершин выступов $r$, мкм | Параметры опорной кривой | | Комплексная характеристика шероховатости, $\Delta$ |
| | | | | | $\nu$ | $b$ | |
| Алмазное выглаживание внутренних цилиндрических поверхностей | 9 | 1,5 | 0,32 | 1300 | 1,0 | 0,9 | $1{,}15\cdot10^{-3}$ |
| | 10 | 0,84 | 0,16 | 2300 | 1,4 | 1,0 | $3{,}6\cdot10^{-4}$ |
| | 11 | 0,39 | 0,08 | 2400 | 1,5 | 1,6 | $1{,}15\cdot10^{-4}$ |
| | 12 | 0,22 | 0,04 | 3100 | 1,5 | 2,5 | $3{,}9\cdot10^{-5}$ |
| Доводка цилиндрических поверхностей | 10 | 1,2 | 0,16 | 30 | 1,5 | 2,5 | $2{,}2\cdot10^{-2}$ |
| | 11 | 0,6 | 0,08 | 40 | 1,4 | 2,6 | $7{,}7\cdot10^{-3}$ |
| | 12 | 0,3 | 0,04 | 55 | 1,3 | 2,6 | $2{,}6\cdot10^{-3}$ |
| | 13 | 0,15 | 0,025 | 75 | 1,2 | 3,3 | $7{,}4\cdot10^{-4}$ |
| Абразивная доводка внутренних цилиндрических поверхностей | 10 | 0,84 | 0,16 | 30 | 1,5 | 2,5 | $1{,}53\cdot10^{-2}$ |
| | 11 | 0,43 | 0,08 | 40 | 1,4 | 2,5 | $5{,}46\cdot10^{-3}$ |
| | 12 | 0,21 | 0,04 | 55 | 1,3 | 2,6 | $1{,}87\cdot10^{-3}$ |
| | 13 | 0,10 | 0,025 | 80 | 1,2 | 3,3 | $5{,}4\cdot10^{-4}$ |
| Доводка плоскостей | 10 | 1,2 | 0,16 | 300 | 1,6 | 2,4 | $2{,}34\cdot10^{-3}$ |
| | 11 | 0,6 | 0,08 | 500 | 1,4 | 3,0 | $3{,}5\cdot10^{-4}$ |
| | 12 | 0,3 | 0,04 | 1000 | 1,2 | 3,3 | $1{,}2\cdot10^{-4}$ |
| | 13 | 0,15 | 0,025 | 3000 | 1,1 | 4,5 | $1{,}35\cdot10^{-5}$ |
| Обработанные чугунные поверхности | | | | | | | |
| Точение | 4 | 48 | 10 | 25 | 1,9 | 1,1 | $1{,}85\cdot10^{0}$ |
| | 5 | 21 | 5 | 37 | 1,8 | 1,2 | $5{,}4\cdot10^{-1}$ |
| | 6 | 12 | 2,5 | 60 | 1,7 | 1,45 | $1{,}54\cdot10^{-1}$ |
| | 7 | 7,4 | 1,25 | 130 | 1,6 | 1,5 | $4{,}4\cdot10^{-2}$ |
| Строгание | 4 | 48 | 10 | 18 | 2,2 | 0,75 | $3{,}0\cdot10^{0}$ |
| | 5 | 22 | 5 | 25 | 2,0 | 0,9 | $9{,}3\cdot10^{-1}$ |
| | 6 | 11 | 2,5 | 100 | 1,9 | 1,2 | $1{,}05\cdot10^{-1}$ |
| | 7 | 6,9 | 1,25 | 150 | 1,9 | 1,6 | $3{,}5\cdot10^{-2}$ |
| Цилиндрическое фрезерование | 4 | 29 | 10 | 17 | 2,8 | 1,4 | $2{,}54\cdot10^{0}$ |
| | 5 | 23 | 5 | 20 | 2,6 | 1,6 | $9{,}6\cdot10^{-1}$ |
| | 6 | 11 | 2,5 | 25 | 2,4 | 1,7 | $3{,}7\cdot10^{-1}$ |
| | 7 | 7,2 | 1,25 | 50 | 2,1 | 2,1 | $1{,}07\cdot10^{-1}$ |

| Вид обработки | Класс шерохо-ватости | $R_{max}$, мкм | | Приведенный радиус кривизны вершин выступов $r$, мкм | Параметры опорной кривой | | Комплексная характеристика шероховатости, $\Delta$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $\nu$ | $b$ | |
| Растачивание | 5 | 23 | 5 | 12 | 2,2 | 0,72 | $2{,}2\cdot10^{0}$ |
| | 6 | 11 | 2,5 | 13 | 2,2 | 1,0 | $8{,}85\cdot10^{-1}$ |
| | 7 | 6,9 | 1,25 | 15 | 2,1 | 1,15 | $4{,}3\cdot10^{-1}$ |
| | 8 | 3,8 | 0,63 | 20 | 2,0 | 1,75 | $1{,}41\cdot10^{-1}$ |
| Торцевое фрезерование | 5 | 23 | 5 | 40 | 2,0 | 0,42 | $8{,}9\cdot10^{-1}$ |
| | 6 | 11 | 2,5 | 60 | 1,9 | 0,7 | $2{,}3\cdot10^{-1}$ |
| | 7 | 6,9 | 1,25 | 90 | 1,8 | 0,75 | $9{,}5\cdot10^{-2}$ |
| Круглое шлифование | 6 | 11 | 2,5 | 50 | 1,9 | 0,7 | $2{,}72\cdot10^{-1}$ |
| | 7 | 7,2 | 1,25 | 85 | 1,9 | 1,2 | $6{,}5\cdot10^{-2}$ |
| | 8 | 3,5 | 0,63 | 150 | 1,8 | 1,25 | $2{,}0\cdot10^{-2}$ |
| | 9 | 1,8 | 0,32 | 190 | 1,7 | 1,55 | $7{,}5\cdot10^{-3}$ |
| Внутреннее шлифование | 6 | 11 | 2,5 | 12 | 2,6 | 1,6 | $8{,}0\cdot10^{-1}$ |
| | 7 | 7,4 | 1,25 | 16 | 2,4 | 1,75 | $3{,}7\cdot10^{-1}$ |
| | 8 | 3,6 | 0,63 | 25 | 2,3 | 1,95 | $1{,}8\cdot10^{-1}$ |
| | 9 | 1,7 | 0,32 | 45 | 2,2 | 2,1 | $7{,}7\cdot10^{-2}$ |
| Доводка плоскостей | 10 | 0,98 | 0,16 | 15 | 1,3 | 2,0 | $3{,}9\cdot10^{-2}$ |
| | 11 | 0,42 | 0,08 | 20 | 1,2 | 2,3 | $1{,}05\cdot10^{-2}$ |
| | 12 | 0,23 | 0,04 | 40 | 1,1 | 2,4 | $2{,}6\cdot10^{-3}$ |
| | 13 | 0,18 | 0,025 | 55 | 1,0 | 3,1 | $1{,}6\cdot10^{-3}$ |

Приложение 2

Параметры разрушающего напряжения при однократном растяжении $\sigma_0$ и коэффициента кривой фрикционной усталости $t_y$ при трении некоторых деталей по образцу из стали без смазки на воздухе

| Материал | $\sigma_0$, МПа | $t_y$ |
|---|---|---|
| Графиты марок: | | |
| АГ-1500 | 20 | 2,0 |
| АО-1500 | 25 | 2,6 |
| АМС | 80 | 2.4 |
| Резина уплотнительная при 100 °С | 22 | 4.8 |
| Фторопласт-4 | 63 | 5,0 |
| Резина при модуле упругости $E$=2,8 МПа | 146 | 3,4 |

| | | |
|---|---|---|
| Резина протекторная (по бетонному покрытию) | 160 | 3.4 |
| Полиформальдегид | 147 | 1,3 |
| Эпоксидная смола без наполнителя | 180 | 4,6 |
| Резина при модуле упругости $E$=2,2 МПа | 211 | 3,0 |
| Капралон | 630 | 2,6 |
| Чугун ЧНМХ | 660 | 4,1 |
| Сталь 45 | 700 | 7,9 |
| Поликарбонат | 840 | 2,9 |
| Резина при модуле упругости $E$=3,2 МПа | 850 | 3,6 |
| Ретинакс К-240 | 1184 | 12,6 |

Приложение 3

Таблица для определения коэффициента $K_{tv}$

| | ν | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $t_y$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 1 | 1,6 | 1,9 | 2,3 | 2,7 |
| 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 3 | 1 | 2,7 | 4,3 | 6,5 | 8,5 |
| 4 | 1 | 3 | 6 | 10 | 15 |
| 5 | 1 | 3 | 7 | 15 | 23 |
| 6 | 1 | 4 | 9,5 | 20 | 35 |
| 8 | 1 | 4,5 | 15 | 35 | 65 |
| 10 | 1 | 5,5 | 22 | 60 | 130 |
| 12 | 1 | 6,5 | 28 | 85 | 170 |
| 15 | 1 | 8,5 | 40 | 150 | 400 |

Примечание. Для промежуточных значений $t_y$ и ν коэффициент $K_{tv}$ находится методом линейной интерполяции.

Приложение 4

Величины молекулярной составляющей коэффициента внешнего трения $f_м$ для различных материалов

| Материал | *HB* | $f_м$ | $\tau_0$, кГ/мм | β |
|---|---|---|---|---|
| Контакт с шаровым индентором из стали ШХ 15 | | | | |
| Свинец | 3,3<br>2,8 | 0,14<br>0,155 | 0,274<br>– | 0,057<br>– |
| Серебро | 55 | 0,096 | 0,77 | 0,081 |
| Алюминий | 23 | 0,124 | – | – |
| Медь | 28,5 | 0,139 | 1,68 | 0,08 |
| | 40 | 0,125 | 1,8 | |
| | 52 | 0,115 | 1,82 | |
| | 85 | 0,1 | 1,7 | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Никель | 70 | 0,123 | 0,49 | 0,116 |
| | 105 | 1,13 | 1,47 | |
| | 180 | 0,095 | 3,78 | |
| Армко-железо | 65 | 0,16 | – | – |
| | 70 | 0,139 | | |
| | 130 | 0,097 | | |
| Ванадий | 110 | 0,103 | – | – |
| Тантал | 78 | 0,115 | 2,42 | 0,084 |
| Молибден | 110 | 0,105 | 1,87 | 0,088 |
| | 140 | 0,128 | – | – |
| | 186 | 0,095 | 2,79 | 0,08 |
| Вольфрам | 285 | 0,0082 | – | – |
| Ниобий | 32 | 0,142 | 0,896 | 0,114 |
| Хром | 100 | 0,135 | 1,5 | 0,12 |
| | 200 | 0,095 | – | – |
| Цинк | 33 | 0,088 | – | – |
| Титан | 128 | 0,1 | 2,82 | 0,078 |
| Кобальт | 130 | 0,092 | – | – |
| Олово | 4,4 | 0,17 | 0,449 | 0,068 |
| Фторопласт | 3,1 | 0,028 | 0,341 | 0,017 |
| Полиэтилен ПЭВД | 2,0 | 0,08 | 0,044 | 0,058 |
| Полипропилен | 3,7 | 0,38 | 0,011 | 0,035 |
| Винипласт | 12 | 0,091 | 0,372 | 0,06 |
| Капралон технический | 13 | 0,065 | 0,195 | 0,05 |
| Материал | *HB* | $f_м$ | $\tau_0$, кГ/мм | β |
| Полиамид 68П | 16 | 0,085 | – | – |
| Плексиглас | 16 | 0,22 | – | – |
| Древесина прессованная | – | – | 0,05 | 0,061 |
| Чугун ЧНМХ | 385 | 0,095 | – | – |
| Бронза АСС-6-5 | 150 | 0,095 | 1,0 | 0,065 |
| Контакт с синтетическим алмазом | | | | |
| 30ХГСА | 340 | 0,125 | 20,06 | 0,066 |
| 45 | 270 | 0,119 | 20,39 | 0,044 |
| 08 Х18Н9Т | 159 | 0,15 | 3,18 | 0,13 |
| 40Х | 341 | 0,109 | 18,41 | 0,055 |
| 45 | 324 | 0,112 | 12,96 | 0,072 |

## 3 Пример алгоритма и задания для расчёта пары трения по критерию износа

В столбцах таблицы - указана последняя цифра зачетки, в строках - предпоследняя, в клетках таблицы - номер варианта (всего 30 вариантов).

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 21 | 11 | 1 | 21 | 11 | 21 | 1 | 11 | 1 |
| 1 | 2 | 22 | 12 | 2 | 22 | 12 | 22 | 2 | 12 | 3 |
| 2 | 3 | 23 | 13 | 3 | 23 | 13 | 23 | 3 | 13 | 5 |
| 3 | 4 | 24 | 14 | 4 | 24 | 14 | 24 | 4 | 14 | 9 |
| 4 | 5 | 25 | 15 | 5 | 25 | 15 | 25 | 5 | 15 | 10 |
| 5 | 6 | 26 | 16 | 6 | 26 | 16 | 26 | 6 | 16 | 12 |
| 6 | 7 | 27 | 17 | 7 | 27 | 17 | 27 | 7 | 17 | 15 |
| 7 | 8 | 28 | 18 | 8 | 28 | 18 | 28 | 8 | 18 | 16 |
| 8 | 9 | 29 | 19 | 9 | 29 | 19 | 29 | 9 | 19 | 18 |
| 9 | 10 | 30 | 20 | 10 | 30 | 20 | 30 | 10 | 20 | 19 |

Например, номер зачетки 201278 09 (0 строка, 9 столбец) - вариант номер 1.

### Варианты заданий

Выбор исходных данных на выполнение расчетной части контрольной работы осуществляется в соответствии с вариантом.

Таблица 1

| Вариант | Передаваемая мощность на ведущем валу, P (кВт) | Частота вращения ведущего вала, $n_1$ ($мин^{-1}$) | Ширина колес, (мм) | Диаметры колес, (мм) | | Коэффициент трения скольжения материала без смазки, f | Коэффициент сцепления, $K_{сц}$ | Материал колес передачи |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | $D_1$ | $D_2$ | | | |
| *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | *8* | *9* |
| 1 | 3,5 | 800 | 45 | 60 | 220 | 0,10 | 1,2 | Чугун ЧНМХ ($E=2{,}2\cdot 10^5$ МПа) |
| 2 | 4,0 | 850 | 50 | 70 | 230 | 0,12 | | |
| 3 | 4,5 | 900 | 55 | 80 | 250 | 0,14 | | |
| 4 | 5,0 | 950 | 60 | 90 | 270 | 0,16 | | |
| 5 | 5,5 | 1000 | 65 | 100 | 290 | 0,18 | | |
| 6 | 6,0 | 1050 | 70 | 110 | 320 | 0,20 | 1,5 | Сталь 45 ($E=2{,}1\cdot 10^5$ МПа) |
| 7 | 6,5 | 1100 | 75 | 120 | 350 | 0,11 | | |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8 | 7,0 | 1150 | 80 | 130 | 380 | 0,13 | | |
| 9 | 7,5 | 1200 | 85 | 140 | 410 | 0,15 | | |
| 10 | 8,0 | 1250 | 90 | 150 | 440 | 0,17 | | |
| 11 | 3,8 | 820 | 45 | 60 | 220 | 0,20 | 1,5 | Сталь 45 ($E=2,1\cdot10^5$ МПа) |
| 12 | 4,3 | 880 | 50 | 70 | 230 | 0,11 | | |
| 13 | 4,8 | 920 | 55 | 80 | 250 | 0,13 | | |
| 14 | 5,1 | 980 | 60 | 90 | 270 | 0,15 | | |
| 15 | 5,2 | 1020 | 65 | 100 | 290 | 0,17 | | |
| 16 | 6,3 | 1080 | 70 | 110 | 320 | 0,10 | 1,2 | Чугун ЧНМХ ($E=2,2\cdot10^5$ МПа) |
| 17 | 6,6 | 1150 | 75 | 120 | 350 | 0,12 | | |
| 18 | 7,4 | 1230 | 80 | 130 | 380 | 0,14 | | |
| 19 | 7,7 | 1280 | 85 | 140 | 410 | 0,16 | | |
| 20 | 8,2 | 1320 | 90 | 150 | 440 | 0,18 | | |
| 21 | 3,2 | 815 | 45 | 60 | 220 | 0,10 | 1,1 | Чугун ЧНМХ ($E=2,2\cdot10^5$ МПа) |
| 22 | 4,3 | 865 | 50 | 70 | 230 | 0,12 | | |
| 23 | 4,5 | 915 | 55 | 80 | 250 | 0,14 | | |
| 24 | 5,1 | 945 | 60 | 90 | 270 | 0,16 | | |
| 25 | 5,4 | 1020 | 65 | 100 | 290 | 0,18 | | |
| 26 | 6,2 | 1070 | 70 | 110 | 320 | 0,20 | 1,3 | Сталь 45 ($E=2,1\cdot10^5$ МПа) |
| 27 | 6,8 | 1120 | 75 | 120 | 350 | 0,11 | | |
| 28 | 7,4 | 1170 | 80 | 130 | 380 | 0,13 | | |
| 29 | 7,6 | 1220 | 85 | 140 | 410 | 0,15 | | |
| 30 | 8,5 | 1270 | 90 | 150 | 440 | 0,17 | | |

Рабочие поверхности колес обработаны круглым шлифованием ($R_a$=0,63) и приработаны. Величину допустимого износа принять: [h]=2,5мм. Заданное время работы передачи - 1200 час. $\varsigma$=0,98 - коэффициент скольжения.

Тематика теоретической части контрольной работы

(выбирается в соответствии с вариантом в объеме 3-5 стр.)

1. Абразивное изнашивание (характеристика, параметры, механизмы, примеры и т.п.)
2. Усталостное изнашивание (характеристика, параметры, механизмы, примеры и т.п.)
3. Водородное изнашивание (характеристика, параметры, механизмы, примеры и т.п.)
4. Адгезионное изнашивание (характеристика, параметры, механизмы, примеры и т.п.)
5. Смазка, характеристика трения по видам смазки
6. Смазочные материалы
7. Присадки, классификация, назначение
8. Способы смазывания
9. Избирательный перенос и явление безызносности
10. Нанотехнологии в триботехнике
11. Износ при заедании
12. Микрогеометрия поверхности
13. Макрогеометрия поверхности
14. Структура и свойства поверхностного слоя
15. Напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя, остаточные напряжения
16. Конструктивные методы повышения триботехнических свойств

17.Выбор материалов пар трения. Классификация конструкционных материалов, применяемых в триботехнике
18.Классификация видов изнашивания и их общая характеристика
19.Классификация поверхностей трения. Совпадающие и несовпадающие поверхности
20.Виды трения. Внешнее и внутреннее трение. Путь и работа трения. Коэффициент трения
21.Фреттинг-коррозия. (характеристика, параметры, механизмы, примеры и т.п.)
22.Технологические методы повышения триботехнических свойств
23.Термическая и химико-термическая обработка поверхностей трения
24.Поверхностное пластическое деформирование (ППД)
25.Обработка поверхностей трения концентрированными потоками энергии (КПЭ)
26.Формирование регулярных рельефов и регулярных структур поверхностного слоя
27.Эксплуатационные методы повышения триботехнических свойств
28.Методы восстановления изношенных поверхностей.
29.Экспериментальные методы исследования износостойкости материалов и узлов трения
30.Пары трения качения и трения скольжения (характеристика, параметры, механизмы и виды изнашивания, примеры и т.п.)

## 4 Требования к содержанию и оформлению контрольной работы

Контрольная работа выполняется в соответствии с общими требованиями, предъявляемыми к контрольным работам для студентов очной и заочной форм обучения.

**Во введении** (объем 3-5 с.) приводятся основные понятия и определения, используемые в триботехнике, основные виды изнашивания, роль смазки, методы повышения износостойкости.

**В теоретической части** (объем 8-10 с.) работы излагаются следующие вопросы:

1) спецвопрос «Тематика теоретической части...» (выбирается из списка в соответствии с вариантом, объем 2-3 с);
2) назначение, области применения, условия работы фрикционных передач;
3) виды изнашивания рабочих поверхностей колес передачи и критерии износа;
4) материалы колес, их механические свойства, виды применяемых смазок;

5) основные расчетные формулы с пояснением всех входящих величин (кроме общеизвестных, например, числа **«л»).**

**В расчетной части (объем 2-3 с.)** приводятся исходные данные для расчета, выбранные в соответствии с вариантом (см. п. 5.1.) и схема фрикционной передачи в необходимом масштабе.

Определить максимальную величину износа на рабочих поверхностях колес открытой фрикционной цилиндрической передачи:

- вычислить необходимую силу прижатия в передаче и полуширину полоски контакта;
- вычислить контактные напряжения;
- определить интенсивность изнашивания колес передачи;
- вычислить величину изношенного слоя ведущего и ведомого колес передачи;
- определить допустимый ресурс работы фрикционной передачи и сравнить с заданным;
- сделать выводы.

Расчет осуществляется в соответствии с вышеперечисленными пунктами и сопровождается краткими пояснениями и обязательными ссылками на используемые формулы, графики и таблицы.

В заключении даются выводы по результатам проведенного расчета (например, обеспечивается или нет заданный ресурс работы передачи) и приводится список использованной литературы.

При выполнении контрольной работы следует руководствоваться учебными пособиями: 1. Боярских Г. А., Боярских И. Г. Надёжность горных машин и оборудования. Учебное пособие. Екатеринбург: УГГУ, 2009, 115 с. 2. Боярских Г. А., Боярских И. Г. Надёжность горных машин и оборудования. Методические указания. Екатеринбург: УГГУ, 2010. 60 с. 3. Боярских Г. А. Теория старения машин. Учебное пособие. Екатеринбург: УГГУ, 2006, 173 с. 4. Боярских Г. А. Теория старения машин. Методические указания. Екатеринбург: УГГУ, 2010. 48 с. 5. Багмутов, В. П. Изнашивание деталей узлов трения наземных транспортных средств: учебное пособие / В. П. Багмутов, А. Н. Савкин, С. Н. Пар-шев; ВолгГТУ. - Волгоград, 2011.- 56 с.

6. Багмутов В. П. Обеспечение триботехнических свойств деталей узлов трения наземных транспортных средств: учебное пособие / В. П. Багму-тов, А. Н. Савкин, С. Н. Паршев; ВолгГТУ. - Волгоград, 2011.- 59 с.

7. Багмутов, В. П. Конструктивные методы обеспечения триботехнических свойств деталей узлов трения наземных транспортных средств: учебное пособие / В. П. Багмутов, А. Н. Савкин, С. Н. Паршев; ВолгГТУ. - Волгоград, 2012.- 62 с.

Контрольная работа выполняется на листах формата А4, в соответствии с требованиями ЕСКД к расчетно-пояснительным запискам.

При оформлении на ПК в редакторе WORD используется шрифт «Times New Roman», 14пт, 1,5 инт., поля: верхнее и нижнее 3 см.; левое 3,5 см.; правое - 2,5 см.

На следующей странице приведен образец оформления **титульного листа** контрольной работы. Контрольная работа **в прозрачном скоросшивателе регистрируется** и сдается преподавателю не позднее срока, определенного графиком учебного процесса.

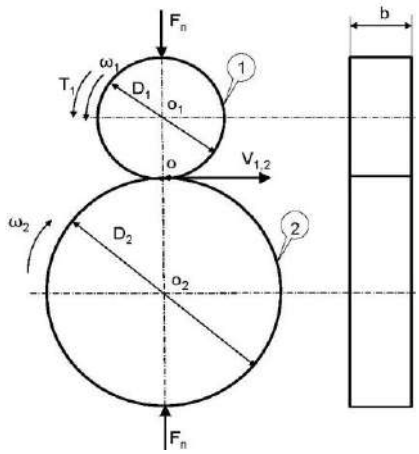



Рис.1

ФРИКЦИОННАЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ ПЕРЕДАЧА

1 - ведущее колесо; 2 - ведомое колесо

$D_1$ и $D_2$ - диаметры ведущего и ведомого колес, мм;

$V_{1,2}$ - окружные скорости (качения) точек рабочих поверхностей ведущего и ведомого колес, м/с;

$\omega_{1,2}$ - угловые скорости ведущего и ведомого колес, рад/с;

$F_n$ - сила прижатия колес, Н;

$T_1$ - крутящий момент на ведущем колесе;

b - ширина колес, мм;

o - точка контакта;

$o_1$ и $o_2$ - оси вращения колес.

***<u>Пример 1.</u> Расчет на износ направляющих скольжения токарного станка.***

Требуется оценить износ направляющих скольжения токарного станка за 1000 ч работы при относительной скорости скольжения $u$ = 50 мм/с, если известно, что пара трения чугун-чугун (СЧ18) и средняя интенсивность изнашивания рассматриваемого трибосопряжения согласно таблице А1, составляет $I_h = 10^{-10}$. По формуле (А1) рассчитываем линейный износ

$$U = I_h \cdot u \cdot t = 10^{-10} \cdot 50 \cdot 1000 \cdot 3600 = 0{,}018 \text{ мм}.$$

Здесь при вычислениях в формулу подставлен численный коэффициент 3600, чтобы перевести число часов в секунды.

М.М. Хрущовым установлено, что для металлов и отожженных сталей при абразивном изнашивании интенсивность изнашивания пропорциональна давлению $p$

и обратно пропорциональна твердости изнашиваемого материала, если твердость материала не превышает 0,6...0,75 твердости абразива. По данным отдельных исследователей оказалось, что при трении разных материалов в абразивной среде влияние твердости может быть несколько иным.

В формуле (А2) $к$ - коэффициент изнашивания, м3/Н-м. Он равен объемному износу, приходящемуся на единицу нагрузки (Н) и единицу пути (м).

Данные по значениям $к$ при изнашивании антифрикционных полимерных материалов при трении о сталь и сведения о величинах предельно допустимых давления в контакте [р], а также произведения давления на скорость $[p \cdot$ и] приведены в таблице А2

Таблица 2 - Параметры, характеризующие износостойкость

| Материал | Коэф. изнашивания к, $м^3/(Н \cdot м)$ | Предельное давление [р], МПа | Предельное значение $[p \cdot$ и], МПа-м/с |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Силон | $7 \cdot 10^{-15}$ | 5 | 0,08 |
| Технил | $3 \cdot 10^{-13}$ | | 0,10 |
| Маслянит КСПЭ, КСЦ | $3 \cdot 10^{-13}$ | 5 | 0,10 |
| ПА 6-1-203 | $2 \cdot 10^{-13}$ | | 0,09 |
| КПФА | $2 \cdot 10^{-13}$ | | 0,09 |
| САМ-4, САМ-5 | $2 \cdot 10^{-13}$ | | 0,09 |
| АТМ -2 | $3 \cdot 10^{-14}$ | 1 | 0,10 |
| Капролон В, монокаст | $4 \cdot 10^{-15}$ | | 0,08 |
| Найлотрон | $6 \cdot 10^{-14}$ | | 0,10 |
| Ренил | $2 \cdot 10^{-15}$ | | 0,08 |
| ПА 610-1-109, маслянит | $10^{-13}$ | | 0,10 |
| СФД | $2 \cdot 10^{-15}$ | 0,5 | 0,08 |
| СТД | $2 \cdot 10^{-15}$ | | 0,08 |
| СФД-ВМ | $10^{-14}$ | | 0,10 |

***Пример 2.*** На текстолитовое зубчатое колесо диаметром $d_w$ и шириной $b$ = 20 мм действует сила в зацеплении $F$ = 200 Н. Под действием этой силы колесо вращается с частотой 200 мин$^{-1}$ на оси диаметром $d$ = 18 мм. Требуется оценить износ текстолита $U$ в трибосопряжении колесо-ось, который может произойти за четыре месяца работы (2000 ч), если известно, что согласно таблице 12 коэффициент изнашивания для текстолита составляет $к$ = 4-10$^{-16}$ м$^3$/Н-м, допускаемое давление [р] = 5 МПа и допускаемое произведение давления на скорость [р-и]= 0,1 МПа-м/с.

1) Находим значение $p$ и$p$-$и$ в трибосопряжении: $p$ = F/(ab) = 200/(18-20) = 0,555 МПа,

$и$ =ndn/60= 3,13-18-200/(60-1000) = 0,1884 м/с. $p$- $и$ = 0,555-0,1884 = 0,1046 МПа-м/с, сопоставляя действующие и допускаемые значения $p$ и $p$- и, видим, что действующие не превышают допускаемых.

2) Вычисляем $I_h$:

$I_h = k$-$p$ =4-10$^{-16}$-0,5 5 5-10$^6$ = 2,2 -10$^{-10.}$ 3) Оцениваем износ:

$U = I_h$- $и$ -$t$ = 2,2-10$^{-10}$-0,1884-2000-3600 = 0,3-10$^{-3}$ м.

*Для случая замены материала,* например на капролон, и режимов работы может быть предложена следующая формула для пересчета интенсивности изнашивания

$$I_h = \frac{CP^m f^n}{H^e}$$

где $C$ - коэффициент пропорциональности; $f$ - коэффициент трения;

$m$ , $n$ , $e$ - показатели степеней, зависящие от влияния смазки, термообработки деталей и степени близости давления $p$ к предельному значению, при котором может произойти схватывание материала.

В формуле (А3) показатели степени можно применять следующие: $n$ = 1 в большинстве случаев; $e$ = 2...3, если имеет место трение закаленной стали по закаленной стали, что связано с резко повышенным у закаленных сталей сопротивлением к схватыванию, которое существенно ускоряет изнашивание поверхностей деталей ТС; $e$ = 1, если происходит трение стали по другому материалу. При технически сухом трении деталей (без смазки) и при граничном трении деталей со смазкой в случае, если $p \le$ (0,7...0,8) [р], принимают $m$ = 1, а при большем давлении $m$ = 2...3. При смешанном трении деталей со смазкой при любых давлениях $m$= 3. Интенсивность изнашивания растет пропорционально количеству поступающего в зону трения абразива $q$. Поэтому если известно $q$, то как при смазке, так и без нее

$$I_h = \frac{Cqp}{H^e}$$

В формулу (А4) вместо $f^n$ (см. формулу (А3)) вводится параметр $q$.

Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный
горный университет»

**Э.В. Горшков, Д. И. Симисинов**

# Проектирование цехов (участков) машиностроительных производств

*Учебное пособие*
**по выполнению курсовой работы и специальной части ВКРБ для студентов специализации подготовки– «Оборудование и технологии повышения износостойкости и восстановления деталей машин и аппаратов» (МШС) специальности 15.03.01 – «Машиностроение» очного и заочного обучения**

**Екатеринбург**
**2019**

Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

*ОДОБРЕНО:*
Методической комиссией
горно-механического факультета
«12» февраля 2015 г.
Председатель комиссии
проф. В.П. Барановский

Э.В. Горшков, Д. И. Симисинов

# Проектирование цехов (участков) машиностроительных производств

Учебное пособие
по выполнению курсовой работы и специальной части ВКРБ для студентов специализации подготовки – «Оборудование и технологии повышения износостойкости и восстановления деталей машин и аппаратов» (МШС) специальности 15.03.01 – «Машиностроение» очного и заочного обучения

Издание УГГУ Екатеринбург, 2019

*УДК 621.757 (076.5)*

*Э.В. Горшков, Д. И. Симисинов* Проектирование цехов (участков) машиностроительных производств. Учебное пособие по выполнению курсовой работы и специальной части ВКРБ для студентов специализации подготовки– «Оборудование и технологии повышения износостойкости и восстановления деталей машин и аппаратов» (МШС) специальности 15.03.01 – «Машиностроение» очного и заочного обучения. Екатеринбург: Изд-во. УГГУ, 2017. 24 с.

Пособие предназначено для использования при выполнении курсовой работы и выполнении соответствующих разделов дипломных проектов студентами всех форм обучения.

В пособии приводится последовательность проектирования механосборочного участка на основе типизации запланированных к выпуску изделий. Приведены необходимые данные по нормам проектирования машиностроительных предприятий.

Справочно-методическое пособие рассмотрено на заседании кафедры эксплуатации горного оборудования 09.12.16 г. (протокол № 1) и рекомендовано для издания в УГГУ.

Рецензент – Н. М. Суслов, докт. техн. наук, профессор кафедры ГМК УГГУ.

© Горшков Э.В.,
Симисинов Д. И., 2017
© Уральский государственный
горный университет, 2019

# ВВЕДЕНИЕ

Каждое предприятие, выпускающее горные машины, имеет в своем составе более или менее развитые три части: основное производство (механические, термические, сварочные, гальванические, сборочные, окрасочные цеха или участки), заготовительное производство (литейные, кузнечные, метизные цехи или участки), вспомогательное производство (энергетический, ремонтный, инструментальный, транспортный цехи или участки, склады и др.).

Проектирование всего этого комплекса задача весьма сложная, для ее решения существуют специальные проектные институты (например, Уралгипротяжмаш).

Для проектирования небольших предприятий или участков, ориентированных на выпуск новой продукции, а также для предварительных расчетов при организации нового производства (к примеру, составлению проектов, бизнес-планов) требуется выполнить эту работу в короткие сроки с минимальными трудозатратами.

Наибольший объем в проектировании занимает определение трудоемкости изготовления запланированных к выпуску изделий. Решение задачи в значительной мере упрощается приведением подлежащих изготовлению изделий к типовым представителям.

Методика по определению трудоемкости изготовления изделий по типовому представителю, а так же все последующие этапы проектирования технологической части цехов и участков механосборочного производства приведены в данном справочно-методическом пособии.

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Приобретение практических навыков по определению трудоемкости изготовления сложных машиностроительных изделий на основе типизации, разработки технологического процесса сборки и основам проектирования технологической части цехов и участков механосборочного производства.

Выполнение работы основывается на самостоятельном творчестве студента, развивающем его инициативу в решении технологических задач, а так же экономического анализ принятых решений.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

Работа заключается в проектировании технологической части участка механосборочного производства заданного изделия при заданном объеме выпуска.

Задание представляет собой конструкторскую документацию на выпускаемое изделие, включающее сборочный чертеж и деталировку.

Работу рекомендуется выполнять в следующей последовательности и включающей разделы:

1. Разработка технологического процесса изготовления типовой детали.

2. Расчет потребного оборудования.

3. Разработка сборочной схемы.

4. Разработка и планировка механосборочного участка.

Работа оформляется в виде чертежа планировки механосборочного участка и пояснительной записки.

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

## 1. Разработка технологического процесса изготовления типовой детали

Для сокращения объема расчетов трудоемкости изготовления, подлежащие изготовлению детали, входящие в изделие, условно приводятся к типовому представителю. В качестве типового представителя выбирается деталь, которая выпускается в наибольшем количестве, а по конструкции и технологическому процессу сходна с большинством деталей данной группы (в данной работе типовая деталь задается преподавателем).

Разрабатывается технологический процесс изготовления типовой детали, определяется тип производства и трудоемкость ее изготовления, выполнение данного этапа изложено в части 1 данного методического руководства [1]. В таблицах П.1, П.2 приложения приведены формулы для упрощенного расчета нормы штучного времени. Технологический процесс в работе оформляется в форме маршрута обработки.

Для определения трудоемкости остальных деталей, входящих в план производства, предлагается воспользоваться коэффициентом приведения $K$

$$K = K_{м} \cdot K_{сер.} \cdot K_{сл.}, \qquad (1)$$

где $K_{м}$, $K_{сер}$, $K_{сл}$ – соответственно коэффициенты, отражающие различия масс, серийности, сложности.

Коэффициент массы определяется по формуле:

$$K_{м} = ( Q_i / Q_{тип} )^{2/3}, \qquad (2)$$

где $Q_{тип}$ - масса типовой детали;

$Q_i$ - масса $i$-ой детали, кг.

При весе детали менее 1 кг учитывать различие в массах деталей нецелесообразно.

Коэффициент серийности:

$$K\text{сер} = (N\text{тип} / Ni)^{0,2}, \quad (3)$$

где $Ni$ - количество одинаковых $i$-х деталей в узле;

$N$тип - количество одинаковых типовых деталей в узле.

Коэффициент сложности:

$$K\text{сл} = (Hi / H\text{тип})^{0,5}, \quad (4)$$

где $Hi$ - количество обрабатываемых поверхностей у $i$-ой детали;

$H$тип - количество обрабатываемых поверхностей у типовой детали.

Штучно-калькуляционное время для остальных деталей, мин.:

$$T\text{шт-к}_i = T\text{тип} \cdot K, \quad (5)$$

Ход и результаты расчетов оформляется по форме таблицы 1.

Таблица 1

**Расчет трудоемкости изготовления деталей**

| Номер детали | Наименование детали | Кол-во в изделии | $K$м | $K$сер | $K$сл | $K$ | $T$шт-к, мин. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | |
| | | | | | | $\Sigma T\text{шт-к}_i$ | |

## 2. Расчет потребного оборудования

Определяется общее количество станков:

$$C_{общ} = \Sigma T_{шт\text{-}к} \cdot N_{г} / (F_{д} \cdot 60) \cdot \eta, \quad (6)$$

где $F_{д}$ - действительный годовой фонд времени работы оборудования, час; η – коэффициент использования рабочего времени оборудования, час. (принимается равным 0,85÷0,75);

Таблица 2

**Примерное соотношение станков по группам для общего машиностроения**

| Станки | % |
|---|---|
| Токарные | 40 |
| Сверлильные | 20 |
| Фрезерные | 15 |
| Строгальные | 5 |
| Шлифовальные | 10 |
| Разные | 10 |

Общее количество оборудования распределяется по группам в соответствии с установленным процентным соотношением видов станков от их количества, с учетом специфики изготовления изделия. В каждой группе целесообразно принимать различные по типу, точности и размерам станки (например, токарная группа 3 станка – принимаем: 2 токарно-винторезных станка, 1 токарно-револьверный).

Заполняется ведомость принятого основного оборудования в форме табл. 3.

Таблица 3

**Ведомость принятого основного оборудования**

| Наименование | Марка | Кол. | Габариты | Площадь, $м^2$ |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |
| | | | Итого: | |

Кроме основного оборудования необходимо предусмотреть наличие вспомогательного:

- заточные станки (3÷5 % от общего количества станков);
- отрезные станки (например, дисковая пила для резки проката);
- слесарные верстаки основного и сборочного отделения, количество верстаков принимается 20÷25 % от $C_{общ}$;
- контрольные плиты, разметочные столы (5÷10 % от $C_{общ}$);
- инструментальные ящики (на каждый станок) и другое необходимое оборудование.

Ведомость вспомогательного оборудования заполняется в форме табл. 4.

Таблица 4

**Ведомость принятого вспомогательного оборудования**

| Оборудование | Количество | Габариты, мм х мм | Площадь, м$^2$ |
|---|---|---|---|
| Верстак слесарный | | 2200х1200 | |
| Ящик для инструмента | | 800х500 | |
| Плита контрольная | | 2000х1200 | |
| Стол разметочный | | 2000х1200 | |
| Итого: | | | |

## 3. Разработка сборочной схемы

Составление технологических схем целесообразно при проектировании сборочных процессов для любого типа производства, так как они значительно упрощают разработку сборочных процессов. При разработке последовательности сборки нужно учитывать следующие правила:

1. В каждой сборочной единице должна быть найдена базирующая деталь, определяющая положение всех деталей составляющих данную сборочную единицу. С этой базовой детали (или узла) и должна начинаться сборка.

2. Каждая последующая, более сложная сборочная единица всегда должна содержать не менее одной предшествующей, более простой сборочной единицы.

3. Положение детали для общей сборки должно быть удобно для сборки всех узлов, без поворота и переустановки ее.

4. Смонтированные детали и узлы не должны мешать последующей сборке.

5. В первую очередь производится сборка и установка на базовую деталь сборочных единиц, выполняющих наиболее ответственные функции в работе.

6. Если узлы имеют взаимосвязанные элементы в размерных цепях, то сборка начинается с тех деталей, которые имеют общие взаимосвязанные размеры.

На рис. 1 в качестве примера показан фрагмент технологической схемы сборки.

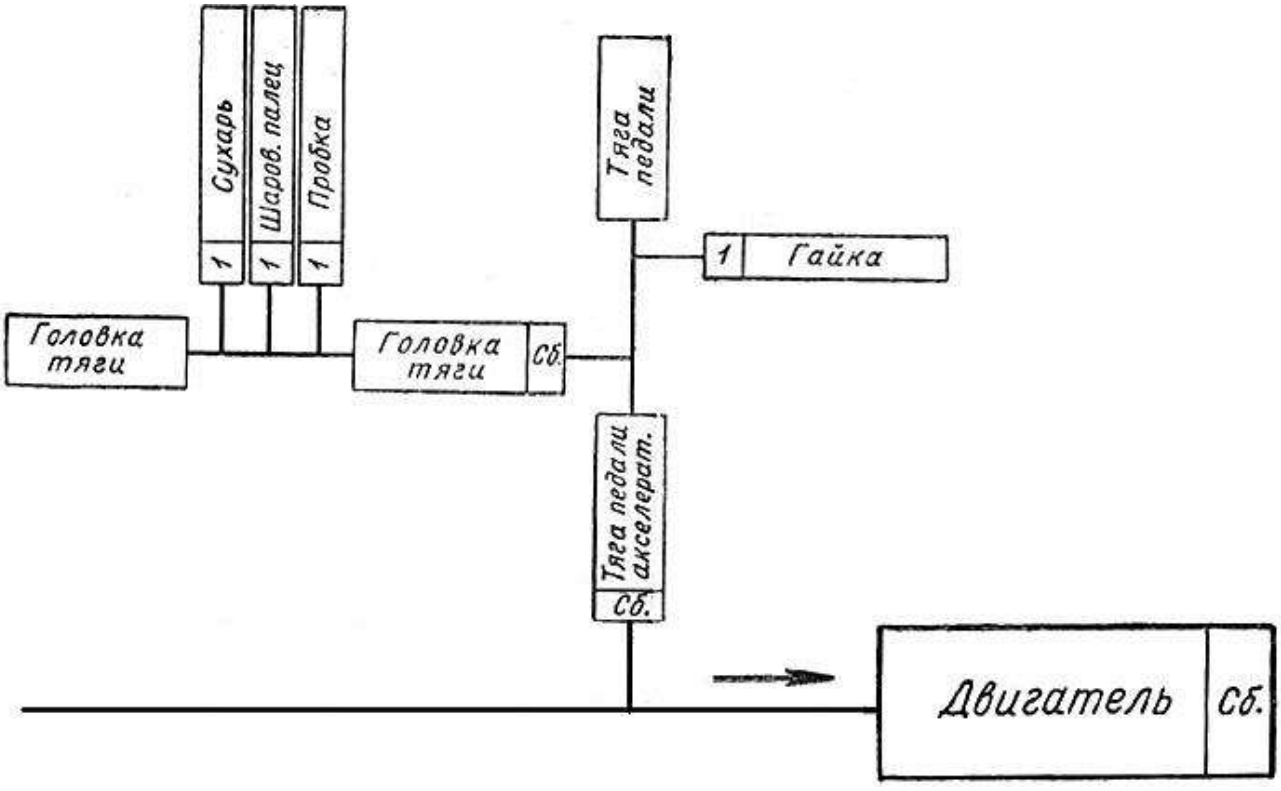



Рис. 1. Фрагмент схемы сборки

В левой части указывается базовый элемент, а в правой части – изделие в сборе. Эти две части соединены горизонтальной линией, выше и ниже которой обозначены все детали в порядке последовательности сборки и узлы, входящие непосредственно в изделие. Технологические схемы могут снабжаться надписями, если метод сборки не очевиден из схемы, например: «запрессовать», «сварить» и т. д.

## 4. Расчет площадей механосборочного участка

Площадь станочного отделения цеха, м$^2$:

$$S_{об} = (S_о + S_в)\cdot k_п, \qquad (8)$$

где $S_о$ - площадь основного оборудования (по табл. 3);

$S_в$ - площадь вспомогательного оборудования (по табл. 4);

$k_п = 3{,}5 \div 4$ коэффициент, учитывающий проходы и проезды;

Площадь механосборочного участка с учетом вспомогательных помещений, м$^2$:

$$S_{мсу} = S_{об} + S_{су} + S_{упр} + S_{скл} + S_{заг} + S_{сги}, \qquad (7)$$

где $S_{су}$ - площадь санузла (с учетом душевых и медпункта) – 10 % от общей площади;

$S_{упр}$ - площадь для управляющего персонала (производственные мастера), принимается 10÷20 м$^2$;

$S_{со}$ - площадь сборочного отделения принимается 20÷30 % от общей площади;

$S_{скл}$ - площадь складских помещений 10÷15 % от общей площади;

$S_{заг}$ - площадь заготовительных помещений – 5÷6 % от площади станочного отделения цеха.

## 5. Рекомендации по планировке механосборочного участка

После определения общей площади участка задаются его габаритные размеры. Для зданий, имеющих прямоугольную форму, целесообразно выдерживать соотношение ширины и длины не более 1:3. Габариты участка нормируется по *сетке колонн* – 12х6, 15х6, 18х6 м и ширине пролета, установленному 12 м – для легкого и 15, 18 м – среднего машиностроения. Ширина проезда на участке принимается 2÷3 м, в зависимости от типа транспорта, ширина проходов 1 м.

На плане указывают основные строительные элементы здания, относящиеся к проектируемому участку: наружные и внутренние стены, перегородки, ворота, двери, окна и антресоли. Показывают технологическое оборудование, производственный инвентарь (верстаки, стеллажи, инструментальные шкафы), подъемно-транспортное оборудование (за исключением безрельсовых самоходных и несамоходных транспортных средств: электрокар, погрузчиков и т. п.), проезды и проходы, необходимые для обеспечения рабочих мест материалами и запасными частями, а также площадки накопления изделий или материалов.

Технологическое оборудование изображают в принятом масштабе условным упрощенным контуром с учетом крайнего положения движущихся частей, открывающихся кожухов и устанавливаемых на оборудовании изделий, если последние выходят в плане за габаритные размеры оборудования. Внутри контура оборудования и производственного инвентаря или вне контура на выносной полке указывают его номер по спецификации к чертежу. Нумерацию обычно дают последовательно, в порядке размещения оборудования и инвентаря на чертеже, слева направо и затем сверху вниз.

Расположение станков и другого технологического оборудования, устанавливаемого на фундаменты, координируют относительно колонн

и стен здания. Указание на чертеже расстояний от оборудования до колонн и стен называют *привязкой оборудования*.

Условными обозначениями на чертеже показывают места расположения рабочих и места подсоединения к энергетическим сетям, водопроводу, вентиляции и канализации. Основные условные обозначения приведены на рис. 2 приложения.

Планы расстановки технологического оборудования выполняют, как правило, на стадии разработки проекта в масштабе 1:200, на стадиях разработки рабочей документации или рабочего проекта – в масштабе 1:100. В учебных проектах допускается применение масштабов 1:50 и 1:25.

К плану расстановки технологического оборудования прилагают спецификацию, содержащую в табличной форме следующие данные: номера по плану; наименование оборудования и инвентаря; краткую техническую характеристику; модель или тип; место изготовления; количество; примечания, в которых указывают мощность оборудования и потребителей воды, воздуха, пара, газа и других энергоресурсов. Допускается размещать спецификацию на свободном поле чертежа.

Расположение технологического оборудования, ширина и расположение проходов и проездов должны обеспечивать удобство и безопасность работы, подачи изделий, инструмента, уборки отходов и помещения, доступа к оборудованию для его обслуживания, ремонта, монтажа и демонтажа.

Расстояния между оборудованием и частями зданий (стенами, колоннами), размеры проходов и проездов должны быть не менее указанных в нормах технологического проектирования (табл. П.3), пример планировки – рис. 3, 4 приложения.

Одновременно с расстановкой производственного оборудования на планировке располагают подъемно-транспортные средства для обеспечения ремонта оборудования, а также перемещения поддонов с заготовками или готовыми изделиями (конвейеры, монорельсы, склизы, рольганги, мостовые краны и др., табл. 5).

Основным принципом расположения оборудования является обеспечения кратчайшего пути движения заготовок (деталей) в процессе их обработки.

Для этого необходимо при расстановке оборудования стремиться к соблюдению следующих наиболее важных условий:

1. Располагать оборудование по порядку выполнения операций технологического процесса.

2. Обеспечить полную комплектность оборудования на линии обработки, т. е. обеспечить ее всеми станками, нужными для обработки детали.

3. Расстояние между станками должно быть минимальным, при этом уменьшаются затраты труда на транспортировку заготовок от станка к станку, создаются лучшие условия для многостаночной работы и обеспечивается лучшее использование производственной площади.

4. Станки на линии должны быть расставлены так, чтобы было обеспечено (по возможности) одно направление всех обрабатываемых заготовок. Обычно линии станков для обработки заготовок располагаются параллельно друг другу. Проезды устраивают перпендикулярно этим линиям.

Кроме этого при разработке планировки необходимо учесть следующее:

- необходимо обеспечить монтаж и демонтаж любого станка без перестановки остального оборудования;

- следует учесть возможность многостаночного обслуживания;

- оборудование, работающее с длинномерными заготовками (токарно-револьверные станки и др.), устанавливается под углом 15 - 20 °.

Проектирование производственных участков необходимо проводить в соответствии со строительными нормами и правилами (СНиП), правилами безопасности жизнедеятельности, пожарной безопасности и санитарии. Правила установки оборудования с соблюдением техники безопасности даны в специальной литературе [2-7]. Там же приведены контуры и габаритные размеры станков.

Таблица 5

**Подъемно-транспортное оборудование**

| Наименование | Грузоподъемность | Длина пролета, м |
|---|---|---|
| Кран мостовой с электротельфером | 1, 2, 3, 5 т | 5, 6, 7, … 17 |
| Монорельс с электротельфером или электроталью | 0,15; 0,25; 0,5; 1; 2; 3 т | – |
| Кран-укосина с электроталью (угол поворота до 270°) | От 0,25 т | Длина стрелы 1,2 - 4 |
| Кран-балка электрифицированная | До 3 т | – |
| Рольганг | До 1000 кг/м | Ширина до 0,6 |

## 6. Определение технико-экономических показателей цеха

Разработав проект цеха механической обработки по полученному ранее заданию, необходимо оценить эффективность разработанного проекта в сравнении со средними технико-экономическими показателями по отраслям (табл. 6), в зависимости от изготовляемой продукции.

Таблица 6

**Технико-экономические показатели производства по машиностроительным отраслям**

| Номер показат. | Показатели | Станкостроение | Тракторостроение | Тяжелое машиностроение |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Выпуск на 1 производственного рабочего, т | 10,9 | 60,0 | 30,0 |
| 2 | Выпуск на 1 шт. производственного оборудования, т | 17,5 | 68,0 | 83,3 |
| 3 | Выпуск на 1 м² производственной площади, т | 1,87 | 5,4 | 2,07 |
| 4 | Трудоемкость 1 т обрабатываемых деталей, станко-часов | 162,0 | 35,2 | 39,0 |
| 5 | Средний коэффициент загрузки оборудования | 0,83 | 0,64 | 0,86 |
| 6 | Производственная площадь на единицу производственного оборудования, м² | 21,4 | 12,5 | 40,0 |
| 7 | Общая площадь на единицу производственного оборудования, м² | 28,1 | 19,0 | 58,0 |
| 8 | Коэффициент использования площади | 0,76 | 0,65 | 0,69 |

Основной показатель рациональности расположения оборудования - коэффициент использования площади

$$k_{и.пл.}=S_{мсу}/S_{факт}, \quad (8)$$

где $S_{мсу}$ – расчетная сумма площадей занятых соответственно оборудованием для изготовления и обработки деталей и вспомогательными службами в соответствии с принятыми нормами (7);

$S_{факт}$ – фактическая площадь цеха, участка.

# ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

## Приближенные формулы для определения основного технологического времени $T_o \cdot 10^{-3}$, мин.

| | |
|---|---|
| Черновая обточка за один проход | 0,17*dl* |
| Чистовая обточка по 11-му квалитету | 0,1*dl* |
| Чистовая обточка по 9-му квалитету | 0,17*dl* |
| Черновая подрезка торца $R_a$ 6,3 | 0,037($D^2 - d^2$) |
| Чистовая подрезка торца $R_a$ 1,6 | 0,052($D^2 - d^2$) |
| Отрезание | 0,19$D^2$ |
| Черновое и чистовое обтачивание фасонным резцом | 0,63($D^2 - d^2$) |
| Шлифование грубое по 11-му квалитету | 0,07*dl* |
| Шлифование чистое по 9-му квалитету | 0,1*dl* |
| Шлифование чистовое по 6-му квалитету | 0,15*dl* |
| Растачивание отверстий на токарном станке | 0,18*dl* |
| Сверление отверстий | 0,52*dl* |
| Рассверливание *d* = 20…60 | 0,31*dl* |
| Зенкерование | 0,21*dl* |
| Развертывание черновое | 0,43*dl* |
| Развертывание чистое | 0,86*dl* |
| Внутреннее шлифование отверстий 9-го квалитета | 1,5*dl* |
| Внутреннее шлифование отверстий 7-го квалитета | 1,8*dl* |
| Черновое растачивание отверстий за один проход *Ra* 12,5 | 0,2*dl* |
| Черновое растачивание под развертку | 0,3*dl* |
| Развертывание плавающей разверткой по 9-му квалитету | 0,27*dl* |
| Развертывание плавающей разверткой по 7-му квалитету | 0,52*dl* |
| (*d* – диаметр; *l* – длина обрабатываемой поверхности; *D* – диаметр обрабатываемого торца; (*D* – *d*) – разность наибольшего и наименьшего диаметров обрабатываемого торца) | |
| Протягивание отверстий и шпоночных канавок (*l* – длина протяжки, мм) | 0,4*l* |
| Строгание черновое на продольно-строгальных станках | 0,065*Bl* |
| Строгание чистовое под шлифование или шабрение | 0,034*Bl* |
| Фрезерование черновое торцевой фрезой - за проход<br>- чистовое | 6*l*<br>4*l* |
| Фрезерование черновое цилиндрической фрезой | 7*l* |
| Шлифование плоскостей торцом круга | 2,5*l* |
| (*B* – ширина обрабатываемой поверхности, мм; *l* – длина обрабатываемой поверхности, мм) | |
| Фрезерование зубьев червячной фрезой (*D* = 30 … 300 мм) | 2,2*Db* |
| Обработка зубьев червячных колес (*D* = 100 … 400 мм)<br>(*D* – диаметр зубчатого колеса, мм; *b* – длина зуба, мм) | 60,3*D* |

Окончание табл. П.1

| | |
|---|---|
| Фрезерование шлицевых валов методом обкатки | 9*lz* |
| Шлицешлифование (*l* – длина шлицевого валика, мм; *z* – число шлицев) | 4,6*lz* |
| Нарезание резьбы на валу (*d* = 32…120) | 19*dl* |
| Нарезание метчиком резьбы в отверстиях (*d* = 10 … 24) (*d* – диаметр резьбы, мм; *l* – длина резьбы, мм) | 0,4*dl* |

Таблица П.2

**Значение коэффициента $\varphi_k$**

| Виды станков | Производство | |
|---|---|---|
| | единичное и мелкосерийное | крупносерийное |
| Токарно-револьверные | 1,98 | 1,27 |
| Токарно-многорезцовые | – | 1,35 |
| Вертикально-сверлильные | 1,72 | 1,50 |
| Радиально-сверлильные | 1,75 | 1,30 |
| Расточные | 3,25 | 1,41 |
| Круглошлифовальные | 2,10 | – |
| Строгальные | 1,73 | 1,55 |
| Фрезерные | 1,84 | – |
| Зуборезные | 1,66 | 1,51 |
| Токарные | 2,14 | 1,27 |
| Примечание: штучно-калькуляционное время $T_{ик} = \varphi_k T_o$. | | |

Таблица П3

**Нормы расстояний между станками и элементами зданий**

| Расстояния | Величина расстояния, мм при размерах станков, м | | |
|---|---|---|---|
| | мелкие (до 1,8х0,8) | средние (до 2,4х1,2) | крупные (до 4х2) |
| *При расположении фронтальными сторонами к проезду* | | | |
| Между боковыми сторонами | 700 | 900 | 1200 |
| Между тыльными сторонами | 700 | 800 | 1000 |
| *При поперечном расположении к проезду* | | | |
| Расположение станков в «затылок» | 1300 | 1500 | 1800 |
| Расположение станков в фронтом к друг другу | 2000 | 2500 | 2800 |
| То же при многостаночном обслуживании | 1300 | 1500 | - |
| От стен или колонн здания до тыльной или боковой стороны станка | 700 | 800 | 900 |
| То же до фронта станка | 1300 | 1500 | 1800 |

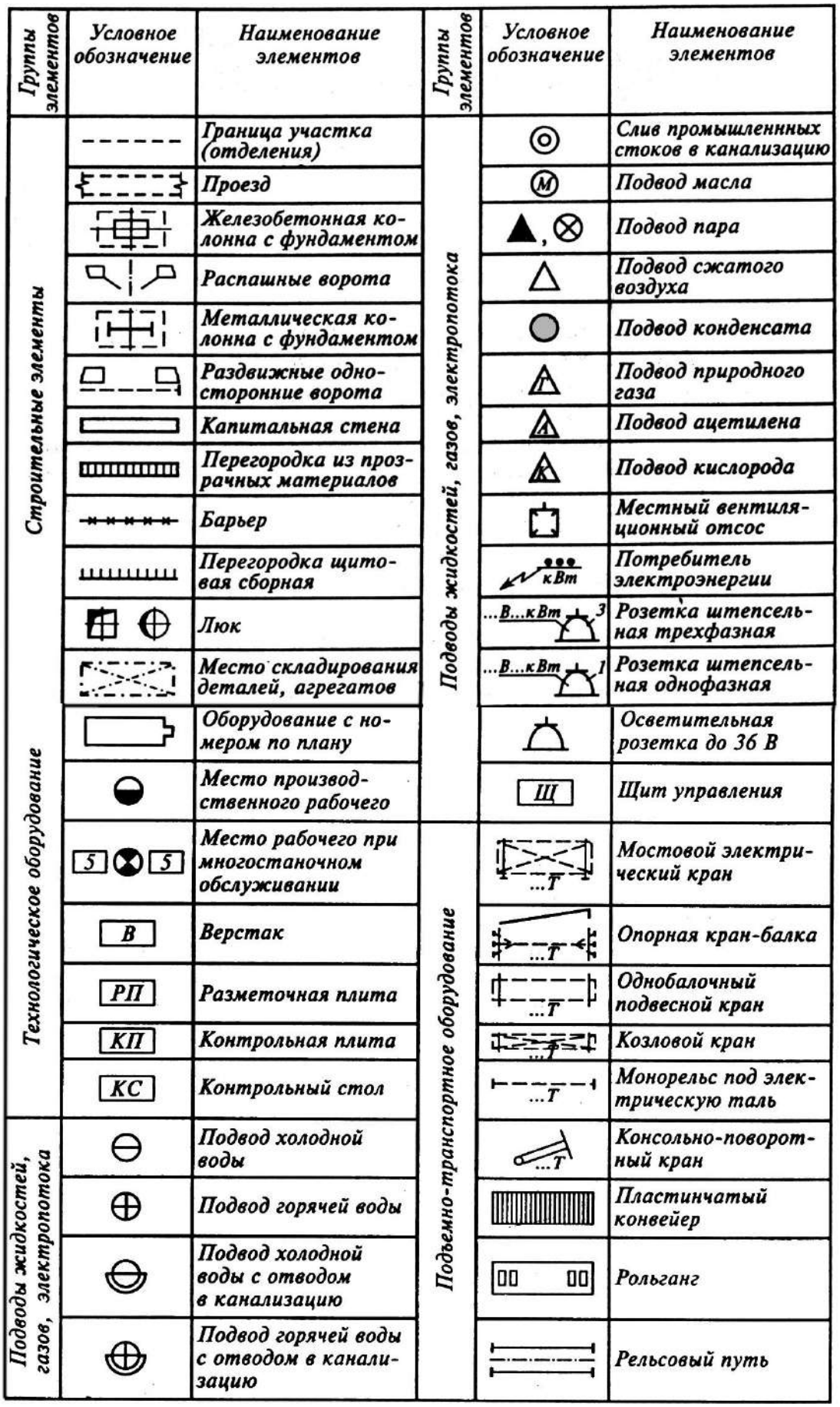



Рис. 2. Условные обозначения элементов строительных конструкций и оборудования

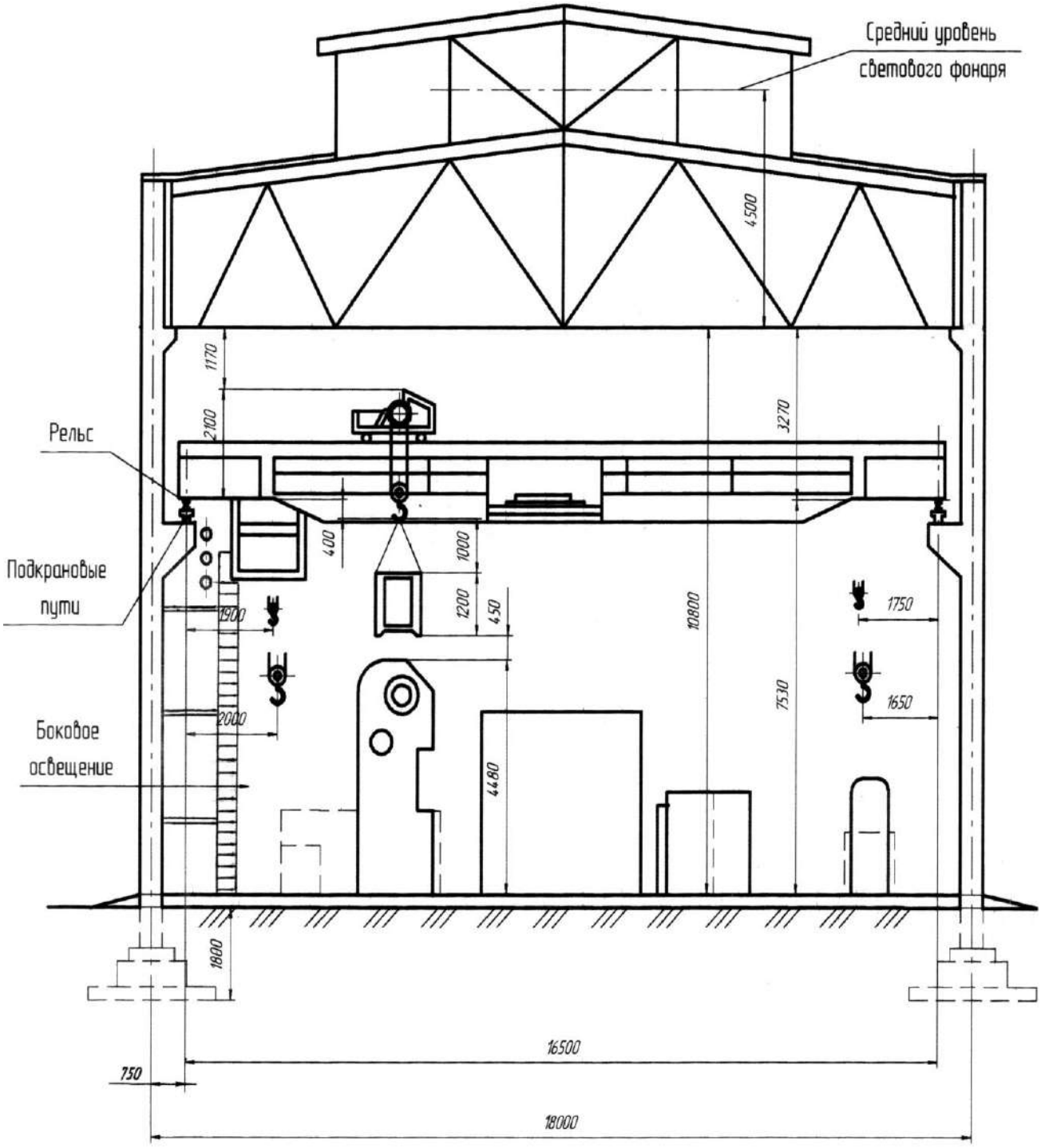



Рис. 3. Сечение производственного здания

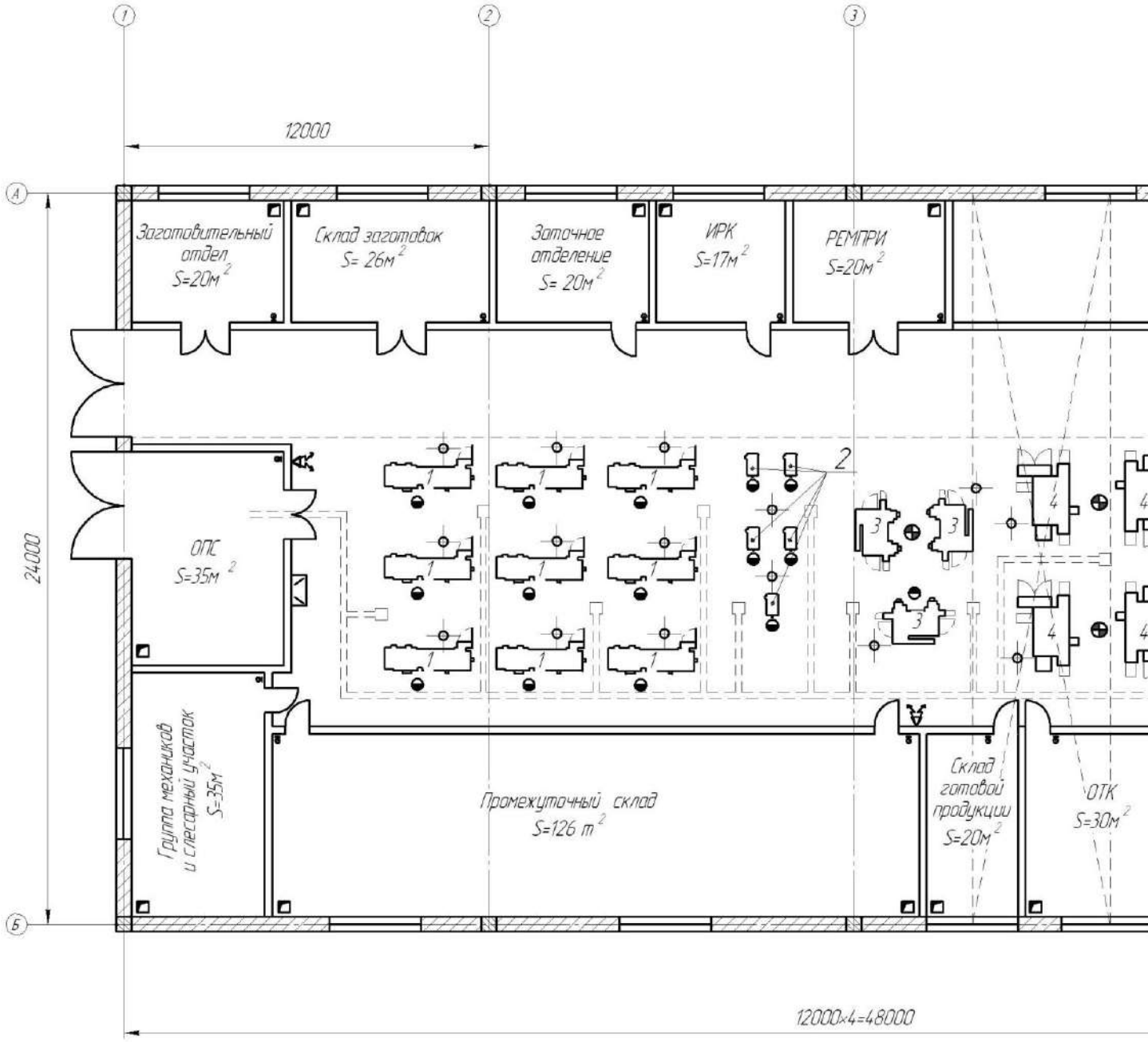
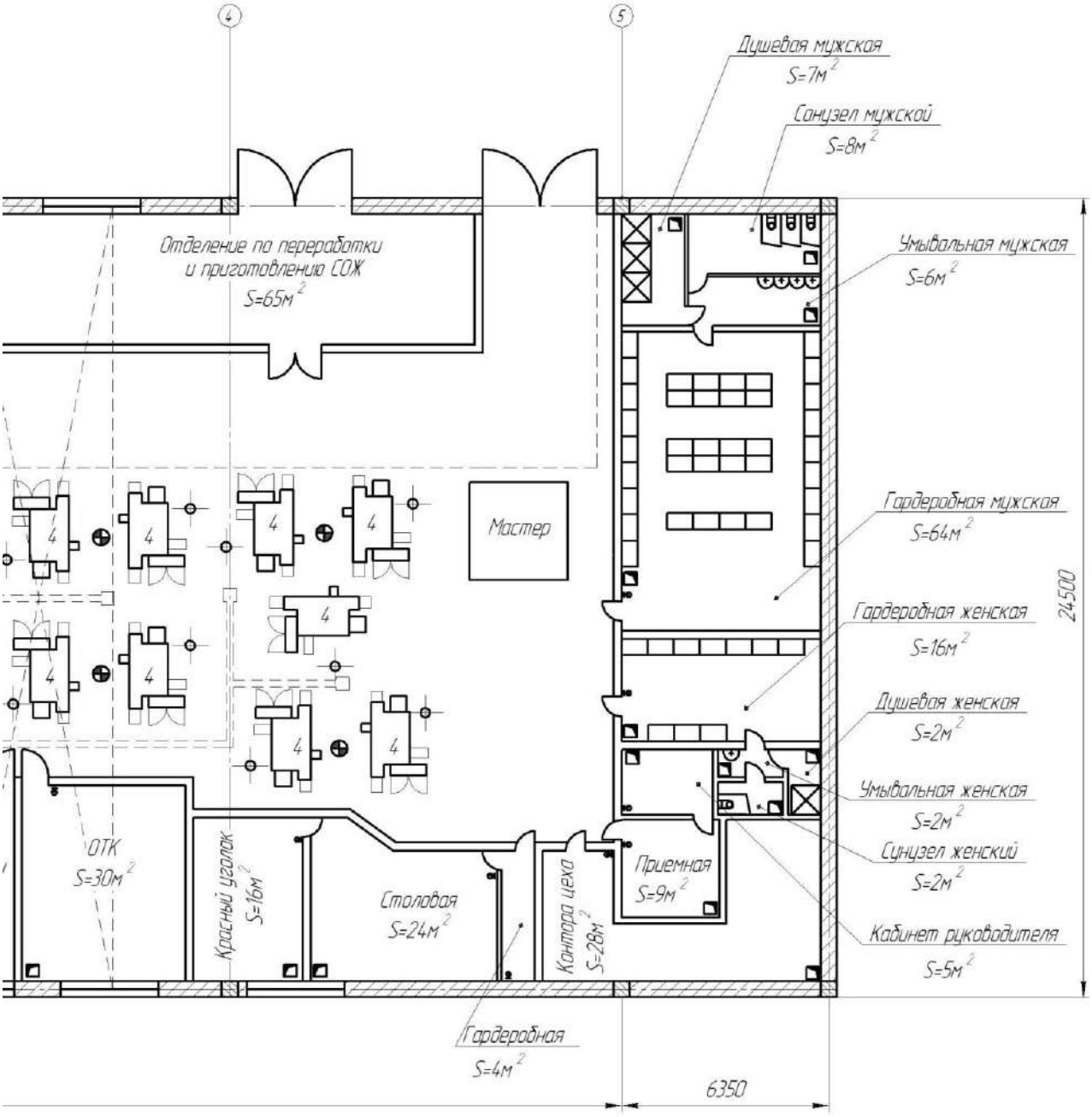



Рис. 4. Пример планировки механо-




-сборочного цеха (фрагмент)

# ПРИЛОЖЕНИЕ

Графические изображения станков М 1:100

Станки подразделяют:

- по степени универсальности – на универсальные и специализированые;
- по массе - на легкие (до 1т), нормальные (до 10т), крупные (до 30т); тяжелые (до 100т) и универсальные (более 100 т);
- по точности: нормальной (Н), повышенной (П), высокой (В), особовысокой (А), особоточные и прецизионные (С).

Условное обозначение (индекс) станка состоит из трех или четырех цифр и букв: первая цифра - группа станка (например 1 - токарный) вторая цифра - тип или разновидность, третья или четвертая цифра – типоразмер, следующая цифра (или две) - параметры обработки.

Буква, стоящая после первой цифры указывает на исполнение станка по точности.

Буквы, стоящие в конце типовой части - модификация базовой модели.

Пример: 1Г325: 1- токарной группы; Г - модификация; 3 - револьверный; 25 - диаметр прутка (мм).

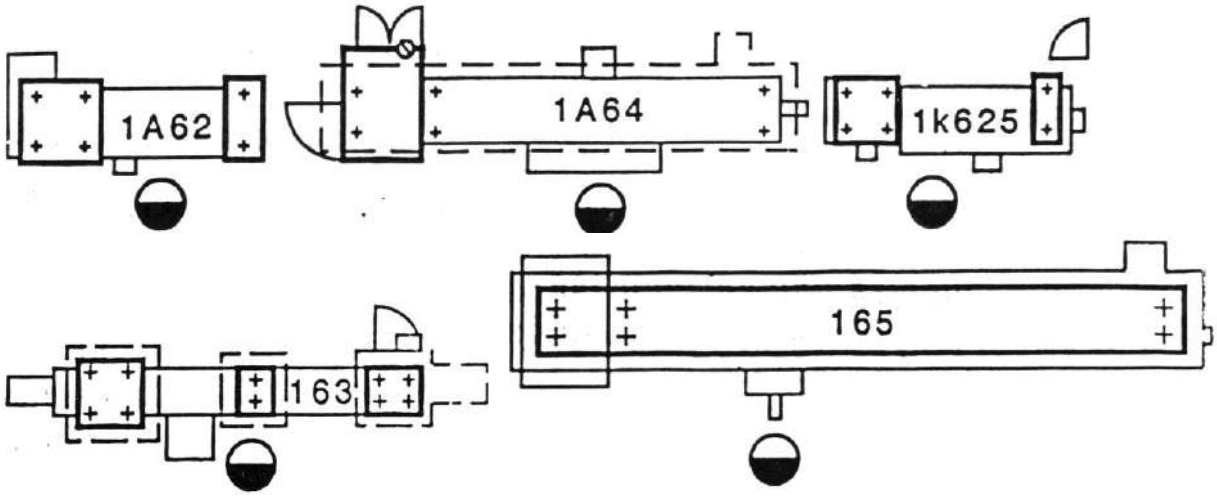
При наличии дополнительных конструктивных особенностей (программное управление, цифровая индексация, магазин с автоматической сменой инструмента) в индексе добавляют следующие буквы:

Ц - цикловое программное управление, Ф1 - цифровая индексация, Ф2 - числовое позиционное программное управление, ФЗ - числовое контурное программное управление, Ф4 и Ф5 - многопозиционные станки, Р - поворотная револьверная головка для автоматической смены инструмента, М - магазин.

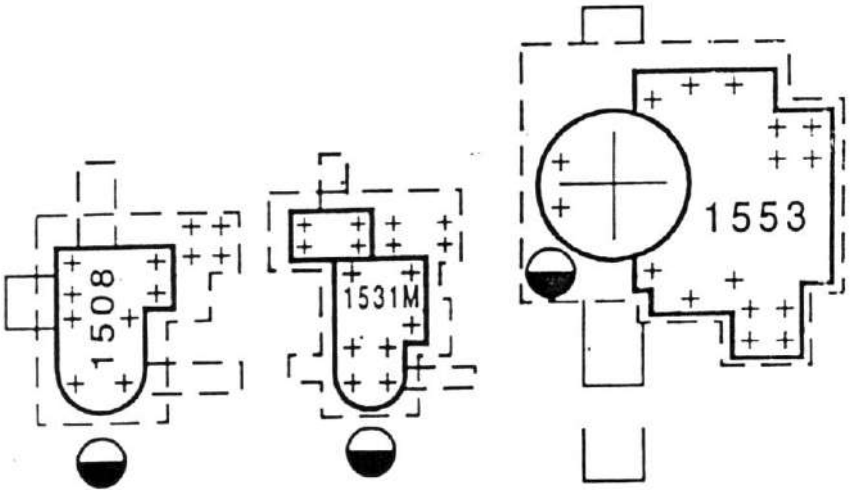
Ниже в контурах станков указаны обозначения моделей станков. М 1:100

ТОКАРНЫЕ

*Токарно-винторезные*

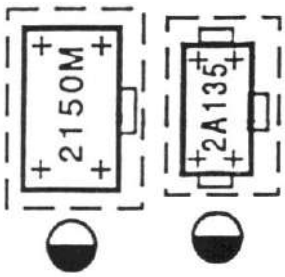


*Токарно-карусельные*

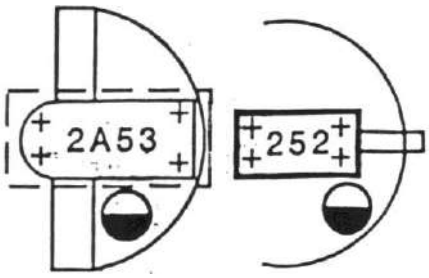



СВЕРЛИЛЬНЫЕ

*Вертикально*

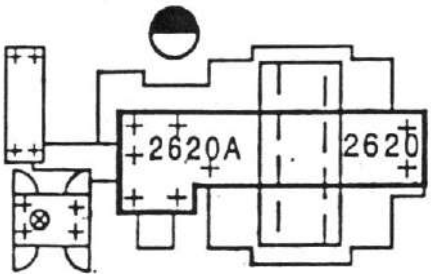



*Радиально*

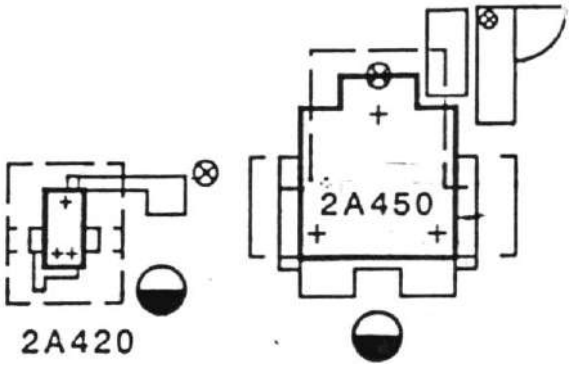



РАСТОЧНЫЕ

Горизонтально

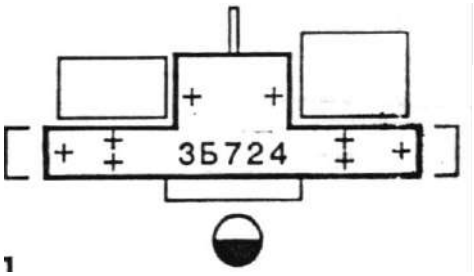



Координатно-расточные

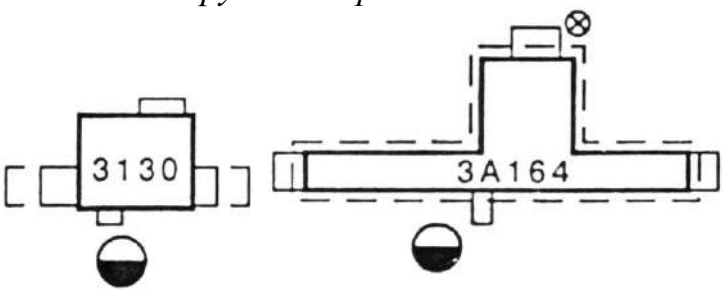


ШЛИФОВАЛЬНЫЕ

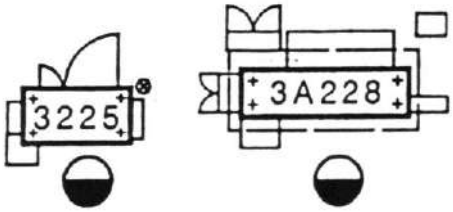
*Плоскошлифовальный*



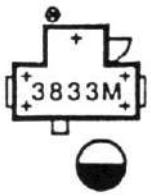

*Круглошлифовальные*



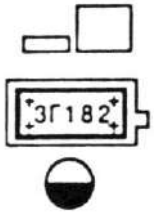

*Внутришлифовальные*




*Хонинговальный*

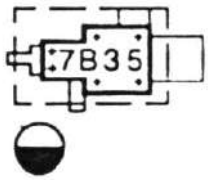



*Бесцентрошлифовальный*

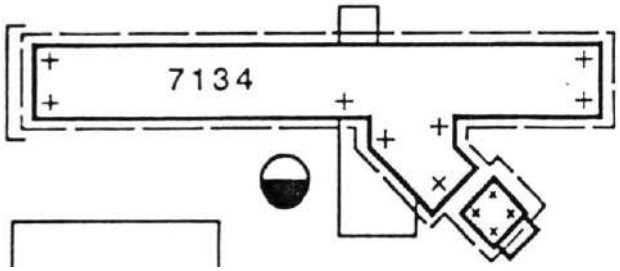



СТРОГАЛЬНЫЕ

*Поперечно*

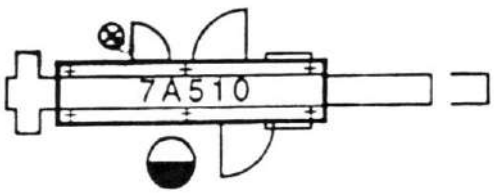



*Продольно*

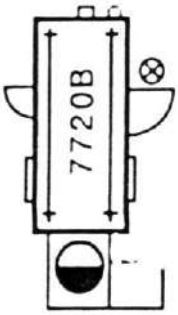



ПРОТЯЖНЫЕ

*Горизонтально*

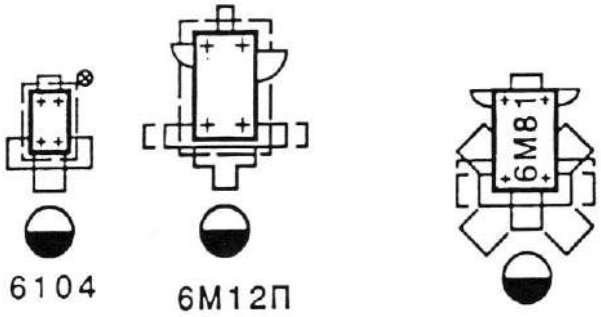



*Вертикально*



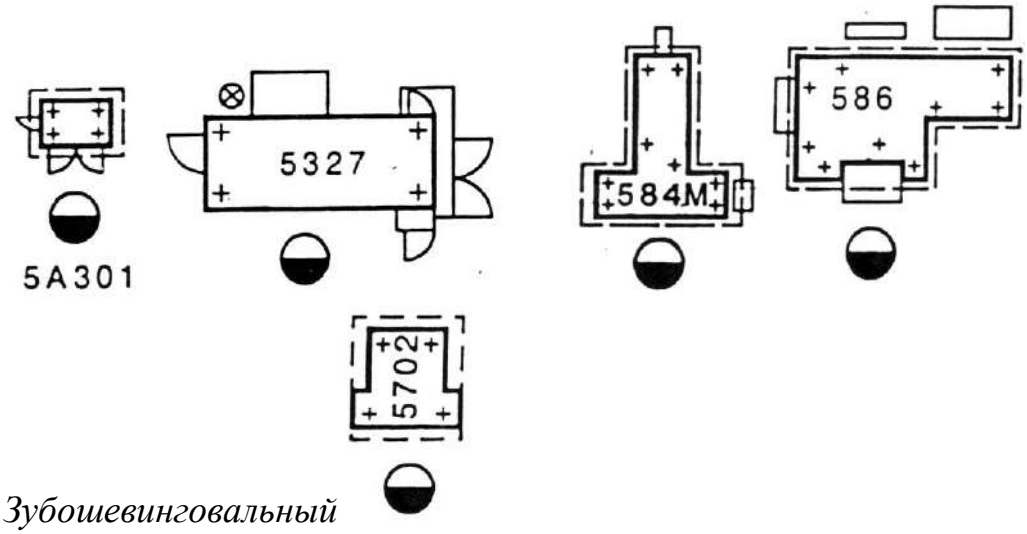
ФРЕЗЕРНЫЕ

*Вертикально* *Консольно*




ЗУБООБРАБАТЫВАЮЩИЕ

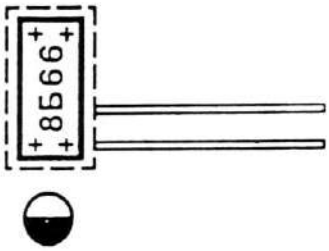
*Зубофрезерные* *Зубошлифовальные*




*Зубошевинговальный*

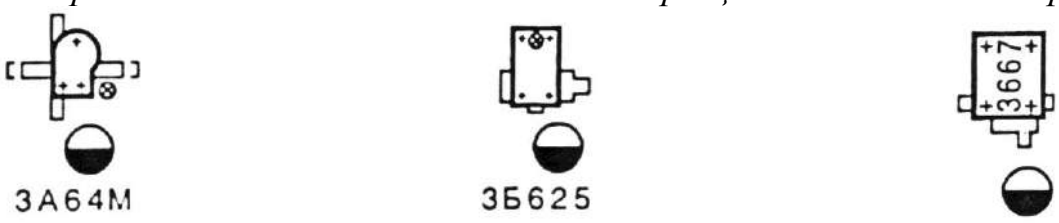
РАЗНЫЕ

*Дисковая пила*




*Станки для заточки инструмента*

*универсально-заточные* *для заточки резцов* *для заточки фрез*



# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Глинникова Т. П., Волегов С. А.* Технология производства горных машин. Часть 1. Справочно-методическое пособие по выполнению технологической части курсового проекта и ВКРИ для студентов специальности 150402 – «Горные машины и оборудование» направления 150400 – «Технологические машины и оборудование» очного и заочного обучения Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2015. 62 с.

2. *Егоров М. Е.* Основы проектирования промышленных предприятий. М.: Машгиз., 1968.

3. *Дмитриев В. Т., Боярских Г. А.* Проектирование технологических процессов восстановления деталей и ремонтных баз горных предприятий: Учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 1994. 140 с.

4. *Мельников Г. Н., Вороненко В. П.* Проектирование механосборочных цехов. Учебник для студентов машиностроит. специальностей вузов / Под ред. А. М. Дальского. -М.: Машиностроение, 1990. 352 с.

5. *СНиП* 10-01-94. Основные положения.

6. *СНиП* 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений.

7. *СНиП* 23-05-95. Естественное и искусственное освещение.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ ..... 3
ЦЕЛЬ РАБОТЫ ..... 4
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ ..... 4
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ ..... 5
1. Разработка технологического процесса изготовления типовой детали ..... 5
2. Расчет потребного оборудования ..... 7
3. Разработка сборочной схемы ..... 8
4. Расчет площадей механосборочного участка ..... 10
5. Рекомендации по планировке механосборочного участка ..... 10
6. Определение технико-экономических показателей цеха ..... 14
ПРИЛОЖЕНИЯ ..... 16
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ..... 21
ОГЛАВЛЕНИЕ ..... 27

### Таблица перевода ОСТ – СЭВ 144-75

| Классы точности | | Квалитет | Обозначение шероховатости | |
|---|---|---|---|---|
| валы | отверстия | | новое | старое |
| 0,7 | | *JT*3 | 0 | ∞ |
| 0,8 | | *JT*4 | 320 | ∇ 1 |
| 1 | 0,9 | *JT*5 | *Rz*160 | ∇ 2 |
| 2 | 1 | *JT*6 | *Rz*80 | ∇ 3 |
| 2 а | 2 | *JT*7 | *Rz*40 | ∇ 4 |
| - | 2 а | *JT*8 | *Rz*20 | ∇ 5 |
| 3 | | *JT*9 | 2,5 | ∇ 6 |
| 3 а | | *JT*10 | 1,25 | ∇ 7 |
| 4 | | *JT*11 | 0,63 | ∇ 8 |
| 5 | | *JT*12 - *JT*13 | 0,32 | ∇ 9 |
| 7 - 8 | | *JT*14 - *JT*15 | 0,16 | ∇ 10 |

Эдуард Викторович Горшков
Денис Иванович Симисинов

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦЕХОВ (УЧАСТКОВ) МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Учебное пособие
по выполнению курсовой работы и специальной части ВКРБ для студентов специализации подготовки – «Оборудование и технологии повышения износостойкости и восстановления деталей машин и аппаратов» (МШС) специальности 15.03.01 – «Машиностроение» очного и заочного обучения

Корректура кафедры эксплуатации горного оборудования

Подписано в печать
Бумага писчая. Формат бумаги 60х84 1/16. Печать на ризографе.
Печ.л.1,75. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ №

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.
Уральский государственный горный университет
Лаборатория множительной техники

Минобрнауки России
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

**УТВЕРЖДАЮ**
Проректор по учебно-методическому комплексу

_____С.А. Упоров

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ
# Б1.В.09 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦЕХОВ И УЧАСТКОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Специальность
15.03.01 Машиностроение

программа подготовки бакалавриата
Направленность (профиль)/ специализация
Производство и реновация машин и оборудования

форма обучения: очная, заочная

год набора: 2019

Автор: Горшков Э.В., доцент, к.т.н.

| | |
|---|---|
| Одобрен на заседании кафедры | Рассмотрен методической комиссией факультета |
| Эксплуатации горного оборудования | Горно-механического |
| *(название кафедры)* | *(название факультета)* |
| Зав. кафедрой _____ | Председатель _____ |
| *(подпись)* | *(подпись)* |
| Симисинов Д.И. | Барановский В.П. |
| *(Фамилия И.О.)* | *(Фамилия И.О.)* |
| Протокол № 8 от 17.04.2019 | Протокол № 7 от 19.04.2019 |
| *(Дата)* | *(Дата)* |

Екатеринбург
2019

**СОДЕРЖАНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ……3

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ……..…….5

САМООРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЛИТЕРАТУРОЙ……..…6

ПОДГОТОВКА К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ…… 10

ПОДГОТОВКА К ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫМ ЗАДАНИЯМ
…….....11

ПОДГОТОВКА К ТЕСТИРОВАНИЮ……...……..13

ПОДГОТОВКА К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ……...13

ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ……..14

# ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа в высшем учебном заведении - это часть учебного процесса, метод обучения, прием учебно-познавательной деятельности, комплексная целевая стандартизованная учебная деятельность с запланированными видом, типом, формами контроля.

Самостоятельная работа представляет собой плановую деятельность обучающихся по поручению и под методическим руководством преподавателя.

Целью самостоятельной работы студентов является закрепление тех знаний, которые они получили на аудиторных занятиях, а также способствование развитию у студентов творческих навыков, инициативы, умению организовать свое время.

Самостоятельная работа реализует следующие задачи:

- предполагает освоение курса дисциплины;
- помогает освоению навыков учебной и научной работы;
- способствует осознанию ответственности процесса познания;
- способствует углублению и пополнению знаний студентов, освоению ими навыков и умений;
- формирует интерес к познавательным действиям, освоению методов и приемов познавательного процесса,
- создает условия для творческой и научной деятельности обучающихся;
- способствует развитию у студентов таких личных качеств, как целеустремленность, заинтересованность, исследование нового.

Самостоятельная работа обучающегося выполняет следующие функции:

- развивающую (повышение культуры умственного труда, приобщение к творческим видам деятельности, обогащение интеллектуальных способностей студентов);
- информационно-обучающую (учебная деятельность студентов на аудиторных занятиях, неподкрепленная самостоятельной работой, становится мало результативной);
- ориентирующую и стимулирующую (процессу обучения придается ускорение и мотивация);
- воспитательную (формируются и развиваются профессиональные качества бакалавра и гражданина);
- исследовательскую (новый уровень профессионально-творческого мышления).

Организация самостоятельной работы студентов должна опираться на определенные требования, а, именно:

- сложность осваиваемых знании должна соответствовать уровню развития студентов;
- стандартизация заданий в соответствии с логической системой курса дисциплины;
- объем задания должен соответствовать уровню студента;
- задания должны быть адаптированными к уровню студентов.

Содержание самостоятельной работы студентов представляет собой, с одной стороны, совокупность теоретических и практических учебных заданий, которые должен выполнить студент в процессе обучения, объект его деятельности; с другой стороны - это способ деятельности студента по выполнению соответствующего теоретического или практического учебного задания.

Свое внешнее выражение содержание самостоятельной работы студентов находит во всех организационных формах аудиторной и внеаудиторной деятельности, в ходе самостоятельного выполнения различных заданий.

Функциональное предназначение самостоятельной работы студентов в процессе лекций, практических занятий по овладению специальными знаниями заключается в самостоятельном прочтении, просмотре, прослушивании, наблюдении, конспектировании, осмыслении, запоминании и воспроизведении определенной информации. Цель и планирование самостоятельной работы студента определяет преподаватель. Вся информация осуществляется на основе ее воспроизведения.

Так как самостоятельная работа тесно связана с учебным процессом, ее необходимо рассматривать в двух аспектах:

1. аудиторная самостоятельная работа - лекционные, практические занятия;

2. внеаудиторная самостоятельная работа – дополнение лекционных материалов, подготовка к практическим занятиям, подготовка к участию в деловых играх и дискуссиях, выполнение письменных домашних заданий, Контрольных работ (рефератов и т.п.) и курсовых работ (проектов), докладов и др.

Основные формы организации самостоятельной работы студентов определяются следующими параметрами:

- содержание учебной дисциплины;
- уровень образования и степень подготовленности студентов;
- необходимость упорядочения нагрузки студентов при самостоятельной работе.

Таким образом, самостоятельная работа студентов является важнейшей составной частью процесса обучения.

Методические указания по организации самостоятельной работы и задания для обучающихся по дисциплине «Проектирование цехов и участков машиностроительного производства» обращают внимание студента на главное, существенное в изучаемой дисциплине, помогают выработать умение анализировать явления и факты, связывать теоретические положения с практикой, а также облегчают подготовку к выполнению *контрольной работы* и сдаче *зачета*.

Настоящие методические указания позволят студентам самостоятельно овладеть фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю подготовки, опытом творческой и исследовательской деятельности, и направлены на формирование компетенций, предусмотренных учебным планом поданному профилю.

Видами самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «Проектирование цехов и участков машиностроительного производства» являются:

- повторение материала лекций;
- самостоятельное изучение тем курса (в т.ч. рассмотрение основных категорий дисциплины, работа с литературой);
- ответы на вопросы для самопроверки (самоконтроля);
- подготовка к практическим занятиям;
- подготовка к тестированию;
- подготовка контрольной работы;
- подготовка к зачету.

В методических указаниях представлены материалы для самостоятельной работы и рекомендации по организации отдельных её видов.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

**ТЕМА 1:** ***Предпроектное обследование и подготовка исходных данных для проектирования***.

1.Основные цели и задачи, решаемые при проектировании*?*
2.Состав экономических задач при проектировании завода*?*
3.Какие технические задачи необходимо решать при проектировании машиностроительного завода?
4.Организационные задачи проработка которых необходима при проектировании машиностроительного производства?
5.Этапы проектирования (ТЭО, выбор площадки под строительство, задание на проектирование)?
6.Кем разрабатывается и что включает в себя ТЭО?
7.Кто составляет задание на проектирование?
8.Что должно включать в себя задание на проектирование?
9.Стадийность проектирования заводов.
10.Кто и с какой целью разрабатывает бизнес план по строительству и реконструкции машиностроительного предприятия?

**Тема 2:** ***Определение состава, количества основного технологического оборудования и плана его расположения в цехе (участке).***

1. Что изображается на генеральном плане завода?
2.Какие периоды включает в себя разработка генерального плана машиностроительного предприятия?
3.Исходные данные для составления генерального плана завода?
4.На какие виды подразделяются заводские цеха?
5.Состав производственных цехов.
6. Состав вспомогательных цехов.

7.Обслуживающие цехи и устройства.

8.Принципы заложенные в основу проектирования генерального плана.

9.На какие виды подразделяется транспорт машиностроительного предприятия?

10.Какие коэффициенты характеризуют эффективность экономических расчетов генерального плана?

11.Какие виды оборудования располагаются в цехе?

12.Какими методами производится расчет количества единиц основного оборудования механического цеха?

**ТЕМА 3:** ***Проектирование производственного помещения цеха.***

1.Основной принцип, которому следует придерживаться при планировке оборудования в цехе?

2.Каким образом располагаются станки участков или линий?

3.Какими правилами и приемами необходимо руководствоваться при выполнении планировки оборудования в цехе?

4.Какими нормами регламентируется расстояние между станками, между станками и элементами здания, ширина проездов в зависимости от применяемых транспортных средств?

5.Могут ли быть увеличены нормы на расстояния между станками, между станками и элементами здания, ширину проездов?

6.Какова рекомендованная длинна участков цеха, занятых станками, для условий машиностроительных заводов?

7.Во сколько рядов могут быть расположены станки вдоль участка?

8.Каким образом могут располагаться технологические линии на пролетах механического цеха?

9. Каким образом могут быть расположены станки по отношению к проезду?

10.Как могут быть расположены станки по отношению друг к другу?

. **ТЕМА4:** ***Объемно-планировочные и конструктивные решения зданий машиностроительного предприятия.***

1.Какие параметры сетки колонн приняты для одноэтажных многопролетных зданий машиностроительного предприятия?

2.Укажите последовательность выполнения компоновки проектируемого цеха?

3.Перечислите основные конструктивные элементы промышленных зданий, оказывающие влияние на размещение технологического оборудования?

4.Указывается ли технологическое оборудование на компановочном плане?

5.Какие способы определения площадей производственных участков цеха Вы знаете?

6.Учитывается ли ширина магистральных проездов при определении площадей производственных участков цеха?
7.Почему для размещения станочного оборудования отдается предпочтение одноэтажным многопролетным зданиям, а не многоэтажным?
8.Каким образом производится расчет основных параметров производственного помещения цеха?
9.Какие компановочные и планировочные решения механических цехов Вы знаете?
10.Чем обусловлен выбор того или иного варианта компановки участков в цехах различного производственного назначения?

## САМООРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЛИТЕРАТУРОЙ

Самостоятельное изучение тем курса осуществляется на основе списка рекомендуемой литературы к дисциплине. При работе с книгой необходимо научиться правильно ее читать, вести записи. Самостоятельная работа с учебными и научными изданиями профессиональной и общекультурной тематики– это важнейшее условие формирования научного способа познания.

Основные приемы работы с литературой можно свести к следующим:

• составить перечень книг, с которыми следует познакомиться;

• перечень должен быть систематизированным (что необходимо для семинаров, что для экзаменов, что пригодится для написания курсовых и выпускных квалификационных работ (ВКР), а что выходит за рамками официальной учебной деятельности, и расширяет общую культуру);

• обязательно выписывать все выходные данные по каждой книге (при написании курсовых и выпускных квалификационных работ это позволит экономить время);

• определить, какие книги (или какие главы книг) следует прочитать более внимательно, а какие – просто просмотреть;

• при составлении перечней литературы следует посоветоваться с преподавателями и руководителями ВКР, которые помогут сориентироваться, на что стоит обратить большее внимание, а на что вообще не стоит тратить время;

• все прочитанные монографии, учебники и научные статьи следует конспектировать, но это не означает, что надо конспектировать «все подряд»: можно выписывать кратко основные идеи автора и иногда приводить наиболее яркие и показательные цитаты (с указанием страниц);

• если книга – собственная, то допускается делать на полях книги краткие пометки или же в конце книги, на пустых страницах просто сделать свой «предметный указатель», где отмечаются наиболее интересные мысли и обязательно указываются страницы в тексте автора;

• следует выработать способность «воспринимать» сложные тексты; для этого лучший прием – научиться «читать медленно», когда понятно каждое

прочитанное слово (а если слово незнакомое, то либо с помощью словаря, либо с помощью преподавателя обязательно его узнать). Таким образом, чтение текста является частью познавательной деятельности. Ее цель – извлечение из текста необходимой информации.

От того, насколько осознанна читающим собственная внутренняя установка при обращении к печатному слову (найти нужные сведения, усвоить информацию полностью или частично, критически проанализировать материал и т.п.) во многом зависит эффективность осуществляемого действия. Грамотная работа с книгой, особенно если речь идет о научной литературе, предполагает соблюдение ряда правил, для овладения которыми необходимо настойчиво учиться. Это серьёзный, кропотливый труд. Прежде всего, при такой работе невозможен формальный, поверхностный подход. Не механическое заучивание, не простое накопление цитат, выдержек, а сознательное усвоение прочитанного, осмысление его, стремление дойти до сути – вот главное правило. Другое правило – соблюдение при работе над книгой определенной последовательности. Вначале следует ознакомиться с оглавлением, содержанием предисловия или введения. Это дает общую ориентировку, представление о структуре и вопросах, которые рассматриваются в книге.

Следующий этап – чтение. Первый раз целесообразно прочитать книгу с начала до конца, чтобы получить о ней цельное представление. При повторном чтении происходит постепенное глубокое осмысление каждой главы, критического материала и позитивного изложения; выделение основных идей, системы аргументов, наиболее ярких примеров и т.д. Непременным правилом чтения должно быть выяснение незнакомых слов, терминов, выражений, неизвестных имен, названий. Студентам с этой целью рекомендуется заводить специальные тетради или блокноты. Важная роль в связи с этим принадлежит библиографической подготовке студентов. Она включает в себя умение активно, быстро пользоваться научным аппаратом книги, справочными изданиями, каталогами, умение вести поиск необходимой информации, обрабатывать и систематизировать ее.

Выделяют четыре основные установки в чтении текста:

- информационно-поисковая (задача – найти, выделить искомую информацию);
- усваивающая (усилия читателя направлены на то, чтобы как можно полнее осознать и запомнить, как сами сведения, излагаемые автором, так и всю логику его рассуждений);
- аналитико-критическая (читатель стремится критически осмыслить материал, проанализировав его, определив свое отношение к нему);
- творческая (создает у читателя готовность в том или ином виде – как отправной пункт для своих рассуждений, как образ для действия по аналогии и т.п. – использовать суждения автора, ход его мыслей, результат наблюдения, разработанную методику, дополнить их, подвергнуть новой проверке).

С наличием различных установок обращения к тексту связано существование и нескольких видов чтения:

- библиографическое – просматривание карточек каталога, рекомендательных списков, сводных списков журналов и статей за год и т.п.;

- просмотровое – используется для поиска материалов, содержащих нужную информацию, обычно к нему прибегают сразу после работы со списками литературы и каталогами, в результате такого просмотра читатель устанавливает, какие из источников будут использованы в дальнейшей работе;

- ознакомительное – подразумевает сплошное, достаточно подробное прочтение отобранных статей, глав, отдельных страниц; цель – познакомиться с характером информации, узнать, какие вопросы вынесены автором на рассмотрение, провести сортировку материала;

- изучающее – предполагает доскональное освоение материала; в ходе такого чтения проявляется доверие читателя к автору, готовность принять изложенную информацию, реализуется установка на предельно полное понимание материала;

- аналитико-критическое и творческое чтение – два вида чтения близкие между собой тем, что участвуют в решении исследовательских задач.

Первый из них предполагает направленный критический анализ, как самой информации, так и способов ее получения и подачи автором; второе – поиск тех суждений, фактов, по которым, или, в связи с которыми, читатель считает нужным высказать собственные мысли.

Из всех рассмотренных видов чтения основным для студентов является изучающее – именно оно позволяет в работе с учебной и научной литературой накапливать знания в различных областях. Вот почему именно этот вид чтения в рамках образовательной деятельности должен быть освоен в первую очередь. Кроме того, при овладении данным видом чтения формируются основные приемы, повышающие эффективность работы с текстом. Научная методика работы с литературой предусматривает также ведение записи прочитанного. Это позволяет привести в систему знания, полученные при чтении, сосредоточить внимание на главных положениях, зафиксировать, закрепить их в памяти, а при необходимости вновь обратиться к ним.

Основные виды систематизированной записи прочитанного:

Аннотирование – предельно краткое связное описание просмотренной или прочитанной книги (статьи), ее содержания, источников, характера и назначения.

Планирование – краткая логическая организация текста, раскрывающая содержание и структуру изучаемого материала.

Тезирование – лаконичное воспроизведение основных утверждений автора без привлечения фактического материала.

Цитирование – дословное выписывание из текста выдержек, извлечений, наиболее существенно отражающих ту или иную мысль автора.

Конспектирование – краткое и последовательное изложение содержания прочитанного. Конспект – сложный способ изложения содержания книги или

статьи в логической последовательности. Конспект аккумулирует в себе предыдущие виды записи, позволяет всесторонне охватить содержание книги, статьи. Поэтому умение составлять план, тезисы, делать выписки и другие записи определяет и технологию составления конспекта.

Как правильно составлять конспект? Внимательно прочитайте текст. Уточните в справочной литературе непонятные слова. При записи не забудьте вынести справочные данные на поля конспекта. Выделите главное, составьте план, представляющий собой перечень заголовков, подзаголовков, вопросов, последовательно раскрываемых затем в конспекте. Это первый элемент конспекта. Вторым элементом конспекта являются тезисы. Тезис - это кратко сформулированное положение. Для лучшего усвоения и запоминания материала следует записывать тезисы своими словами. Тезисы, выдвигаемые в конспекте, нужно доказывать. Поэтому третий элемент конспекта - основные доводы, доказывающие истинность рассматриваемого тезиса. В конспекте могут быть положения и примеры. Законспектируйте материал, четко следуя пунктам плана. При конспектировании старайтесь выразить мысль своими словами. Записи следует вести четко, ясно. Грамотно записывайте цитаты. Цитируя, учитывайте лаконичность, значимость мысли. При оформлении конспекта необходимо стремиться к емкости каждого предложения. Мысли автора книги следует излагать кратко, заботясь о стиле и выразительности написанного. Число дополнительных элементов конспекта должно быть логически обоснованным, записи должны распределяться в определенной последовательности, отвечающей логической структуре произведения. Для уточнения и дополнения необходимо оставлять поля.

Конспектирование - наиболее сложный этап работы. Овладение навыками конспектирования требует от студента целеустремленности, повседневной самостоятельной работы. Конспект ускоряет повторение материала, экономит время при повторном, после определенного перерыва, обращении к уже знакомой работе. Учитывая индивидуальные особенности каждого студента, можно дать лишь некоторые, наиболее оправдавшие себя общие правила, с которыми преподаватель и обязан познакомить студентов:

1. Главное в конспекте не объем, а содержание. В нем должны быть отражены основные принципиальные положения источника, то новое, что внес его автор, основные методологические положения работы. Умение излагать мысли автора сжато, кратко и собственными словами приходит с опытом и знаниями. Но их накоплению помогает соблюдение одного важного правила – не торопиться записывать при первом же чтении, вносить в конспект лишь то, что стало ясным.

2. Форма ведения конспекта может быть самой разнообразной, она может изменяться, совершенствоваться. Но начинаться конспект всегда должен с указания полного наименования работы, фамилии автора, года и места издания; цитаты берутся в кавычки с обязательной ссылкой на страницу книги.

3. Конспект не должен быть «слепым», безликим, состоящим из сплошного текста. Особо важные места, яркие примеры выделяются цветным подчеркиванием, взятием в рамочку, оттенением, пометками на полях специальными знаками, чтобы можно было быстро найти нужное положение. Дополнительные материалы из других источников можно давать на полях, где записываются свои суждения, мысли, появившиеся уже после составления конспекта.

## ПОДГОТОВКА К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Подготовка к практическому занятию включает следующие элементы самостоятельной деятельности: четкое представление цели и задач его проведения; выделение навыков умственной, аналитической, научной деятельности, которые станут результатом предстоящей работы. Выработка навыков осуществляется с помощью получения новой информации об изучаемых процессах и с помощью знания о том, в какой степени в данное время студент владеет методами исследовательской деятельности, которыми он станет пользоваться на практическом занятии. Следовательно, работа на практическом занятии направлена не только на познание студентом конкретных явлений внешнего мира, но и на изменение самого себя. Второй результат очень важен, поскольку он обеспечивает формирование таких общекультурных компетенций, как способность к самоорганизации и самообразованию, способность использовать методы сбора, обработки и интерпретации комплексной информации для решения организационно-управленческих задач, в том числе находящихся за пределами непосредственной сферы деятельности студента. Подготовка к практическому занятию нередко требует подбора материала, данных и специальных источников, с которыми предстоит учебная работа. В ходе самого практического занятия обучающиеся выполняют задания и делают выводы по выполненному практическому заданию.

## ПОДГОТОВКА К ТЕСТИРОВАНИЮ

Тесты – это вопросы или задания, предусматривающие конкретный, краткий, четкий ответ на имеющиеся эталоны ответов. При самостоятельной подготовке к тестированию студенту необходимо:

1. готовясь к тестированию, проработать информационный материал по дисциплине; проконсультироваться с преподавателем по вопросу выбора учебной литературы;

2. четко выяснить все условия тестирования заранее. Студент должен знать, сколько тестов ему будет предложено, сколько времени отводится на тестирование, какова система оценки результатов и т. д.;

3. приступая к работе с тестами, внимательно и до конца нужно прочитать вопрос и предлагаемые варианты ответов; выбрать правильные (их

может быть несколько); на отдельном листке ответов вписать цифру вопроса и буквы, соответствующие правильным ответам;

- в процессе решения желательно применять несколько подходов в решении задания. Это позволяет максимально гибко оперировать методами решения, находя каждый раз оптимальный вариант;

- не нужно тратить слишком много времени на трудный вопрос, нужно переходить к другим тестовым заданиям; к трудному вопросу можно обратиться в конце;

- обязательно необходимо оставить время для проверки ответов, чтобы избежать механических ошибок.

## ПОДГОТОВКА К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ

Контрольная работа – это письменная работа, выполняемая студентами самостоятельно, преимущественно по общим математическим и естественно-научным, а также специальным дисциплинам, в которой, как правило, решаются конкретные задачи.

Цель контрольной работы – оценка качества усвоения студентами отдельных, наиболее важных разделов, тем и проблем изучаемой дисциплины, умения решать конкретные теоретические и практические задачи.

Контрольная работа, как правило, имеет аналитическую или описательную части, может решать проблемные ситуации путем проведения численного моделирования или расчетов, в том числе с использованием ПК. По типу они могут иметь характер задач, расчётов, алгоритмов, программ и т.п.

Контрольные работы выполняются студентами самостоятельно в соответствие с учебным планом.

Структура контрольной работы зависит от специфики изучаемой дисциплины. В общем виде контрольная работа должна содержать: титульный лист, введение, основную часть и заключение.

Во введении приводится формулировка контрольного задания, кратко излагается цель контрольной работы, место и роль рассматриваемого вопроса (проблемы) в изучаемой учебной дисциплине.

Основная часть контрольной работы должна, как правило, содержать основные определения, обоснования и доказательства, описание методики расчёта (формулы), а также иметь ссылки на используемые источники информации. Материал работы и ее отдельные положения должны быть взаимосвязаны. Основная часть может также включать анализ теории вопроса по теме контрольной работы. Здесь же приводятся исходные данные и значения параметров в соответствии с заданием на контрольную работу. После этого излагается ход рассуждений, описывается последовательность расчётов, приводятся промежуточные доказательства и результаты решения всей поставленной задачи.

В заключении формулируются краткие выводы по выполненной контрольной работе, а в её конце приводится список использованных источников информации.

Контрольные работы обучающихся выполняются согласно учебному графику и сдаются преподавателю за месяц до защиты контрольной работы. Преподаватель делает отметку о приеме работы в графике сдачи контрольных работ.

Ведущий преподаватель после проверки на титульном листе ставит оценку («зачтено» или «не зачтено») и подписывается. Выявленные в ходе проверки преподавателем замечания фиксируются на полях работы. Контрольные работы, выполненные с нарушением установленных требований, а также их ксерокопии к рассмотрению не принимаются.

Типичными ошибками, допускаемыми обучающихся при подготовке контрольной работы, являются:

– содержание работы не соответствует цели и поставленным задачам контрольной работы;

– нарушение требований к оформлению контрольной работы;

– использование информации без ссылок на источник;

## ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

При подготовке к *зачету* по дисциплине «Проектирование цехов и участков машиностроительного производства» обучающемуся рекомендуется:

1. повторить пройденный материал и ответить на вопросы, используя конспект и материалы лекций. Если по каким-либо вопросам у студента недостаточно информации в лекционных материалах, то необходимо получить информацию из раздаточных материалов и/или учебников (литературы), рекомендованных для изучения дисциплины «Проектирование цехов и участков машиностроительного производства».

Целесообразно также дополнить конспект лекций наиболее существенными и важными тезисами для рассматриваемого вопроса;

2. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* особое внимание необходимо уделять схемам, рисункам, графикам и другим иллюстрациям, так как подобные графические материалы, как правило, в наглядной форме отражают главное содержание изучаемого вопроса;

3. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* (в случаях, когда отсутствует иллюстративный материал) особое внимание необходимо обращать на наличие в тексте словосочетаний вида «во -первых», «во-вторых» и т.д., а также дефисов и перечислений (цифровых или буквенных), так как эти признаки, как правило, позволяют структурировать ответ на предложенное задание.

Подобную текстовую структуризацию материала слушатель может трансформировать в рисунки, схемы и т. п. для более краткого, наглядного и

удобного восприятия (иллюстрации целесообразно отразить в конспекте лекций – это позволит оперативно и быстро найти, в случае необходимости, соответствующую информацию);

4. следует также обращать внимание при изучении материала для подготовки к *зачету* на словосочетания вида «таким образом», «подводя итог сказанному» и т.п., так как это признаки выражения главных мыслей и выводов по изучаемому вопросу (пункту, разделу). В отдельных случаях выводы по теме (разделу, главе) позволяют полностью построить (восстановить, воссоздать) ответ на поставленный вопрос (задание), так как содержат в себе основные мысли и тезисы для ответа.

# Оглавление


**ВВЕДЕНИЕ**.....6

Содержание практических занятий.....9

1. **ПОСТРОЕНИЕ ДЕРЕВА СВОЙСТВ**.....10

Краткие теоретические сведения..... 10

Иерархическая структура свойств..... 10

Правила построения дерева свойств..... 11

Задание..... 14

Порядок выполнения работы.....14

Содержание отчета.....14

Контрольные вопросы.....14

2. **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЕСОМОСТИ**..... 15

Краткие теоретические сведения..... 15

Методы определения коэффициентов весомости..... 15

Задание..... 17

Порядок выполнения работы..... 18

Содержание отчета.....18

Контрольные вопросы.....18

3. **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭТАЛОННОГО И БРАКОВОЧНОГО ЗНАЧЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ**.....19

Краткие теоретические сведения..... 19

Определение браковочных и эталонных значений для показателей свойств, не имеющих физических единиц измерений..... 20

Определение браковочных и эталонных значений документальным методом..... 20

Определение браковочных и эталонных значений показателей экспертным методом..... 21

Задание..... 22

Порядок выполнения работы..... 23

Содержание отчета.....23

Контрольные вопросы.....23

4. **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА**.....24

Краткие теоретические сведения..... 24
Методы расчета комплексной оценки качества..... 24
Задание..... 24
Порядок выполнения работы.....26
Содержание отчета..... 26
Контрольные вопросы..... 26

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОГЛАСОВАННОСТИ РАБОТЫ ГРУППЫ ЭКСПЕРТОВ..... 27

Задание..... 27
Порядок выполнения работы..... 29
Содержание отчета.....29
Контрольные вопросы..... 29

6. АНАЛИЗ ВЕЛИЧИНЫ ПОТЕРЬ..... 30

Краткие теоретические сведения..... 30
Диаграмма Парето..... 30
Задание..... 31
Порядок выполнения работы..... 34
Содержание отчета..... 34
Контрольные вопросы..... 34

7. ПОСТРОЕНИЕ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ ДИАГРАММ.....35

Краткие теоретические сведения..... 35
Задание и порядок выполнения работы..... 35
Содержание отчета..... 37
Контрольные вопросы..... 37

8. ПОСТРОЕНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ..... 38

Краткие теоретические сведения..... 38
Задание и порядок выполнения работы..... 41
Содержание отчета..... 44
Контрольные вопросы..... 45

9. РАЗРАБОТКА ПЛАНОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО ПРИЕМОЧНОГО КОНТРОЛЯ..... 46

Краткие теоретические сведения..... 46

Управление технологическим процессом при контроле по количественному признаку....46
Задание и порядок выполнения работы.... 48
Управление технологическим процессом при контроле по альтернативному признаку....49
Задание и порядок выполнения работы.... 51
Содержание отчета....53
Контрольные вопросы....53

10. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ....54

Краткие теоретические сведения....54
Общие характеристики технологического процесса....54
Задание и порядок выполнения работы.... 55
Содержание отчета....56
Контрольные вопросы....56

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.... 57

ПРИЛОЖЕНИЕ А.... 58

ПРИЛОЖЕНИЕ Б.... 59

ПРИЛОЖЕНИЕ В.... 60

ПРИЛОЖЕНИЕ Г.... 61

# ВВЕДЕНИЕ

Цель практических занятий по дисциплине – закрепление теоретических знаний и приобретение навыков в области измерения качества.

В соответствии с поставленными целями изучения дисциплины «Квалиметрия» определены задачи проведения практических занятий:

приобретение навыков решения задач по выбору систем показателей качества, оценивания качества;

приобретение навыков применения статистических методов контроля и управления качеством процессов;

отработка методики формирования экспертной группы, организации экспертного опроса и получения экспертной оценки;

решение задач по определению качества и управлению технологическими процессами.

Методические указания содержат краткий теоретический материал по темам практических занятий, условия задач и указания по их решению.

Общий объем практических занятий 0,94 з. е. (34 часа) тематика занятий представлена в табл. В.1.

Таблица В.1

| № п/п | Темы занятий | Трудоемкость |
|---|---|---|
| 1 | Построение дерева свойств | 0,110 з. е. (4 часа) |
| 2 | Определение коэффициентов весомости показателей качества | 0,166 з. е. (6 часов) |
| 3 | Определение эталонного и браковочного значений показателей качества | 0,056 з. е. (2 часа) |
| 4 | Расчет комплексной оценки качества методами средневзвешенных | 0,110 з. е. (4 часа) |
| 5 | Расчет коэффициента конкордации | 0,056 з. е. (2 часа) |
| 6 | Построение диаграмм Парето | 0,056 з. е. (2 часа) |
| 7 | Построение причинно-следственных диаграмм | 0,056 з. е. (2 часа) |
| 8 | Построение контрольных карт | 0,110 з. е. (4 часа) |
| 9 | Разработка планов статистического приемочного контроля | 0,110 з. е. (4 часа) |
| 10 | Расчет точности и стабильности технологического процесса | 0,110 з. е. (4 часа) |

Оценить качество и принять управленческое решение означает провести исследования.

Изучением таких исследований и занимается квалиметрия. Практические занятия позволяют студентам:

закрепить знания теоретических основ и методов количественной оценки качества и технического уровня продукции;

освоить частные методики определения единичных и комплексных показателей качества;

научиться расчетам показателей качества и относительного уровня качества.

Данная подготовка позволяет студентам перейти от сущности и определения качества к управлению им. Для того, чтобы научиться управлять качеством, необходимо уметь его измерять.

В результате выполнения практических занятий по дисциплине студент должен обладать следующими компетенциями:

**общенаучными:**

быть готовым к абстрагированию и критическому мышлению при разработке методик оценивания качества (ОНК-1);

генерировать новые идеи в области изучения сущности и структуры качества (ОНК-2);

решать сложные вопросы при выполнении задач определения количественной оценки качества (ОНК-4);

применять математический аппарат, необходимый для осуществления профессиональной деятельности (ОНК-8);

**инструментальными:**

быть готовым к организации и планированию своей деятельности при осуществлении контроля качества (ИК-2);

анализировать, оценивать и улучшать результаты профессиональной деятельности (ИК-3);

строить модели систем задач, анализировать и диагностировать причины появления дефектов (ИК-5);

руководить малым коллективом при проведении экспертной квалиметрической оценки качества (ИК-7);

**социально-личностными и общекультурными:**

разбираться и решать социальные проблемы, связанные с необходимостью работать в творческом коллективе при оценивании качества и изучении проблем качества (СЛК-5).

**организационно-управленческими и экономическими:**

принимать решения с учетом минимизации риска при выборе наиболее оптимальных проектов, лучших изделий и вариантов (ОЭК-1);

консультировать работников по вопросам изучения сущности понятия

«качество» (ОЭК-2);

**профессиональными:**

анализировать состояние и динамику объектов с точки зрения их качества (ПК-1);

осуществлять мониторинг и владеть методами оценки прогресса в области улучшения качества проведения квалиметрического оценивания (ПК-2);

идентифицировать основные вопросы и участвовать в разработке рабочих методик оценивания качества (ПК-3).

Практические занятия выполняются в соответствии с графиком учебного процесса и самостоятельной работы (прил. Г). Предусмотрена также самостоятельная подготовка к практическим занятиям и защита отчета по практическим занятиям.

Трудоемкость самостоятельной работы по подготовке к выполнению и защите практических занятий составляет 0,24 з. е. (8 часов).

Отчет по практическим занятиям должен включать:

исходные данные;

краткую характеристику применяемых методов и методик;

основные расчетные формулы, полученные результаты (по возможности, сведенные в таблицу);

выводы по работе.

При оформлении отчета по практическому занятию необходимо руководствоваться требованиями стандарта СТО 4.2-07–2008 Система менеджмента качества. Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной и научной деятельности [12].

В данных методических указаниях даны краткие теоретические сведения по темам занятий. При подготовке к занятию, в случае если окажется, что данных теоретических сведений студенту не достаточно, он имеет возможность изучить вопрос самостоятельно, воспользовавшись литературой из библиографического списка данных методических указаний.

При защите оформленного в соответствии с вышеперечисленными требованиями отчета, студенту необходимо устно ответить на контрольные вопросы, приведенные в конце каждой темы. Защита практического задания предполагается в конце текущего занятия или в начале следующего.

## Содержание практических занятий

Темы практических занятий и их трудоемкость приведены в табл. В.2.

Таблица В.2

| № п/п | Темы занятий, трудоемкость |
|---|---|
| 1 | Построение дерева свойств – 4 часа, самостоятельная работа – 1 час |
| 2 | Определение коэффициентов весомости показателей качества – 6 часов, самостоятельная работа – 1,5 часа |
| 3 | Определение эталонного и браковочного значений показателей качества – 2 часа, самостоятельная работа – 0,5 часа |
| 4 | Расчет комплексной оценки качества методами средневзвешенных – 4 часа, самостоятельная работа – 1 час |
| 5 | Расчет коэффициента конкордации – 2 часа, самостоятельная работа – 0,5 часа |
| 6 | Построение диаграмм Парето – 2 часа, самостоятельная работа – 0,5 часа |
| 7 | Построение причинно-следственных диаграмм – 2 часа, самостоятельная работа – 0,5 часа |
| 8 | Построение контрольных карт – 4 часа, самостоятельная работа – 1 час |
| 9 | Разработка планов статистического приемочного контроля – 4 часа, самостоятельная работа – 1 час |
| 10 | Расчет точности и стабильности технологического процесса – 4 часа, самостоятельная работа – 0,5 часа |

# 1. ПОСТРОЕНИЕ ДЕРЕВА СВОЙСТВ

## Краткие теоретические сведения

### Иерархическая структура свойств

С точки зрения оценивания качество можно представить в виде иерархической структуры (дерево свойств), на самом низком (нулевом) уровне которого находится качество как наиболее обобщенное комплексное свойство продукции, а на самом высоком уровне – простые свойства (рис. 1.1).

Строя иерархическую структуру свойств, желательно подняться до такого высокого уровня рассмотрения, на котором находятся не разлагаемые на какие-либо другие, наименее общие, так называемые простые свойства.

Правила построения деревьев свойств изложены Г. Г. Азгальдовым:

свойства *m*-го уровня

свойства 2-го уровня

свойства 1-го уровня

свойство 0-го уровня

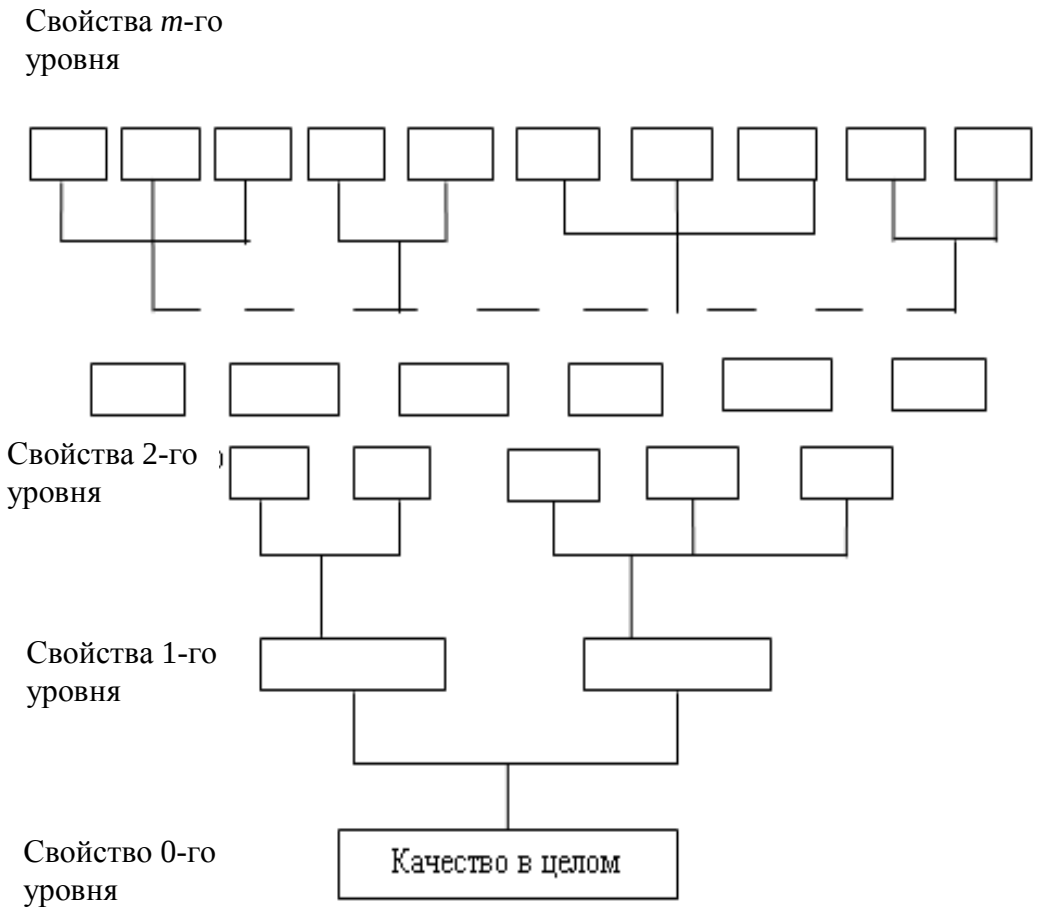



Рис. 1.1. Иерархическое дерево свойств качества

Известно, что каждый предмет и его качество можно описать с помощью большого числа свойств. Комплексный же показатель качества является результирующей величиной этих свойств.

В квалиметрии следует учитывать две противоположные тенденции: с одной стороны – стремление описать качество максимально возможным числом свойств, с другой – количество учитываемых свойств стараются уменьшить, чтобы сократить объемы расчетов. Следовательно, необходимо найти оптимальное число свойств, придерживаясь следующих положений:

свойства качества рассматриваются как классификационная система согласно иерархической многоуровневой структуре свойств (рис. 1.1);

основу классификации составляет признак, определяемый целью, с которой проводится оценка качества;

количество свойств качества должно удовлетворять требованиям необходимости и достаточности.

## Правила построения дерева свойств

Правила, обязательные при любой ситуации оценки, называются общими правилами. Те правила, которых нужно придерживаться только в зависимости от ситуации оценки, будут называться частными.

Общие правила построения дерева свойств

**1. Деление по равному основанию.**

Для любой группы свойств должен быть единый для всех свойств группы признак деления.

**2. Исключительность.**

Свойства, входящие в группу, должны исключать необходимость их одновременного учета в виду того, что между показателями этих свойств есть функциональная зависимость.

**3. Корректируемость.**

Сущность этого правила заключается в том, что структура дерева должна позволять проводить корректировку (добавлять в дерево новые свойства или, наоборот, исключать некоторые свойства) в связи с изменением ситуации оценки.

**4. Учет взаимосвязей в системе «человек – среда – объект».**

В дереве свойств должны обязательно присутствовать (разумеется, с учетом ситуации оценки) показатели: экологичность, жизнеобеспеченность, безызъянность.

**5. Жесткость структуры начальных уровней дерева.**

В дереве свойств жесткая структура отдельных поддеревьев должна распространяться на максимально возможное число ярусов.

**6. Потребительская направленность формулировок свойств.**

Для каждого сложного свойства существует несколько различных признаков, с помощью которых оно может быть разделено на группу эквисатисных свойств. Из них надо выбрать те признаки, которые имеют потребительскую направленность.

**7. Функциональная направленность формулировок свойств.**

Желательно применять те признаки деления, которые отражают не конструктивную структуру оцениваемого объекта, а характер выполняемых им функций.

**8. Правильный учет субъекта оценки.**

Необходимо принимать во внимание тот уровень социальной иерархии, на котором находится субъект оценки. Наибольшее число свойств в дереве для одного и того же оцениваемого объекта будет тогда, когда субъект будет общество в целом, а наименьшее – когда субъект оценки небольшая группа потребителей или же только один человек.

**9. Необходимость и достаточность числа свойств в группе.**

В группу включаются только те свойства, которые необходимы для обеспечения эквисатисности со смежным свойством для определения этого сложного свойства.

**10. Однозначность толкования формулировок свойств.**

В дереве не должно быть нечетких, двусмысленных, неоднозначно трактуемых формулировок свойств.

**11. Эталонное число свойств $n^{эт}$.**

При сравнении двух объектов дерево свойств, предназначенное для оценки качества обоих объектов, должно состоять из эталонного числа свойств, т. е. включать в себя и все общие для обоих объектов свойства и те, по которым эти объекты отличаются друг от друга.

**12. Полнота учета особенностей потребления объекта.**

Необходимо так строить дерево, чтобы в нем нашли отражение все особенности процесса потребления объекта, выявленные на стадии определения ситуации оценки.

**13. Недопустимость зависимых свойств.**

В любой группе должны быть отставлены только независимые свойства.

**14. Одновременность существования свойств.**

Эквисатисные свойства, составляющие группу свойств, должны быть такими, чтобы оцениваемый объект в каждый момент времени мог одновременно обладать этими свойствами.

**15. Максимальная высота дерева.**

Дерево должно «ветвиться» до тех пор, пока во всех группах свойств, находящихся на последнем ярусе дерева, не останутся только квазипростые, которые уже не нужно разделять, или простые.

**16. Исключение свойств надежности.**

Свойства надежности любого объекта очень сильно влияют на качество объекта, но включать их в дерево свойств не нужно, потому что при точном или приближенном методах оценки качества все свойства надежности учитываются с помощью, так называемой функции эффекта, при упрощенном же методе – надежность учитывается с помощью коэффициента сохранения эффективности $K_{эф}$.

**17. Предпочтительность правостороннего дерева.**

Правостороннее дерево является самым удобным в практической работе, в большинстве случаев целесообразно применять именно его.

**18. Предпочтительность табличной формы дерева.**

Преимущество дерева в табличной форме заключается в экономии места, необходимого для изображения дерева.

**19. Предпочтительность признака деления меньшей размерности.**

Из двух в одинаковой степени пригодных для пользования признаков деления сначала нужно применять признак, содержащий меньшее число градаций.

Частные правила построения деревьев свойств

**1. Учет затрат и результатов.**

Сравнительно редко, в зависимости от ситуации оценки, необходимо определять в количественной форме не интегральное качество, а качество объекта. В этом случае из дерева должно быть исключено квазипростое свойство – экономичность, т. е. затраты на производство и потребление рассматриваться не будут.

**2. Ясность признака деления.**

Если по ситуации оценки установлено, что коэффициенты весомости для свойств отдельных групп (или чаще всего дерево в целом) будут определяться экспертным методом, целесообразно чтобы в каждой группе свойств признак деления был четко выражен и абсолютно ясен уже из самих формулировок свойств.

**3. Случайный характер расположения свойств.**

Целесообразно применять случайный порядок расположения свойств в группе. Это необходимо довести до сведения экспертов.

**4. Минимум свойств в группе.**

В любой группе не должно быть более семи свойств – в противном случае точность экспертной оценки резко уменьшается.

**5. Возможность оценки других объектов с помощью поддеревьев.**

В случаях, когда оценку качества объекта можно использовать для аттестации качества не только этого объекта, но и для других каких-то целей, например как составную часть другого объекта, необходимо эту часть выделить под дерево свойств.

**6. Исключение одинаково выраженных свойств.**

Из деревьев свойств исключаются все те свойства, которые в одинаковой степени выражены в сравниваемых вариантах.

**7. Неполное дерево при упрощенной методике его построения.**

Когда факторы времени и трудоемкость лимитируют и, кроме того, допустимо некоторое снижение точности полученных результатов, можно использовать упрощенную методику построения дерева свойств. При этом снижаются затраты труда как на построение дерева, так и на проведение последующих операций, предусмотренных алгоритмом.

## Задание

Используя мнение экспертов и в соответствии с правилами построения деревьев свойств, построить дерево свойств объекта.

Объект выбирается студентом самостоятельно.

В качестве экспертов выступает группа студентов в количестве 6–8 человек.

## Порядок выполнения работы

1. Выбрать объект.
2. Сформировать экспертную группу, назначить ведущего эксперта.
3. Рассмотреть объект и, используя любой метод («Мозговой атаки», простого обсуждения и т. д.), определить набор показателей на каждом уровне дерева свойств.
4. Используя знания правил построения дерева свойств, определиться с формой дерева.
5. Учитывая мнения экспертов, расположить на каждом ярусе этого дерева соответствующие свойства.

## Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1) название работы;
2) цель;
3) название применяемых методов;
4) построенное дерево;
5) вывод по работе.

## Контрольные вопросы

1. Сущность понятия «дерево свойств».
2. Что такое простое свойство?
3. Какие свойства называют квазипростыми?
4. Какие правила построения свойств относятся к общим, а какие к частным?

Литература для подготовки к выполнению и защите практического занятия: [1, с. 25–30; 3, с. 16–23; 4; 5; 9, с. 155–162; 11, с. 110–127].

# 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЕСОМОСТИ

## Краткие теоретические сведения

Наряду с абсолютным $P_j$ и относительным $K_j$ значениями, каждое простое или сложное свойство характеризуется также весомостью (значимостью) среди всех остальных свойств, а показатель качества – коэффициентом весомости, который является количественной характеристикой значимости данного показателя качества продукции среди других показателей.

В различных методиках сумма весомостей свойств одного уровня может иметь разное значение: 1, 10, 100, 18 и др., но во всех методиках выполняется условие

$$\sum_{i=1}^{n} q_i = \text{const}, \qquad (2.1)$$

где $q_i$ – коэффициент весомости.

## Методы определения коэффициентов весомости

Существуют два метода определения значений групповых коэффициентов весомости $q_i$: аналитический и экспертный.

Использование аналитического метода определения значений коэффициентов весомости, несмотря на легкость производимых в его рамках вычислений, связано с преодолением трудностей, которые заключаются в том, что отсутствует достаточно подробный алгоритм, с помощью которого для любой группы свойств можно было бы однозначно выявить тот показатель свойств, который пригоден для использования в качестве ненормированного группового коэффициента весомости. И поэтому, несмотря на то, что аналитический метод наиболее предпочтителен, на практике чаще всего применяют экспертный метод определения коэффициентов весомости.

Экспертный метод основан на усреднении оценок весомостей, данных группой экспертов.

Процедуру получения экспертных оценок весомостей можно разбить на четыре этапа:

организация опроса;

проведение опроса;

обработка результатов опроса, получение оценок весомостей;

анализ результатов.

Условия для работы экспертной группы должны быть созданы технической группой. Должно быть подготовлено помещение, изображение дерева свойств, канцелярские принадлежности и др.

Технический работник, анализируя дерево свойств, определяет количество тех свойств, групповые коэффициенты весомости которых должны быть определены экспертным путем, и готовит бланки индивидуальной анкеты.

В соответствии с расположением экспертов за столами каждый из экспертов получает номер 1, 2, 3 … $j$. Номер определяет очередность, в которой эксперты дают свои ответы.

Истинным значением определяемой экспертами величины является средняя оценка экспертной группы. Чаще всего выносимые экспертами оценки представляют собой или ранжированную последовательность или совокупность числовых значений параметров. Члены экспертной группы определяют ранг расположения показателей качества рассматриваемой продукции. Причем показателю качества, который на взгляд эксперта имеет наибольшую важность при определении количественной оценки качества, присваивают самый высокий ранг, численно равный числу показателей свойств в группе.

Значения рангов, определяемых каждым экспертом, для всех показателей качества технический работник заносит в анкету № 1 в раздел «1-й тур». Ведущий анализирует числа, записанные в анкету, с точки зрения максимальной величины расхождения между отдельными назначенными экспертами оценками. Величину расхождения мнений экспертов можно определить, используя коэффициент конкордации $W_N$ для $N$ экспертов, по формуле

$$W_N \frac{12S'}{N^2(n^3-n)}, \tag{2.2}$$

где $S'$ – сумма квадратов отклонений; $n$ – число показателей свойств в группе.

Сумма квадратов отклонений рассчитывается по формуле

$$S' = \sum_{i=1}^{n} \Delta_i^2, \tag{2.3}$$

где $\Delta_i$ – отклонение от средней суммы рангов.

Отклонение от средней суммы рангов можно подсчитать по формуле

$$\Delta_i = \sum_{j=1}^{N} a_{ij} - T_{\text{р}}, \tag{2.4}$$

где $a_{ij}$ – ранг $i$-го объекта у $j$-го эксперта; $T_{\text{р}}$ – средняя сумма рангов.

Средняя сумма рангов определяется выражением

$$T_{\text{р}} = N\left(\frac{n+1}{2}\right). \tag{2.5}$$

Если крайние значения между отдельными, назначенными экспертами

оценками отличаются друг от друга не более чем на 25 %, то опрос экспертов можно ограничить одним туром.

После получения достаточно согласованного мнения экспертов по ранжированию весомостей свойств показателей качества можно приступить к обработке результатов экспертного опроса (анкета № 1).

Для каждого помещенного в сводной анкете № 1 свойства вычисляют среднее арифметическое (по всем экспертам) значение ненормированного коэффициента весомости по результатам последнего тура:

$$\overline{q}_i' = \sum_{\gamma=1}^{N} \overline{q}_{ij}'/N, \qquad (2.6)$$

где $\overline{q}_{ij}'$ – ненормированный коэффициент весомости для $i$-го свойства у $j$-го эксперта; $N$ – число экспертов.

Для каждой группы свойств определяется сумма $A$ всех средних значений ненормированных коэффициентов весомости (с учетом всех свойств групп). Полученные числа заносят в сводную анкету (анкета № 1).

Затем произведем нормирование значений $\overline{q}_i'$, т. е. определим значения весомости для каждого свойства в группе по формуле

$$q_i = \frac{\overline{q}_i'}{A}. \qquad (2.7)$$

Правильность приведенных расчетов проверим по условию

$$\sum_{i=1}^{n} q_i = 1, \qquad (2.8)$$

где $n$ – число всех показателей.

## Задание

Используя мнения экспертов, определить коэффициенты весомости показателей качества объекта, дерево свойств которого было построено при выполнении первого задания.

Порядок выполнения задания:

1. Провести опрос экспертов, данные опроса занести в анкету № 1 (прил. А).

2. По результатам опроса рассчитать коэффициент конкордации и определить необходимость второго тура опроса.

3. По результатам окончательного тура опроса рассчитать коэффициенты весомости показателей качества объекта.

## Порядок выполнения работы

1. Выбрать объект.
2. Сформировать экспертную группу, назначить ведущего эксперта.
3. Рассмотреть объект и, используя любой метод («Мозговой атаки», простого обсуждения и т. д.), определить набор показателей на каждом уровне дерева свойств.

## Содержание отчета

Отчет должен содержать:
1) название работы;
2) цель;
3) название применяемых методов;
4) заполненную анкету № 1 с рассчитанными коэффициентами весомости;
5) выводы по работе.

## Контрольные вопросы

1. Обязательное для всех методик условие при определении коэффициентов весомостей.
2. Сущность аналитического метода определения коэффициентов весомости.
3. Сущность экспертного метода определения коэффициентов весомости.
4. Что такое коэффициент конкордации, каким образом он определяется?
5. Условие проведения одного тура экспертного опроса при определении коэффициентов весомости.

Литература для подготовки к выполнению и защите практического занятия: [4; 5; 9, с. 149–151, 144–151; 11, с. 90–108].

# 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭТАЛОННОГО И БРАКОВОЧНОГО ЗНАЧЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

## Краткие теоретические сведения

Возможны три вида соотношений между значениями ($q$, $q^{эт}$, $q^{доп}$, $q^{бр}$ и $P$, $P^{эт}$, $P^{доп}$, $P^{бр}$):

а) значение абсолютного показателя свойства $P$ ограничено браковочным значением $P^{бр}$ только снизу, поэтому такое браковочное значение обозначим через $P^{бр\ min}$.

Например, в соответствии со СНиПом сквозные проезды в зданиях следует принимать шириной не менее 3,5 м. Значит, $P^{доп}$ = 3,5 м и $P^{бр\ min}$ = 3,4 м, $P^{бр\ min}$ = 3,4 м < 3,5 м = $P^{доп} \le P \le P^{эт}$;

б) значение абсолютного показателя свойства $P$ ограничено браковочным значением только сверху ($P^{бр\ max}$):

$$P^{бр\ max} > P \ge P^{эт},$$

$$P^{бр\ max} > P^{доп} \ge P > P^{эт};$$

в) значение абсолютного показателя свойства ограничено браковочным показателем как снизу, так и сверху:

$$P^{бр\ min} < (P^{эт} \le P \le P^{эт}) < P^{бр\ max}.$$

Например, очевидно, что температура в помещении не должна быть ни слишком высокой, ни слишком низкой. Предположим, что для жилой комнаты $P$ = 20 °С, $P^{бр\ max}$ = 26 °С, $P^{бр\ min}$ = 17 °С. Тогда

$$P^{бр\ min} = 17\ °C < (20 \le P \le 20) \le 26 = P^{бр\ max}.$$

Для обеспечения функциональной и временной сопоставимости различных объектов одного и того же типа необходимо, чтобы набор браковочных и эталонных значений показателей был единым для дерева свойств объектов этого типа.

Определять браковочные и эталонные значения показателей целесообразно только для тех свойств, для которых определяются коэффициенты весомости (если коэффициенты весомости для каких-то свойств не определялись, значит, такие свойства не учитываются при оценке качества проекта).

Определение браковочных и эталонных значений показателей можно разделить на три этапа:

**1-й этап.** Члены организационной группы (ОГ) определяют $P^{бр}$ и $P^{эт}$ для тех свойств, показатели которых не имеют физических единиц измерения.

**2-й этап.** Члены ОГ документальным методом определяют $P^{бр}$ и $P^{эт}$ тех из оставшихся свойств, для которых этот метод применим, т. е. для которых существуют документальные данные, позволяющие определить значение $P^{бр}$ и $P^{эт}$.

**3-й этап.** Экспертным методом определяются браковочные и эталонные значения показателей всех оставшихся свойств.

## Определение браковочных и эталонных значений для показателей свойств, не имеющих физических единиц измерений

Члены ОГ выявляют все те свойства, которые выходят на последний ярус дерева и применительно к которым отсутствуют какие-либо неэкспертные методы определения количественных значений их показателей (ни нормативов, ни методов физических измерений). Например, эстетические свойства.

Для каждого свойства члены ОГ назначают $P^{бр} = 0$ % и $P^{эт} = 100$ %. Эти значения заносятся техническим работником в таблицу оценки объекта (или в таблицу сравнения вариантов).

Отметим, что для подавляющего большинства свойств имеется только одно браковочное значение показателя $P_i^{бр}$. Крайне редко два значения $P^{бр\ min} < P$ и $P^{бр\ max} > P$. Например, футбольное поле длиной $P^{доп\ min} = 90$ м и $P^{доп\ max} = 104$ м, значит можно принять $P^{бр\ min} = 89$ м, $P^{бр\ max} = 105$ м.

## Определение браковочных и эталонных значений документальным методом

Сущность этого метода состоит в том, что члены ОГ выявляют $P^{бр}$ и $P^{эт}$ на основе анализа различного рода документов – книг, отчетов о НИР, обзоров, проектной документации и т. д. При этом нужно обеспечить их необходимое количество.

Определение $P^{бр}$:

1. Члены ОГ просматривают все простые и квазипростые свойства дерева и выявляют те из них, для значений абсолютного показателя которых $P_i$ существуют нормы, выраженные в количественной форме. Эти нормативные значения могут быть приняты как допустимые $P^{доп}$.

Ближайшие к допустимым, но худшие по значениям принимаются членами ОГ в качестве браковочных $P^{бр}$. Эти значения заносятся в таблицу оценки объекта (проекта) или таблицу сравнения вариантов.

2. Браковочные значения показателей могут быть определены документальным методом и для свойств, которые в повседневной практике не выражаются в количественной форме (обеспеченность лифтом). Для таких свойств, каждому из видов дана квалификационная оценка, т. е. приведено значение показателя качества, выраженное в безразмерных единицах, по шкале 0-1. Возможно, что члены ОГ смогут найти и какие-то другие документальные материалы, в которых на основе квалиметрии проведена количественная оценка и каких-то других свойств.

Определение $P^{эт}$. Эталонные значения так же, как и браковочные, опре-

деляются документальным методом в двух основных направлениях поиска этих значений:

1. Члены ОГ просматривают различные доступные материалы, в которых могут содержаться документальные данные, позволяющие для некоторых свойств выявить наилучшие значения соответствующих показателей свойств (литературные источники, отчеты о НИР, обзоры, монографии, статьи и др.).

За эталонное значение $P^{эт}$ в этих случаях необходимо принимать документально подтвержденные лучшие значения показателей каждого свойства. Ошибочно принимать за эталонные значения показателей всех свойств лучшего проекта или образца, не все свойства лучшего образца могут быть отнесены к эталонным.

2. Если среди свойств, применительно к которым ищутся эталонные значения показателей, имеются квалиметризованные свойства, то эти значения могут быть определены на основе тех же материалов, по которым определялись допустимые, а затем и браковочные значения. Только в качестве эталонных берутся лучшие значения.

Если же для каких-то свойств ни одним из описанных выше способов определить $P^{бр}$ и $P^{эт}$ не возможно, то эти значения должны определяться экспертным методом.

## Определение браковочных и эталонных значений показателей экспертным методом

Значения $P^{бр}$ и $P^{эт}$ определяются совместно в ходе одной и той же процедуры. Причем, строго говоря, экспертным методом определяются не браковочные значения, а только соответствующие им допустимые $P^{доп}$. Значения $P^{бр}$ назначаются техническим работником как ближайшие к допустимым, но худшего значения.

Экспертный метод должен использоваться только тогда, когда другие, неэкспертные, методы или вообще неприемлемы, или их применение нецелесообразно из-за слишком больших в конкретной ситуации оценки затрат труда и времени по сравнению с экспертным методом.

До начала экспертного опроса силами технической группы (ТГ) подготавливаются следующие документы:

индивидуальные анкеты для определения $P^{бр}$ и $P^{эт}$. Эти документы подготавливаются на всю численность экспертной группы (ЭГ) (одна запасная для случая, если кто-то из членов ОГ также примет участие в опросе в качестве эксперта);

сводная анкета для определения $P^{бр}$ и $P^{эт}$ (только в одном экземпляре).

При этом всем членам ЭГ выдается дерево свойств. Значения $P^{бр}$ и $P^{эт}$ определяются только для тех свойств, которые выходят на самый высокий ярус дерева.

Экспертный опрос проводится по каждому свойству в отдельности, но одновременно для величин $P^{доп}$ и $P^{эт}$ в той же ЭГ, которая определяла значения коэффициентов весомости. Обычно после определения коэффициента весомости устраивается перерыв, во время которого раздается вторая анкета.

Перед началом опроса ведущий разъясняет членам ЭГ, что индивидуально определенное ими значение $P^{доп}$ и $P^{эт}$ должно основываться на учете нижеследующего соображения. Эксперт назначает для каждого свойства такое предельно допустимое значение показателя $P^{доп}$, хуже которого, по мнению эксперта, оно ни при каких условиях, соответствующих ситуации оценки, допущено быть не может.

Кроме того, ведущий должен напомнить экспертам, что величина $P^{доп}$ для некоторых свойств может быть единственной, только большей или меньшей по сравнению со значением абсолютного показателя свойств $P$. Но для ряда свойств, обычно немногочисленных, на последнем ярусе дерева $P^{доп}$ может быть не одно, а два $P^{доп\ min}$ и $P^{доп\ max}$ по сравнению с абсолютным значением $P$.

Что касается $P^{эт}$, эксперт должен назначить такое эталонное значение, которое, с его точки зрения, могло быть самым лучшим в отечественной и мировой практике (иногда это только предположение эксперта, т. е. каким $P^{эт}$ могло бы быть).

Эксперты определяют $P^{доп}$ и $P^{эт}$ независимо друг от друга. Если расхождения между ответами экспертов превышают 25 %, ведущий устраивает краткое обсуждение и назначает после этого второй тур опроса.

Назначенные экспертами значения $P^{доп}$ и $P^{эт}$ заносятся не только в индивидуальную анкету, но и в сводную. Это делает технический работник, который вычисляет среднее по всем экспертам допустимое значение по формуле

$$P^{доп} = \frac{\sum_{к=1}^{r} P_к^{доп}}{r}, \qquad (3.1)$$

где $r$ – число экспертов.

Затем технический работник определяет $P^{бр}$ как ближайшее к допустимому, но худшее значение показателя свойства.

Находится эталонное значение:

$$P^{эт} = \frac{\sum_{к=1}^{r} P_к^{эт}}{r}. \qquad (3.2)$$

Определенные $P^{бр}$ и $P^{эт}$ заносят в соответствующие графы таблицы оценки качества или таблицы сравнения вариантов.

## Задание

Определить эталонные и браковочные значения показателей свойств объекта, используя экспертный метод, в том случае, если нельзя применить неэкспертный метод. В качестве исходных данных при выборе эталонных и браковочных значений показателей использовать стандартные значения показателей выбранного студентом объекта.

## Порядок выполнения работы

1. Дать обоснования необходимости выбора соответствующего метода (экспертного или неэкспертного).

2. Из стандарта на продукцию (выбранный ранее объект) определить значение показателей свойств, находящихся на последнем уровне дерева свойств.

3. Провести опрос экспертов и, если это необходимо, обсуждение их мнений (ведущий выбран на первом занятии).

4. Занести в таблицу (форма произвольная) значения показателей свойств последнего уровня – стандартные и допустимые.

5. Дать обоснование выбранным допустимым значениям $P_{max}$ и $P_{min}$.

6. Назначить браковочные значения $P^{бр}_{max}$ и $P^{бр}_{min}$.

7. Дать обоснование выбранным эталонным значениям и ввести их в таблицу.

8. Охарактеризовать выбранный эталон.

## Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1) название работы;

2) цель;

3) краткие обоснования по выбору показателей;

4) таблицу с выбранными показателями ($P_{i\ стандартное}$; $P_{i\ max}$; $P_{i\ min}$; $P^{бр}_{max}$; $P^{бр}_{min}$; $P^{эталон}_{min}$);

5) выводы по работе.

## Контрольные вопросы

1. Что принимается за эталон при определении относительного показателя качества?

2. Как определяются браковочные значения показателей качества?

3. Методы определения эталонных и браковочных показателей.

4. Виды эталонов качества.

Литература для подготовки к выполнению и защите практического занятия: [1, с. 30–49; 4; 5; 10, с. 144–146, 149–156, 162–184; 11, с. 53–90].

# 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА

## Краткие теоретические сведения

### Методы расчета комплексной оценки качества

Комплексный показатель характеризует совокупность взаимосвязанных свойств, образующих качество продукции. Комплексные показатели качества могут быть связаны с единичными через функциональные зависимости, отражающие объективные законы природы, и могут быть выражены через комбинацию единичных показателей.

В качестве комплексных показателей применяются главные, интегральные и средневзвешенные.

Из средневзвешенных чаще всего в методиках определения комплексной оценки применяют: среднюю арифметическую, среднюю геометрическую и среднюю гармоническую взвешенные.

Средняя арифметическая взвешенная

$$K = \sum_{i=1}^{n} q_i k_i \,. \qquad (4.1)$$

где $K$ – комплексный показатель качества; $k_i$ – единичный относительный показатель качества; $q_i$ – коэффициент весомости.

Средняя геометрическая взвешенная

$$K = \Pi K_i^{q_i} \,. \qquad (4.2)$$

Средняя гармоническая взвешенная

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{n} q_i}{\sum_{i=1}^{n} \frac{q_i}{K_i}} \,. \qquad (4.3)$$

## Задание

*Задача 1*. Качество трех машин определяется тремя свойствами:

производительностью $P'_{\text{п}}$;

долговечностью $P'_{\text{д}}$;

удобством управления $P'_{\text{у}}$.

Индекс $i$ обозначает номер изделия ($i$ = l, 2, 3), индекс «э» при дальнейшем изложении – эталонное изделие.

$P_{п}^{1}$ = 40 шт./ч; $P_{д}^{1}$ = 13000 ч; $P_{у}^{1}$ = 4 балла;

$P_{п}^{2}$ = 140 шт./ч; $P_{д}^{2}$ = 5000 ч; $P_{у}^{2}$ = 8 баллов;

$P_{п}^{3}$ = 110 шт./ч; $P_{д}^{3}$ = 16000 ч; $P_{у}^{3}$ = 9 баллов;

$P_{п}^{э}$ = 150 шт./ч; $P_{д}^{э}$ = 14000 ч; $P_{у}^{э}$ = 10 баллов.

Весомости показателей, определенные экспертным методом, равны соответственно: $q_{п}$ = 0,5; $q_{д}$ = 0,4; $q_{у}$ = 0,l.

Необходимо определить комплексную оценку качества трех машин методом средневзвешенных – арифметической, геометрической и гармонической:

а) без учета коэффициентов весомости;

б) с учетом коэффициентов весомости.

Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

*Задача 2*. Показатели качества вольтметров приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Показатели качества вольтметров

| Прибор | Единичные показатели качества | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Класс точности ($P_i$, %) | Нижний предел измерений ($P_2$, мВ) | Диапазон температур ($P_3$, °С) | Масса ($P_4$, кг) | Устойчивость к механическим воздействиям ($P_5$) |
| $B_1$ | 1,5 | 1,0 | –40–60 | 0,3 | ВП, УП (0,75) |
| $B_2$ | 1,5 | 1,5 | –30–50 | 0,15 | ВУ, УУ (1,0) |
| $B_3$ | 1,0 | 2,0 | –30–60 | 0,25 | ВП, УП (0,75) |
| $B_4$ | 1,0 | 3,0 | –30–60 | 0,22 | ВУ, УУ (1,0) |
| Базовый показатель | 1,0 | 1,0 | –40–60 | 0,15 | ВУ, УУ (1,0) |
| Весовые коэффициенты | 0,3 | 0,15 | 0,2 | 0,1 | 0,25 |

Примечание: ВП – вибропрочный; УП – ударопрочный; ВУ – виброустойчивый; УУ – удароустойчивый.

### Задание

Необходимо определить комплексные показатели качества четырех вольтметров по принципу среднего арифметического:

а) без учета весовых коэффициентов;

б) с учетом весовых коэффициентов.

Проанализировать результаты и сделать выводы.

## Порядок выполнения работы

1. Определить комплексную оценку качества трех машин методом средневзвешенных – арифметической, геометрической и гармонической:

а) без учета коэффициентов весомости;

б) с учетом коэффициентов весомости.

2. Определить комплексные показатели качества четырех вольтметров по принципу среднего арифметического:

а) без учета весовых коэффициентов;

б) с учетом весовых коэффициентов.

3. Проанализировать результаты и сделать выводы.

## Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1) название работы;

2) цель;

3) исходные данные;

4) расчетные формулы и результаты расчета;

5) выводы.

## Контрольные вопросы

1. Расчетные формулы определения среднеарифметической, среднегеометрической, среднегармонической комплексных оценок качества с учетом коэффициентов весомости отдельных свойств.

2. Преобразование расчетных формул по определению средневзвешенных комплексных оценок качества без учета коэффициентов весомости отдельных свойств.

Литература для подготовки к выполнению и защите практического занятия: [1, с. 49–80, 144–151; 3, с. 23–38; 4; 5; 10, с. 143–144; 11, с. 15–23, 226–270].

# 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОГЛАСОВАННОСТИ РАБОТЫ ГРУППЫ ЭКСПЕРТОВ

Теоретические сведения по данной теме приведены в разд. 2.

Согласованность работы группы экспертов определяется коэффициентом конкордации (2.2).

## Задание

Определить степень согласованности мнения экспертов, чьи результаты ранжирования объектов приведены в табл. 5.1, табл. 5.2, табл. 5.3, табл. 5.4 и табл. 5.5.

Таблица 5.1

Данные мнений пяти экспертов

| Номер объекта | Оценка эксперта | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1-й | 2-й | 3-й | 4-й | 5-й |
| 1 | 4 | 6 | 4 | 4 | 3 |
| 2 | 3 | 3 | 2 | 3 | 4 |
| 3 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| 4 | 6 | 5 | 6 | 5 | 6 |
| 5 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 |
| 6 | 5 | 4 | 5 | 6 | 5 |
| 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |

Таблица 5.2

Данные мнений семи экспертов

| Номер объекта | Оценка эксперта | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1-й | 2-й | 3-й | 4-й | 5-й | 6-й | 7-й |
| 1 | 9 | 8 | 8 | 7 | 9 | 9 | 9 |
| 2 | 7 | 7 | 5 | 6 | 7 | 7 | 8 |
| 3 | 4 | 6 | 7 | 5 | 6 | 4 | 7 |
| 4 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | 5 | 9 | 9 | 9 | 8 | 8 | 7 |
| 6 | 8 | 4 | 6 | 3 | 5 | 3 | 6 |
| 7 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 8 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 5 | 3 |
| 9 | 6 | 5 | 4 | 8 | 4 | 6 | 5 |

Таблица 5.3

Данные мнений семи экспертов

| Номер объекта | Оценка эксперта | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1-й | 2-й | 3-й | 4-й | 5-й | 6-й | 7-й |
| 1 | 5 | 5 | 7 | 5 | 7 | 7 | 7 |
| 2 | 6 | 6 | 5 | 6 | 5 | 5 | 6 |
| 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | 4 |
| 4 | 4 | 2 | 3 | 2 | 3 | 4 | 1 |
| 5 | 7 | 1 | 4 | 7 | 4 | 6 | 5 |
| 6 | 1 | 4 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 7 | 2 | 7 | 6 | 4 | 6 | 3 | 3 |

Таблица 5.4

Данные мнений семи экспертов

| Номер объекта | Оценка эксперта | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1-й | 2-й | 3-й | 4-й | 5-й | 6-й | 7-й |
| 1 | 5 | 5 | 7 | 5 | 7 | 7 | 7 |
| 2 | 6 | 6 | 5 | 6 | 5 | 5 | 6 |
| 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2 | 4 |
| 4 | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 | 4 | 1 |
| 5 | 7 | 7 | 4 | 7 | 5 | 6 | 5 |
| 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 7 | 2 | 3 | 6 | 4 | 5 | 3 | 3 |

Таблица 5.5

Данные мнений семи экспертов

| Номер объекта | Оценка эксперта | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1-й | 2-й | 3-й | 4-й | 5-й | 6-й | 7-й |
| 1 | 7 | 8 | 8 | 7 | 8 | 6 | 7 |
| 2 | 8 | 7 | 7 | 8 | 6 | 8 | 8 |
| 3 | 6 | 6 | 5 | 6 | 7 | 7 | 6 |
| 4 | 5 | 5 | 6 | 5 | 4 | 4 | 3 |
| 5 | 3 | 4 | 3 | 4 | 5 | 5 | 5 |
| 6 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 3 |
| 7 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 2 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 |

## Порядок выполнения работы

1. Решить три задачи по указанию преподавателя.
2. Подобрать соответствующую расчетную формулу.
3. Рассчитать коэффициент конкордации.

## Содержание отчета

Отчет должен содержать:
1) название работы;
2) цель;
3) исходные данные (таблицы);
4) расчетные формулы;
5) расчет коэффициентов;
6) выводы.

## Контрольные вопросы

1. Расчетные формулы определения коэффициента конкордации.
2. Сущность понятия коэффициент конкордации.
3. Условие, при котором работа экспертов считается достаточно согласованной.
4. Значение коэффициента конкордации при условиях полной согласованности и полного разногласия среди группы экспертов.

Литература для подготовки к выполнению и защите практического занятия: [4; 5; 9, с. 149–151, 144–151; 11, с. 90–108].

# 6. АНАЛИЗ ВЕЛИЧИНЫ ПОТЕРЬ

## Краткие теоретические сведения

Для анализа результатов контроля качества широкое распространение получили методы статистического контроля качества. Наиболее известными среди них стали «семь инструментов контроля качества», в состав входит и диаграмма Парето.

### Диаграмма Парето

Диаграмма Парето, названная так по имени ее автора, итальянского ученого-экономиста Парето, позволяет наглядно представить величину потерь в зависимости от различных дефектов. С помощью диаграммы Парето выявляют также основные причины успехов и широко пропагандируют эффективные методы работы.

Диаграмма строится в виде столбчатого графика по величине потерь либо по их стоимости, начиная с самого большого по высоте столбика и далее в порядке уменьшения его высоты. Незначительные по величине потери объединяют в общую группу «Прочие» и этот столбик на графике располагают последним.

Предпочтительнее, если это возможно, определять не количество дефектов, а стоимость потерь от них в денежном выражении.

Построение диаграммы сопровождается построением ломаной кумулятивной кривой, на которой суммируются потери, и на последнем столбике, если все работы по подсчету потерь были выполнены верно, эта кривая должна выйти на отметку 100 %.

Если окажется, что столбик «Прочие» будет по величине выше любого из столбиков *A*, *B*, *C*, расположенных на трех первых позициях, необходимо из этой группы дефектов выделить наиболее крупный по количеству или стоимости дефект в отдельную группу. Тогда на графике дополнительно появится еще один столбик, а высота столбика «Прочие» при этом уменьшится.

При использовании диаграммы Парето для контроля важнейших факторов наиболее распространенным методом анализа является так называемый *ABC*-анализ.

Факторы (по эффективности их воздействия на объект в целом), оказавшиеся на позициях *A*, *B* и *C*, должны подвергаться анализу в первую очередь.

После выяснения причин и устранения дефектов вновь строится диаграмма Парето с целью проверки эффективности принятых в отношении дефектов *A*, *B* и *C* мер.

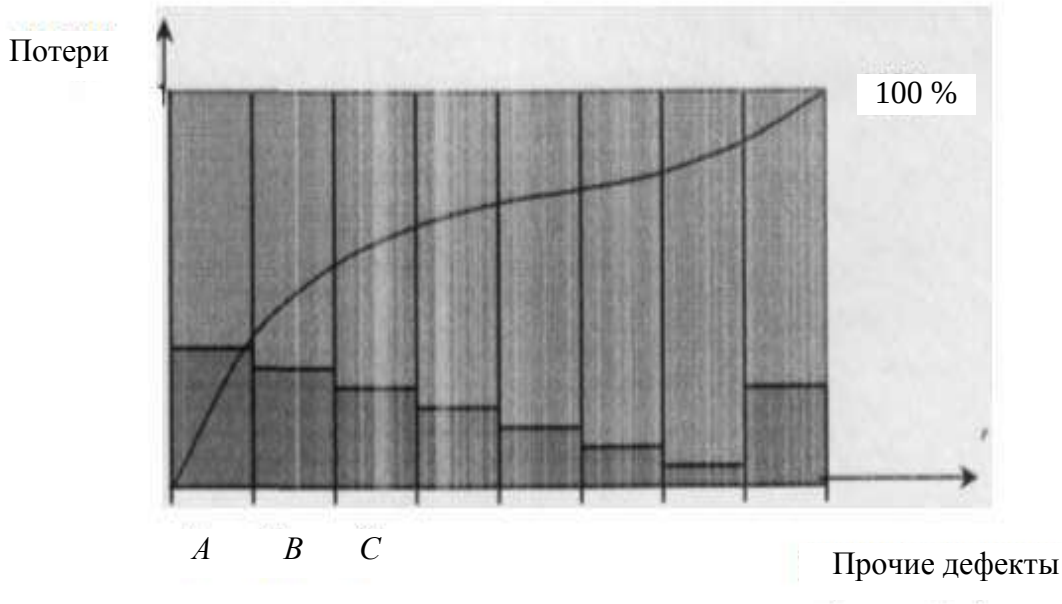



Рис. 6.1. Диаграмма Парето

В случае, если какой либо дефект по эффективности находится в конце диаграммы, но устранение его не требует больших затрат ни материальных, ни временных, то такой дефект должен быть устранен до начала работ по анализу и устранению причин возникновения дефектов *A*, *B* и *C*.

Для выяснения причин дефектов *A*, *B*, *C* целесообразно дополнительно использовать причинно-следственную диаграмму.

## Задание

Выполнить все необходимые работы по расчетам (с построением дополнительных таблиц, если это необходимо), в соответствии с заданием и указаниями, приведенными ниже задача 1–3.

*Задача 1.* Служба качества предприятия собрала месячные данные по браку кровельных листов. Данные по браку приведены в табл. 6.1.

По данным табл. 6.1 построить диаграмму Парето, произвести анализ диаграммы и анализ каждой из первых трех операций (группа А).

*Задача 2.* При контроле производства дисковых пил были получены данные о величине потерь от брака по каждой операции. Данные о браке приведены в табл. 6.2. Используя данные таблицы, необходимо построить диаграмму Парето и проанализировать ее.

Таблица 6.1

Данные о браке в производстве кровельных листов

| № п/п | Вид брака и количество некачественных изделий | Количество дефектных изделий | Потери от брака в денежном выражении (тыс. руб.) | Потери от брака в процентном выражении (%) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Боковые трещины | 140 | 5,4 | |
| 2 | Шелушение краски | 3400 | 3,7 | |
| 3 | Коробление | 900 | 62,0 | |
| 4 | Отклонение от перпендикулярности | 320 | 20,0 | |
| 5 | Грязная поверхность | 1320 | 4,5 | |
| 6 | Винтообразность | 1250 | 8,5 | |
| 7 | Трещины по поверхности | 820 | 10,0 | |
| 8 | Боковой изгиб | 420 | 30,0 | |
| 9 | Прочие причины | 600 | 10,2 | |
| | Итого | | | |

Таблица 6.2

Данные о браке в производстве дисковых пил

| № п/п | Наименование операции | Количество бракованных деталей (шт.) | Потери от брака (руб.) | Потери от брака (%) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Вырубка круга по ∅305 | | | |
| 2 | Вырубка отверстия ∅38 | | | |
| 3 | Расточка отверстия ∅40 Н7 в пакете | 10 | 290 | |
| 4 | Обточка в пакете по ∅300 | 12 | 350 | |
| 5 | Вырубка стружечных канавок | 60 | 1980 | |
| 6 | Правка корпусов фрез от коробления | 30 | 1200 | |
| 7 | Пайка твердосплавных пластин | 70 | 2400 | |
| 8 | Шлифование по наружному диаметру «чисто» | 5 | 410 | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 9 | Шлифование по боковым сторонам зубьев «чисто» | 2 | 168 |
| 10 | Заточка по передней поверхности $\gamma = 15°$ | 3 | 258 |
| 11 | Заточка по задней поверхности $\alpha = 15°$ | 10 | 900 |
| 12 | Заточка по боковым сторонам $\varphi = 15°$ | 8 | 720 |
| 13 | Маркировка | – | – |
| 14 | Упаковка и консервация | 2 | 184 |
| 15 | Прочие потери | – | 605 |
| | Итого | | |

*Задача 3.* Необходимо проанализировать данные табл. 6.3 и составить различные диаграммы Парето.

Таблица 6.3

Данные о браке

| Рабочий | Станок | Понедельник | Вторник | Среда | Четверг | Пятница |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **A** | 1 | • • • •<br>* *<br>oooo<br>##<br>Δ | • • • • •<br>*<br>ooo<br>#<br>– | • • • • •<br>* ** **<br>OOOO<br>##<br>Δ | • • • •<br>*<br>OOO<br>##<br>– | • • • • •<br>*<br>OOOO<br>###<br>– |
| | 2 | • •<br>*<br>O<br>–<br>– | • • •<br>* *<br>oo<br>–<br>Δ | • • •<br>* ** **<br>oo<br>#<br>– | • •<br>*<br>o<br>#<br>– | • •<br>* *<br>o<br>#<br>– |
| **B** | 3 | • •<br>* *<br>o<br>#<br>– | • • • •<br>*<br>o<br>–<br>– | • • •<br>* ** **<br>O<br>#<br>– | • • •<br>*<br>o<br>#<br>Δ | • • • •<br>*<br>oo<br>#<br>– |
| | 4 | • •<br>*<br>oo<br>–<br>Δ | • • •<br>*<br>o<br>#<br>– | • • •<br>* ** *<br>oo<br>#<br>– | • • •<br>*<br>–<br>#<br>– | • •<br>* *<br>oo<br>#<br>– |

## Порядок выполнения работы

1. Решить две задачи по указанию преподавателя.
2. Определить, какой фактор следует рассматривать.
3. Построить вспомогательные таблицы.
4. Построить диаграмму Парето, нанеся на нее кумулятивную кривую.
5. В случае построения диаграммы по причинам, а не по результатам, необходимо построить, как минимум, пять диаграмм.
6. Сделать вывод.

## Содержание отчета

Отчет должен содержать:
1) название работы;
2) цель;
3) исходные данные (таблица);
4) вспомогательные таблицы;
5) диаграммы Парето;
6) выводы по диаграммам.

## Контрольные вопросы

1. Сущность диаграммы Парето.
2. Последовательность построения диаграммы Парето.
3. Что такое кумулятивная кривая?
4. Сущность *ABC*-анализа при построении диаграмм Парето.
5. Цель построения диаграмм Парето.
6. Виды диаграмм Парето.

Литература для подготовки к выполнению и защите практического занятия: [1, с. 123–130; 3, с. 48–16; 4; 5].

# 7. ПОСТРОЕНИЕ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ ДИАГРАММ

## Краткие теоретические сведения

В состав «семи инструментов контроля качества» входит причинно-следственная диаграмма, применяющаяся, как правило, при анализе дефектов, приводящих к наибольшим потерям.

Она позволяет выявить причины таких дефектов и сосредоточиться на устранении этих причин. При этом анализируются четыре основных причинных фактора: человек, машина (оборудование), материал и метод работ.

**Причинно-следственная диаграмма Исикавы.** При анализе причинных факторов, вызывающих появление дефектов, выявляются вторичные, а может быть, и третичные причины, приводящие к дефектам и подлежащие устранению. Поэтому для анализа дефектов построения диаграммы необходимо определить максимальное число причин, которые могут иметь отношение к допущенным дефектам.

Такую диаграмму в виде рыбьего скелета предложил японский ученый К. Исикава. Ее называют также «ветвистой схемой характерных факторов», или диаграммой «четыре М» (man, method, material, machine) (рис. 7.1).

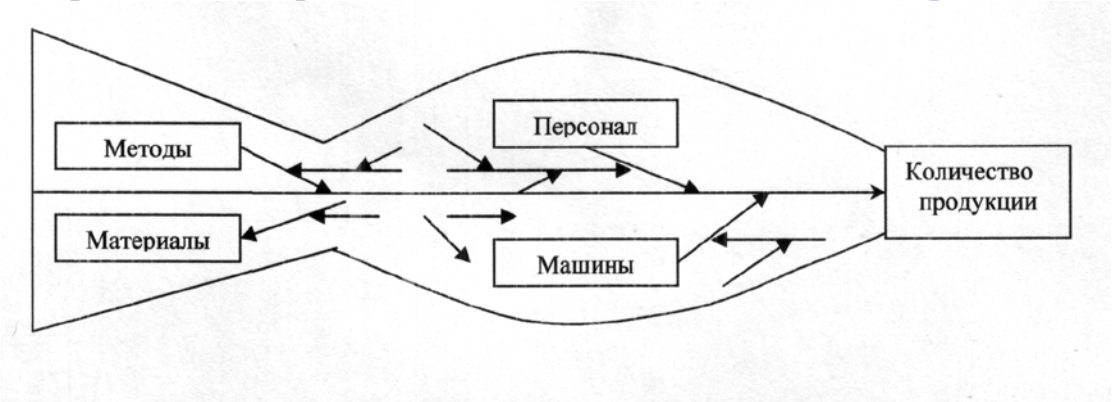



Рис. 7.1. Причинно-следственная диаграмма

Качество – это, по определению Исикавы, хребет рыбьего скелета, а причины, определяющие и влияющие на качество, которые, в свою очередь, являются следствием других причин, – это крупные кости, средние кости, мелкие кости.

## Задание и порядок выполнения работы

Выполнить построение причинно-следственных диаграмм в соответствии с заданием и указаниями, приведенными в задачах 1–3.

*Задача 1.* По мнению специалистов, существенные проблемы с качеством выпускаемой продукции возникают на предприятии по причине «текучести» кадров. По отчетным данным, с предприятия за год было уволено 50 человек.

Данные об увольнении по кварталам, подразделениям предприятия и причины увольнения и представлены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Данные об увольнении

| Причина увольнения | Подразделение | Квартал года | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 1-й | 2-й | 3-й | 4-й |
| По собственному желанию | Цех 1 | 2 | 1 | 3 | 2 |
| | Цех 2 | 4 | 2 | 5 | 2 |
| | Администрация | 1 | 1 | 4 | 2 |
| По решению руководства | Цех 1 | 1 | 0 | 2 | 1 |
| | Цех 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| | Администрация | 0 | 1 | 0 | 1 |
| По уходу за ребенком | Цех 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| | Цех 2 | 0 | 0 | 2 | 1 |
| | Администрация | 1 | 0 | 1 | 0 |

- Построить все возможные диаграммы Парето, предварительно составив вспомогательные таблицы;
- По полученным данным выявить основные проблемы;
- С помощью диаграммы Исикавы установить возможные причины возникновения основной проблемы;
- Определить виды и место сбора информации для установления проблемы.

*Задача 2.* Построить диаграмму причин (диаграмму Исикавы) и результатов для следующих показателей качества:

а) сдача студентом сессии в срок;

б) сдача студентом сессии без троек;

в) выполнение учебного плана семестра к сессии;

г) качество обучения в вузе.

*Задача 3.* Построить диаграммы Исикавы для следующих показателей:

а) качество технологических процессов;

б) качество конструкторской разработки;

в) качество материально-технического снабжения;

г) качество производства продукции;

д) качество продукции.

## Содержание отчета

Отчет должен содержать:
1) название работы;
2) цель;
3) исходные данные (таблица);
4) вспомогательные таблицы;
5) диаграммы Парето, Исикавы;
6) выводы по диаграммам.

## Контрольные вопросы

1. Сущность и история появления причинно-следственных диаграмм.
2. Цель построения причинно-следственных диаграмм.
3. Правила построения причинно-следственных диаграмм.
4. Какие методы применяются при построении причинно-следственных диаграмм?

Литература для подготовки к выполнению и защите практического занятия: [1, с. 123–130; 3, с. 48–16; 4; 5].

# 8. ПОСТРОЕНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ

## Краткие теоретические сведения

Контрольная карта – это разновидность графика, который отличается наличием контрольных границ, обозначающих допустимый диапазон разброса характеристик в обычных условиях течения процесса. Выход характеристик за пределы контрольных границ означает нарушение стабильности процесса и требует проведения анализа причин и принятия соответствующих мер.

Контрольная карта – это один из «семи инструментов контроля качества», позволяющий управлять качеством посредством статистических методов.

Контрольные карты были предложены Уолтером Шухартом в 1931 году в книге «Экономный контроль качества промышленной продукции».

Существует масса всевозможных карт, остановимся на двух главных типах:

1. Контрольные карты для количественных переменных (факторов), отражающих конкретные измерения характеристик процесса (температура, размер, вес и т. п.). Типы этих карт – ($\overline{X}$–*R*)-карты; *M*$\overline{X}$–*MR*-карты; (*X*–*MR*)-карты; ($\overline{X}$–*S*)-карты.

2. Контрольные карты для качественных переменных (признаков), отражающих общее измерение всего процесса (число рекламаций на заказ, число заказов в единицу времени, частота прогулов и т. п.).

Типы этих карт – *p*-карты; *np*-карты; *c*-карты; *u*-карты.

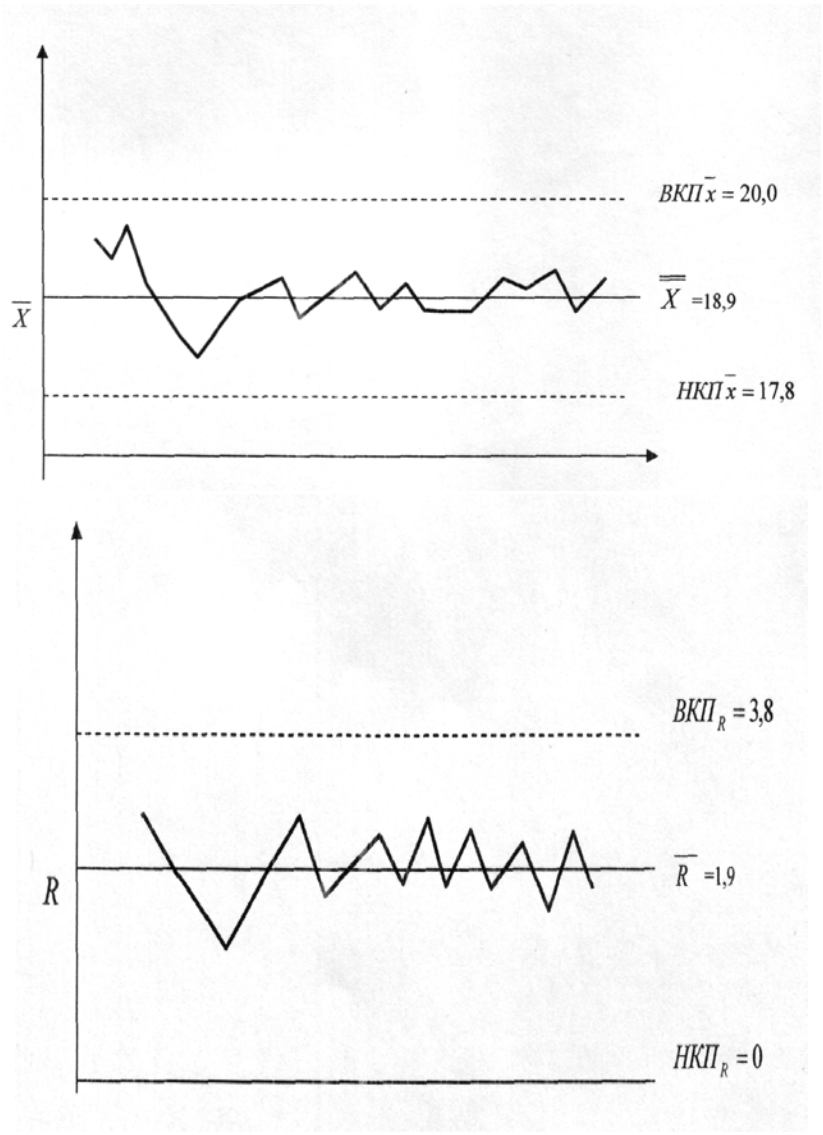



Рис. 8.1. Контрольная $\overline{X}$ –*R*-карта

**Контрольные $\overline{X}$ –*R*-карты**

Обозначения для $\overline{X}$ –*R*-карт:

*n* – объем выборки;

*X* – показания (данные);

$\overline{X}$ – среднее показание в выборке;

$\overline{\overline{X}}$ – среднее всех средних $\overline{X}$. Это положение центральной линии на $\overline{X}$-карте;

*R* – размах (разность между наибольшим и наименьшим значениями каждой выборки);

$\overline{R}$ – среднее всех *R*. Это положение центральной линии на *R*-карте;

ВКП – верхний контрольный предел;

НКП – нижний контрольный предел;

На рис. 8.1 показана типичная контрольная $\overline{X}$ –*R*-карта.

**Этапы построения $\overline{X}$ –*R*-карт**

1. Определить объем выборки *n,* равный 3, 4 или 5 или частоту отбора.

2. Собрать от 20 до 25 таких наборов данных во времени последовательных выборок (содержащих от 60 до 100 отдельных точек).

3. Вычислить среднее для каждой выборки, равное $\overline{X}$.

4. Вычислить размах для каждой выборки *R.*

5. Вычислить $\overline{\overline{X}}$ (среднее всех средних $\overline{X}$).

6. Вычислить $\overline{R}$ (среднее всех размахов).

7. Вычислить контрольные пределы.

*X*-карты: $\text{ВКП}_{\overline{X}} = \overline{\overline{X}} + A_2\overline{R}$; (8.1)

$\text{НКП}_{\overline{X}} = \overline{\overline{X}} - A_2\overline{R}$. (8.2)

*R*-карты: $\text{ВКП}_R = Д_4\overline{R}$; (8.3)

$\text{НКП}_R = Д_3\overline{R}$. (8.4)

Значения множителей определяют из табл. 8.1.

Таблица 8.1

Таблица множителей

| *n* | $A_2$ | $Д_3$ | $Д_4$ | $d_2$ |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 1,88 | 0 | 3,27 | 1,13 |
| 3 | 1,02 | 0 | 2,57 | 1,69 |
| 4 | 0,73 | 0 | 2,28 | 2,06 |
| 5 | 0,58 | 0 | 2,11 | 2,33 |
| 6 | 0,48 | 0 | 2,00 | 2,53 |

8. Нанести данные на карту и интерпретировать ее с точки зрения наличия или отсутствия особых или неслучайных причин вариации.

**Основные правила интерпретации контрольной карты**

1. Особые точки – любые точки выше верхнего или нижнего пределов.

2. Серия – семь или больше последовательных точек над или под центральной линией.

3. 1 из 20 – это более, чем одна точка в двадцати последовательных точках, близких к контрольным пределам (во внутренней трети поля допуска).

4. Тренд (дрейф) – любое систематическое повышение или понижение пяти или более последовательных точек или сдвиги семи или более точек.

**Неуправляемость**

Если некоторый процесс «вышел из-под контроля» (стал неуправляемым), значит на картах либо средних, либо размахов, либо на обеих одновременно отражены особые причины вариации. Их надо найти и исключить для достижения управляемости процесса. Его неуправляемость определяется на контрольной карте либо по наличию точек за контрольными пределами, либо по обычным структурам вариабельности.

## Задание и порядок выполнения работы

Необходимо построить контрольные $\overline{X}$ –$R$-карты с учетом рекомендаций по построению контрольных карт, изложенных выше, и в соответствии с условиями и указаниями задач 1 и 2.

*Задача 1*. Данные результатов измерения некоторого фактора представлены в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Данные для контрольной карты $\overline{X}$ –$R$

| Выборка | Измерения | | | | | Выборочное среднее $\overline{X}$ | Выборочный размер $R$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1-е | 2-е | 3-е | 4-е | 5-е | | |
| 1 | 12 | 12 | 13 | 15 | 12 | 12,8 | 3 |
| 2 | 15 | 17 | 16 | 17 | 18 | 16,6 | 3 |
| 3 | 13 | 18 | 14 | 14 | 15 | 14,8 | 5 |
| 4 | 10 | 12 | 11 | 10 | 11 | 10,8 | 2 |
| 5 | 13 | 16 | 14 | 15 | 14 | 14,4 | 3 |
| 6 | 15 | 12 | 13 | 15 | 11 | 13,2 | 4 |
| 7 | 15 | 16 | 15 | 16 | 15 | 15,4 | 1 |
| 8 | 15 | 17 | 16 | 14 | 12 | 14,8 | 5 |
| 9 | 22 | 17 | 15 | 17 | 14 | 17,0 | 8 |
| 10 | 16 | 15 | 17 | 15 | 18 | 16,2 | 3 |
| 11 | 16 | 18 | 16 | 16 | 16 | 16,4 | 2 |
| 12 | 15 | 16 | 17 | 17 | 14 | 15,8 | 3 |
| 13 | 17 | 15 | 16 | 15 | 16 | 15,8 | 2 |
| 14 | 16 | 15 | 18 | 18 | 16 | 16,6 | 3 |
| 15 | 17 | 19 | 17 | 15 | 17 | 17,0 | 4 |

Окончание табл. 8.2

| Выборка | Измерения | | | | | Выборочное среднее $\overline{X}$ | Выборочный размер $R$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1-е | 2-е | 3-е | 4-е | 5-е | | |
| 16 | 19 | 17 | 15 | 15 | 17 | 16,6 | 4 |
| 17 | 16 | 19 | 16 | 15 | 14 | 16,0 | 5 |
| 18 | 16 | 15 | 17 | 16 | 18 | 16,4 | 3 |
| 19 | 17 | 13 | 17 | 15 | 11 | 15,2 | 4 |
| 20 | 19 | 18 | 17 | 15 | 16 | 17,0 | 4 |
| 21 | 14 | 17 | 16 | 14 | 13 | 14,8 | 4 |

По результатам, приведенным в табл. 8.2, построить контрольную карту $\overline{X}$ –$R$, для этого необходимо:

1. Вычислить среднее для каждой выборки $\overline{X}$.

2. Вычислить размах для каждой выборки $R$.

3. Вычислить $\overline{\overline{X}}$ – среднее всех средних $\overline{X}$. Это центральная линия $\overline{X}$ -карты.

4. Вычислить $\overline{R}$ – среднее всех размахов $R$. Это центральная линия $R$-карты.

5. Вычислить контрольные пределы $\overline{X}$ -карты и $R$-карты.

Для определения пределов необходимо воспользоваться данными, приведенными в табл. 8.1.

6. Нанести данные на карту (форма карты представлена на рис. 8.2) и интерпретировать ее с точки зрения наличия или отсутствия особых или неслучайных причин вариации.

*Задача 2.* Построить контрольную $\overline{X}$ –$R$-карту по результатам измерений, приведенных в табл. 8.3.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Карта № 1 | |
| Название продукта | | | | | | | Выпускающий отдел | | | | | | | | | | | | | | | | | | Оператор: | |
| Фактор | | | | | | | Пределы допуска НКП= ; ВКП= | | | | | | | | | | | | | | | | | | Единицы измерения: | |
| Среднее | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | $ВКП_{\bar{X}} =$ | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | $\bar{\bar{X}} =$ | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | $НКП_{\bar{X}} =$ | | | | | |
| Размах | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | $ВКП_{\bar{R}} =$ | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | $\bar{R} =$ | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | $НКП_{\bar{R}} = 0$ | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | |
| Дата начала | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Время | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Измерение в выборках | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Всего | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Среднее $\bar{X}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Размах $R$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Рис. 8.2. $\bar{X}$ и $\bar{R}$ контрольная карта для фактора

Таблица 8.3

Таблица данных для $\overline{X}$ –$R$-карты

| Номер подгруппы | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ | $\sum X$ | $\overline{X}$ | $R$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 47 | 32 | 44 | 35 | 20 | 178 | 35,6 | 27 |
| 2 | 19 | 37 | 31 | 25 | 34 | 146 | 29,2 | 18 |
| 3 | 19 | 11 | 16 | 11 | 44 | 101 | 20,2 | 33 |
| 4 | 29 | 29 | 42 | 59 | 38 | 197 | 39,4 | 30 |
| 5 | 28 | 12 | 45 | 36 | 25 | 146 | 29,2 | 33 |
| 6 | 40 | 35 | 11 | 38 | 33 | 157 | 31,4 | 29 |
| 7 | 15 | 30 | 12 | 33 | 26 | 116 | 23,2 | 21 |
| 8 | 35 | 44 | 32 | 11 | 38 | 160 | 32,0 | 33 |
| 9 | 27 | 37 | 26 | 20 | 35 | 145 | 29,0 | 17 |
| 10 | 23 | 45 | 26 | 37 | 32 | 163 | 32,6 | 22 |
| 11 | 28 | 44 | 40 | 31 | 18 | 161 | 32,2 | 26 |
| 12 | 31 | 25 | 24 | 32 | 22 | 134 | 26,8 | 10 |
| 13 | 22 | 37 | 19 | 47 | 14 | 139 | 27,8 | 33 |
| 14 | 37 | 32 | 12 | 38 | 30 | 149 | 29,8 | 26 |
| 15 | 25 | 40 | 24 | 50 | 19 | 158 | 31,6 | 31 |
| 16 | 7 | 31 | 23 | 18 | 32 | 111 | 22,2 | 25 |
| 17 | 38 | 0 | 41 | 40 | 37 | 156 | 31,2 | 41 |
| 18 | 35 | 12 | 29 | 48 | 20 | 144 | 28,8 | 36 |
| 19 | 31 | 20 | 35 | 24 | 47 | 157 | 31,4 | 27 |
| 20 | 12 | 27 | 38 | 40 | 31 | 148 | 29,6 | 28 |
| 21 | 52 | 42 | 52 | 24 | 25 | 195 | 39,0 | 28 |
| 22 | 20 | 31 | 15 | 3 | 28 | 97 | 19,4 | 28 |
| 23 | 29 | 47 | 41 | 32 | 22 | 171 | 34,2 | 25 |
| 24 | 28 | 27 | 22 | 32 | 54 | 163 | 32,6 | 32 |
| 25 | 42 | 34 | 15 | 29 | 21 | 141 | 28,2 | 27 |
| | | | | | | Итого | | |

Среднее $\overline{\overline{X}} =$

$\overline{R} =$

## Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1) название работы;

2) цель;

3) исходные данные;

4 построенные вспомогательные таблицы и контрольные $\overline{X}$ –$R$-карты;

6) выводы.

## Контрольные вопросы

1. Виды и типы контрольных карт.
2. Сущность $\overline{X}$ –*R*-карты.
3. Этапы построения $\overline{X}$ –*R*-карты.
4. Основные правила интерпретации контрольной карты.
5. Какие условия определяют управляемость и неуправляемость технологического процесса?

Литература для подготовки к выполнению и защите практического занятия: [1, с. 123–130; 3, с. 48–16; 4; 5].

# 9. РАЗРАБОТКА ПЛАНОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО ПРИЕМОЧНОГО КОНТРОЛЯ

## Краткие теоретические сведения

Контроль продукции состоит из двух этапов: получение информации о фактическом состоянии продукции (ее количественных и качественных признаках) и сопоставление полученной информации с заранее установленными техническими требованиями, т. е. получение вторичной информации. При несоответствии фактических данных техническим требованиям осуществляется управляющее воздействие на объект контроля с целью устранения выявленного отклонения от технических требований.

Научной основой современного технического контроля стали математико-статические методы. Выявление разладки технологического процесса основано на результатах периодического контроля малых выборок, осуществляемого по количественному или альтернативному признаку.

## Управление технологическим процессом при контроле по количественному признаку

При контроле по количественному признаку о разладке технологического процесса судят как по среднему значению контролируемого параметра, так и по рассеиванию значений контролируемого параметра относительно этого среднего значения. Смещение среднего значения (в любую сторону) относительно средины поля допуска и увеличение рассеивания приводят к увеличению доли дефектной продукции.

В качестве средних значений при статистическом регулировании используют либо среднее арифметическое значение $\overline{X}$, либо медиану $\widetilde{X}$.

В качестве характеристик рассеивания используют либо выборочное среднее квадратическое отклонение *p,* либо размах *R.* В результате предварительного исследования состояния технологического процесса решаются следующие задачи:

1) получают оценки параметров нормального распределения μ и σ;
2) определяют вероятную долю дефектной продукции *P*;
3) определяют коэффициент точности $K_T$.

Для предварительного исследования технологического процесса на контроль отбирают, как минимум, $N = 100$ единиц продукции. У отобранных единиц продукции контролируют заданный параметр *X*.

По результатам контроля каждой выборки вычисляют статистические характеристики: $\overline{X}$, $\widetilde{X}$, *p*, *R.* На основании этой информации вычисляют оценки параметров μ и σ.

Параметр μ получают как среднее арифметическое *k* значений $\overline{X}_i$:

$$\mu = \overline{X} = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{R} \overline{X}_i, \qquad (9.1)$$

где $\overline{X}_i = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\overline{X}_{ij}\,(i=1, 2, \ldots, k;\ j=1, 2, \ldots, n)$.

Для оценки σ можно использовать три метода.

Первый метод более точен, но используется при наличии вычислительной техники:

$$\sigma = S = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{b=1}^{n}\left(X_b - \overline{\overline{X}}\right)^2},\ (b=1, 2, ..., n), \qquad (9.2)$$

где $N$ – объем контроля; $X_b$ – результаты контроля; $\overline{\overline{X}}$ – среднее арифметическое результатов контроля $\overline{X}$.

Второй метод точен, но более прост.

Оценку σ получают как среднее арифметическое $k$ значений $S_i$, умноженное на поправочный коэффициент $C_2$ (табл. 9.1).

$$\sigma = \overline{S}C_2, \qquad (9.3)$$

где $\overline{S} = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}S_i$.

Таблица 9.1

Значения поправочных коэффициентов

| Коэффициент | Объем выборки | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| $C_2$ | 0,89 | 0,92 | 0,94 | 0,95 | 0,96 | 0,97 | 0,97 | 0,97 |
| $d_2$ | 1,69 | 2,06 | 2,33 | 2,83 | 2,70 | 2,85 | 2,97 | 3,08 |

Третий метод дает наименее точную оценку σ, но прост для вычислений. Оценку σ получают как среднее арифметическое $k$ значений $R_i$, деленное на поправочный коэффициент $d_2$ (табл. 9.1).

$$\sigma = \frac{\overline{R}}{d_2}, \qquad (9.4)$$

где $\overline{R} = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}R_i$.

Вероятную долю дефектной продукции $P$ вычисляют по формуле

$$P = 1 - \Phi\left(\frac{T_в - \mu}{\sigma}\right) + \Phi\left(\frac{T_н - \mu}{\sigma}\right), \qquad (9.5)$$

где $T_в$, $T_н$ – верхняя и нижняя границы поля допуска; μ – среднее значение контролируемого параметра; σ – среднее квадратическое отклонение контро-

лируемого параметра Ф($X$) – функция нормального распределения (справочное значение).

Из этой формулы следует, что доля дефектной продукции будет тем больше, чем больше будет σ и чем больше будет отклонение μ от $\mu_0$, где $\mu_0$ – среднее значение контролируемого параметра при налаженном состоянии технологического процесса.

Точность процесса оценивается коэффициентом точности $K_T = 6\sigma/T$. Чем меньше $K_T$, тем больше запас точности и тем больше гарантия бездефектного изготовления продукции в течение определенного времени.

## Задание и порядок выполнения работы

*Задача*. В цехе принято решение перевести на статистическое регулирование технологический процесс изготовления болта на автоматах.

За показатель качества выбран параметр – диаметр болта и его допускаемые отклонения:

$d$ = 26 мм, $es$ = –0,005 мм, $ei$ = –0,019 мм.

Данные наблюдения за выбранным параметром приведены в табл. 9.2.

Таблица 9.2

Данные измерения диаметра болта

| Номер выборки | Результаты контроля (отклонения от размера $d$ = 25,980 мм) | | | | | $\overline{X}_i$ | $R_i$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 10 | 3 | 5 | 14 | 10 | | |
| 2 | 2 | 14 | 8 | 13 | 11 | | |
| 3 | 12 | 12 | 3 | 8 | 10 | | |
| 4 | 12 | 14 | 7 | 11 | 9 | | |
| 5 | 10 | 11 | 9 | 15 | 7 | | |
| 6 | 11 | 12 | 11 | 14 | 12 | | |
| 7 | 15 | 11 | 14 | 8 | 3 | | |
| 8 | 12 | 14 | 12 | 11 | 11 | | |
| 9 | 11 | 7 | 11 | 13 | 9 | | |
| 10 | 14 | 10 | 9 | 12 | 8 | | |
| 12 | 10 | 14 | 3 | 8 | 7 | | |
| 11 | 9 | 11 | 14 | 10 | 13 | | |
| 13 | 5 | 8 | 3 | 3 | 4 | | |
| 14 | 8 | 5 | 6 | 9 | 13 | | |
| 15 | 8 | 4 | 9 | 5 | 8 | | |
| 16 | 4 | 12 | 10 | 6 | 10 | | |
| 17 | 10 | 6 | 13 | 10 | 5 | | |
| 18 | 7 | 9 | 12 | 1 | 7 | | |
| 19 | 4 | 7 | 6 | 7 | 12 | | |
| 20 | 10 | 10 | 6 | 9 | 3 | | |

Определить вероятную долю дефектной продукции $P$ и коэффициент точности технологического процесса.

## Управление технологическим процессом при контроле по альтернативному признаку

При контроле по альтернативному признаку о разладке технологического процесса судят либо по числу дефектных единиц продукции ПР, либо по числу дефектов *C*. Увеличение любого из этих значений сверх допустимых норм свидетельствует о разладке технологического процесса.

При контроле по альтернативному признаку используют следующие виды контрольных карт:

*np*-карту – контрольную карту числа дефектных единиц продукции;

*c*-карту – контрольную карту числа дефектов;

*p*-карту – контрольную карту доли дефектной продукции;

*u*-карту – контрольную карту числа.

Статистическое регулирование с помощью этих контрольных карт осуществляют в соответствии с планом контроля.

Планом контроля определяются объем выборки *n*, браковочное число *d*, которым устанавливается положение границ регулирования, и период отбора выборок τ.

План контроля принимают с учетом результатов предварительного исследования состояния технологического процесса. Состояние технологического процесса тем лучше, чем меньше средний уровень дефектности и чем реже происходит его разладка.

Средний уровень $\overline{P}$ оценивают по результатам сплошного или выборочного контроля. Объем выборочного контроля должен составлять не менее 0,1 от объема сплошного контроля.

Оценку среднего уровня дефектности определяют по формуле

$$\overline{P} = \frac{\sum_{i=1}^{к} Д_i}{\sum_{i=1}^{к} П_i} \cdot 100, \qquad (9.6)$$

где к – число проконтролированных партий; $Д_i$ – число дефектных единиц продукции или число дефектов, обнаруженных в *i*-й партии; $П_i$ – число проконтролированных единиц продукции в *i*-й партии.

По результатам предварительного исследования вычисляют уровень дефектности для каждой из проконтролированных партий и отмечают (точками) на контрольной карте. Соединяя точки отрезками прямых, получают график, который дает наглядную картину изменения уровня дефектности. Отметив на этой контрольной карте средний уровень дефектности $\overline{P}$ по колебаниям точек относительно значения $\overline{P}$, можно оценить стабильность исследуемого технологического процесса. Если эти колебания незначительны, то технологический процесс стабилен.

После предварительного исследования состояния технологического процесса выбирают план контроля. Для этого необходимо установить допускаемый уровень дефектности *AQL* и объем контролируемой партии *N*.

Значение *AQL* устанавливают исходя из требований, предъявляемых к качеству готовой продукции и не превышающих значение $\overline{P}$. Объем контро-

лируемой партии $N$ определяют количеством единиц продукции, изготовленных за время $\tau$ ($\tau$ – периодичность отбора выборок).

При известных значениях $N$ и $AQL$ по табл. 9.4 выбирают объем выборки $n$ и браковочное число $d$.

Таблица 9.3

Код объема выборки

| Объем партии | Код объема выборки при уровне контроля | | |
|---|---|---|---|
| | Первый уровень контроля | Второй уровень контроля | Третий уровень контроля |
| 26–50 | C | C | D |
| 51–90 | C | C | E |
| 91–150 | D | D | F |
| 151–280 | E | E | G |
| 281–500 | E | F | H |
| 501–1200 | F | G | J |
| 1201–3200 | G | H | K |
| 3201–10000 | G | J | L |
| 10001–35000 | H | K | M |

Таблица 9.4

Данные для определения плана контроля

| Код объема выборки | Объем выборки | Приемочный уровень дефектности AQL* | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0,25 | 0,40 | 0,65 | 1,0 | 1,5 | 2,5 | 4,0 | 6,5 | 10 | 15 | 25 | 40 | 65 | 100 |
| | | Браковочное число $d$ | | | | | | | | | | | | | |
| C | 5 | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | 1 | 1 | ↓ | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 11 |
| D | 8 | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | 1 | ↑ | ↓ | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 11 | 15 |
| E | 13 | ↓ | ↓ | ↓ | 1 | ↑ | ↓ | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 11 | 15 | 22 |
| F | 20 | ↓ | ↓ | 1 | ↑ | ↓ | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 11 | 15 | 22 | ↑ |
| G | 32 | ↓ | 1 | ↑ | ↓ | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 11 | 15 | 22 | ↑ | ↑ |
| H | 50 | 1 | ↑ | ↓ | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 11 | 15 | 22 | ↑ | ↑ | ↑ |
| Y | 80 | ↑ | ↓ | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 11 | 15 | 22 | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ |
| K | 125 | ↓ | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 11 | 15 | 22 | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ |
| L | 200 | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 11 | 15 | 22 | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ |
| M | 215 | 3 | 4 | 6 | 8 | 11 | 15 | 22 | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ |

Примечания. * Приемочный уровень дефектности, превышающий значение 10, используется только для статистического регулирования с помощью контрольной карты числа дефектов (*c*-карты), и в этом случае *AQL* измеряется числом дефектов на 100 единиц продукции. ↓ Используют первое число *d* под стрелкой и соответственно ему выбирают объем выборки. ↑Используют первое значение *d* над стрелкой и соответственно ему выбирают объем выборки *n*.

Таблица 9.5

Границы регулирования контрольных карт

| Наименование контрольной карты | Принципы регулирования | Условия применения |
|---|---|---|
| Контрольная карта числа дефектных единиц продукции (*np*-карта) | ГР = *d* | Объем выборки постоянный |
| Контрольная карта числа дефектов (*c*-карта) | ГР = *d* | Объем выборки постоянный |
| Контрольная карта доли дефектной продукции (*p*-карта) | ГР = *d*/*n* | Объем выборки может изменяться |
| Контрольная карта числа дефектов на единицу продукции (*u*-карта) | ГР = *d*/*n* | Объем выборки может изменяться |

Для определения объема выборки необходимо предварительно по табл. 9.3 определить код объема выборки в зависимости от объема партии и уровня контроля. В таблице предусмотрено три уровня контроля. Переход на второй и первый уровни позволяет уменьшить объем выборки. Это бывает необходимо, например, при слишком трудоемком контроле.

Границы регулирования (ГР) для контрольных карт определяются значением *d* по табл. 9.5.

## Задание и порядок выполнения работы

*Задача*. В цехе листовой штамповки решено перевести ряд ответственных операций на статистическое регулирование для обеспечения стабильного качества продукции.

Основным контролируемым параметром является масса планки опоры после штамповки. В зависимости от результатов контроля планка признается либо годной, если ее масса соответствует установленным требованиям, либо дефектной. Объем партий колеблется от 450–500 штук планок.

Используя в качестве статистической характеристики долю дефектной продукции и соответственно для статистического регулирования *p*-карту выполнить следующее.

Получить оценку среднего уровня дефектности *P*. Чем меньше будет значение *P*, тем лучше технологический процесс и качество изготавливаемых деталей.

Для определения объема выборки воспользуемся табл. 9.4 для третьего уровня.

Из табл. 9.3 для объема выборки $n$ = 50 и определенного выше кода найдем объем исходной информации $N$ (20 выборок по 50 штук).

Результаты контроля 20 выборок отмечены в табл. 9.6. В каждой выборке подсчитано количество дефектов. Долю дефектных планок $P$ подсчитать как $\frac{P}{n}100$.

Для более наглядного представления результатов контроля долю дефектных планок отметить на контрольной карте. Построенный график позволяет визуально оценить состояние технологического процесса за исследуемый период.

По 20 результатам выборочного контроля вычислить оценку среднего уровня дефектности по формуле (9.6).

Исключить результаты контроля выборок при $P \geq 8$ %, рассчитать среднее значение уровня дефектности $\overline{P}$ при нормальном состоянии технологического процесса.

Таблица 9.6

Данные контроля дефектов массы планок

| Номер выборки | Объем контроля $n$ | Количество дефектных планок | Уровень дефектности $P$, % | Уровень дефектности $P$, % 0 2 4 6 8 10 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 50 | 2 | | |
| 2 | 50 | 2 | | |
| 3 | 50 | 1 | | |
| 4 | 50 | 2 | | |
| 5 | 50 | 2 | | |
| 6 | 50 | 1 | | |
| 7 | 50 | 1 | | |
| 8 | 50 | 1 | | |
| 9 | 50 | 4 | | |
| 10 | 50 | 5 | | |
| 11 | 50 | 4 | | |
| 12 | 50 | 2 | | |
| 13 | 50 | 1 | | |
| 14 | 50 | 1 | | |
| 15 | 50 | 1 | | |
| 16 | 50 | 0 | | |
| 17 | 50 | 1 | | |
| 18 | 50 | 1 | | |
| 19 | 50 | 0 | | |
| 20 | 50 | 2 | | |
| $\sum$ | 1000 | 34 | | |

Если такой процент брака считается приемлемым, то его значение используют в качестве исходного при выборе приемочного уровня дефектности.

В табл. 9.3 найти ближайшее к полученному *P* при нормальном состоянии технологического процесса значение *AQL* и это значение принять за приемочный уровень дефектности *AQL*.

2. Выбрать план контроля.

Поскольку известен объем партий (задан), установлен приемочный уровень дефектности (*AQL*), то задача сводится к определению объема выборки *n* и браковочного числа *d*.

Объем выборки и браковочное число определить из табл. 9.4. Здесь возможен переход на другой уровень, а значит и изменение кода объема.

Выбрав план контроля (*N*; *AQL*; *n*; *d*), определить границу регулирования (табл. 9.5).

Результаты контроля нанести на график (табл. 9.6).

## Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1) название работы;

2) цель;

3) исходные данные;

4) решение задач по темам «Управление технологическим процессом при контроле по количественному признаку» и «Управление технологическим процессом при контроле по альтернативному признаку» с пояснениями.

## Контрольные вопросы

1. Что называется планом контроля?
2. Оперативная характеристика плана.
3. Сущность статистического приемочного контроля по альтернативному признаку.
4. Сущность статистического приемочного контроля по количественному признаку.

Литература для подготовки к выполнению и защите практического занятия: [1, с. 123–130; 3, с. 48–16; 4; 5].

# 10. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

## Краткие теоретические сведения

Уровень качества продукции, сформулированный на этапе проектирования, должен обеспечиваться на стадии производства при наличии сырья и материалов соответствующего качества.

Качество продукции в процессе изготовления зависит от таких параметров качества технологии, как точность и стабильность.

Точность технологического процесса – это близость к номинальным значениям контролируемых показателей качества.

Стабильность технологического процесса – это способность сохранять значения показателей качества в заданных пределах с течением времени.

## Общие характеристики технологического процесса

Размер обрабатываемой детали будет изменяться от минимального значения $d_{min}$ до максимального $d_{max}$ в силу неравномерности припуска и неравномерности твердости заготовки, неравномерности твердости инструмента, переменной жесткости, условий охлаждения и т. п.

Разница между $d_{min}$ и $d_{max}$ (или любого другого показателя $Q_{min}$ и $Q_{max}$) будет составлять рассеивание или технологический допуск ω.

По соотношению рассеивания ω к конструкторскому допуску $T$, указанному на чертеже детали, судят о точности технологического процесса. Обычно используют понятие запаса точности, который характеризуют коэффициентом запаса точности $K_P$:

$$K_P = \frac{\omega}{T}. \qquad (10.1)$$

Если $K_P \geq 1$, то процесс вообще не имеет запаса и возникает брак; $K_P < 1$ – технологический процесс считается точным, но предпочтительно, чтобы $K_{P\ min} = 0{,}75$, в этом случае имеется 25 % запаса точности.

Точность настройки характеризуется коэффициентом, показывающим смещение в долях конструкторского допуска:

$$K_{Т.Н} = \frac{\left|\overline{Q} - Q_н\right|}{T}, \qquad (10.2)$$

где $Q$ – центр технологического допуска; $Q_н$ – середина конструкторского допуска; $T$ – конструкторский допуск.

Во избежание брака при изготовлении продукции необходимо обеспечивать $K_P \leq 0{,}75$ и $K_{Т.Н} \leq 1/2(1 - K_P)$.

Оценку стабильности технологического процесса по уровню наладки (значению $\overline{Q}$) за время эксплуатации $t$ принято характеризовать коэффициентом смещения настройки $K_{см}$ и коэффициентом межнастроечной стабильности $K_{м.с}$.

$$K_{\text{м.с}} = \frac{\omega_{\text{к}}}{\omega_0}, \qquad (10.3)$$

где $\omega_0$ и $\omega_{\text{к}}$ – рассеивание в начальный и конечный момент времени.

$$K_{\text{см}} = \frac{\left|\overline{Q}_{\text{к}} - \overline{Q}_0\right|}{T}, \qquad (10.4)$$

где $\overline{Q}_0$ и $\overline{Q}_{\text{к}}$ – центр технологического допуска в начальный и конечный момент времени $t$.

## Задание и порядок выполнения работы

Используя теорию, изложенную выше, определить показатели качества технологических процессов для условий задачи 1 и 2.

*Задача 1*. На чертеже указан размер вала ∅25 h6. Исследование точности шлифовального станка показало, что при обработке детали в диапазоне 20–40 мм наблюдается рассеивание ω = 0,015 мм. Необходимо оценить точность технологического процесса шлифования.

*Задача 2*. Определить стабильность технологического процесса при выполнении операции точения, в которой присутствует погрешность настройки ($K_{\text{Т.Н}} \neq 0$) и нарастающая в процессе работы дополнительная погрешность (при износе резца размеры детали $d$ увеличиваются с течением времени $t$). Эта ситуация представлена на рис. 10.1.

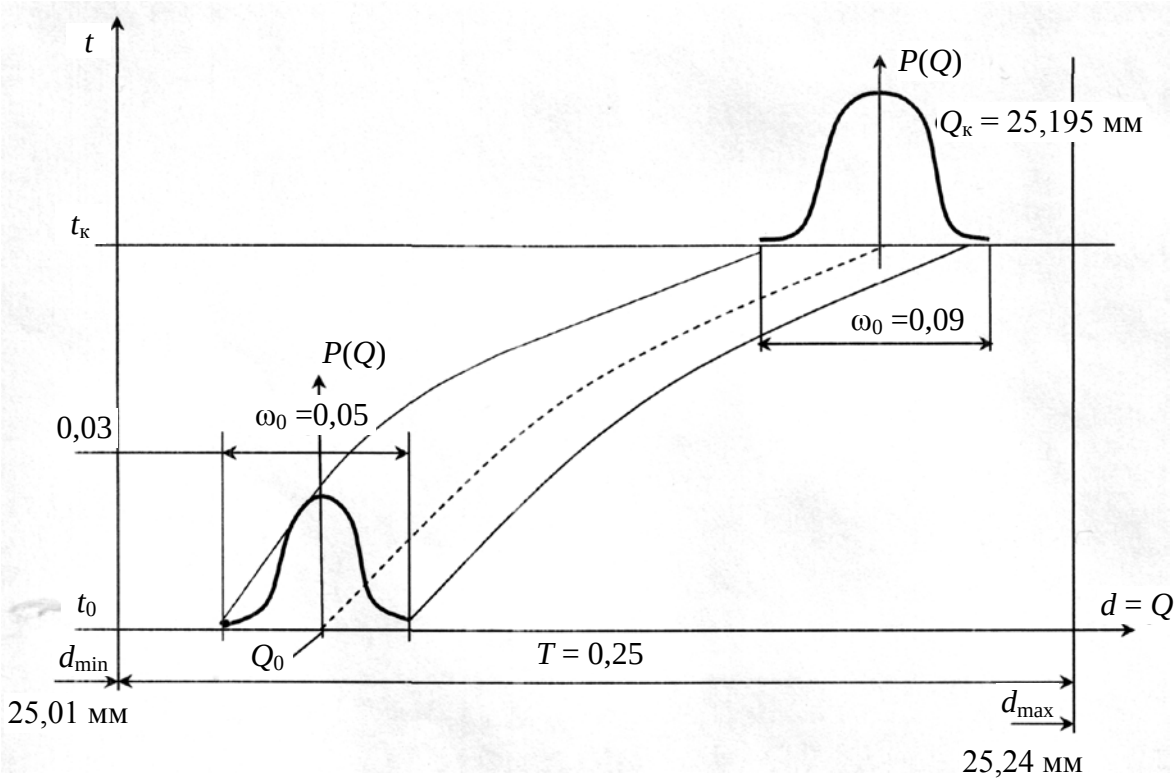



Рис. 10.1. Изменение распределения размеров деталей

## Содержание отчета

Отчет должен содержать решение задач 1 и 2 с пояснениями.

## Контрольные вопросы

1. Характеристики технологического процесса.
2. Приведите расчетную формулу определения коэффициента запаса точности и раскройте его сущность.
3. Приведите расчетную формулу определения коэффициента смещения настройки и раскройте его сущность.
4. Приведите расчетную формулу определения коэффициента межнастроечной стабильности и раскройте его сущность.

Литература для подготовки к выполнению и защите практического занятия: [4; 9, с. 167–175, 190–195; 11, с. 176–183].

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фомин, В. Н. Квалиметрия. Управление качеством. Сертификация : учеб. пособие / В. Н. Фомин. – М. : Ось-89, 2002. – 387 с.

2. Калейчик, М. М. Квалиметрия : учеб. пособие / М. М. Калейчик. – М. : 2003. – 198 с.

3. Гиссин, В. И. Управление качеством : учеб. пособие / В. И. Гиссин. – М. : ИЦК «Март»; Ростов н/Д : Издат. центр «МартТ», 2003. – 400 с.

4. Недбай, А. А. Основы квалиметрии : учеб. пособие / А. А. Недбай, Н. В. Мерзликина. – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – 123 с. – (Квалиметрия : УМКД № 104-2007 / рук. творч. коллектива А. А. Недбай).

5. Азгальдов, Г. Г. О квалиметрии : учеб. пособие / Г. Г. Азгальдов, Э. П. Райхман ; под ред. А. В. Гличева. – М. : Стандартиздат, 1973.

6. Квалиметрия : метод. указания по курсовой работе / сост. : А. А. Недбай, Н. В. Мерзликина. – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – 19 с. – (Квалиметрия : УМКД № 104-2007 / рук. творч. коллектива А. А. Недбай).

7. Квалиметрия : метод. указания по самостоятельной работе студентов / сост. А. А. Недбай. – Красноярск : ИПЦ СФУ, 2007.

8. Басовский, Л. Е. Управление качеством : учебник / Л. Е. Басовский, В. Б. Протасьев. – М. : ИНФРА-М, 2004. – 212 с.

9. Никифоров, А. Д. Управление качеством : учеб. пособие для вузов / А. Д. Никифоров. – 2-е изд., стер. – М. : Дрофа, 2006 – 719 с.

10. Федюкин, В. К. Методы оценки и управления качеством промышленной продукции : учебник / В. К. Федюкин, В. Д. Дурнев, В. Г. Лебедев. – М. : Информационно-издательский дом «Филинъ», 2000.– 328 с.

11. СТО 4.2-07–2008. Система менеджмента качества. Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной и научной деятельности [текст] / разраб. Т. В. Сильченко, Л. В. Белошапко, В. К. Младенцева, М. И. Губанова. – Введ. впервые 09.12.2008. – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – 47 с.

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

**(рекомендуемое)**

| Номер свойства по дереву свойств | $\overline{q}'_{ij}$ | | | | | | | | | | | | | Вычисление значений групповых коэффициентов весомости | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1-й тур | | | | | | | 2-й тур | | | | | | $\overline{q}'_i$ | $A$ | $q_i$ | $\sum_{i=1}^{n} q_i = 1$ |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |

# ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**(рекомендуемое)**

| Наименование и номер показателя качества дерева свойств | Действительное значение показателя качества | | | | | | | Стандартные (базовые) значения показателя $P_i^{баз}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| 1.<br>2.<br>3.<br>.<br>.<br>

# ПРИЛОЖЕНИЕ В

**(рекомендуемое)**

| Наименование и номер показателя качества из дерева свойств | Относительный уровень показателя качества $K_i$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1.<br><br>2.<br><br>3.<br><br>.<br>.<br>.

# ПРИЛОЖЕНИЕ Г

ГРАФИК
учебного процесса и самостоятельной работы студентов по дисциплине «Квалиметрия»
направления 220500.62 «Стандартизация, управление качеством и метрология»
механико-технологического факультета 3-го курса на 6-й семестр

| Наименование дисциплины | Семестр | Часов аудиторных занятий | | Форма контроля | Часов на самостоятельную работу | | Недели учебного процесса семестра | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Всего | По видам | | Всего | По видам | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| Квалиметрия | 6 | 68 | Лекции – 34 | Экзамен | 76 | ТО – 22 | | ТО 1,5 | ТО 1,5 | ТО 3 | ТО 3 | ТО 2,5 | ТО 2,5 | ТО 1 | ТО 1 | ТО 0,5 | ТО 0,5 | ТО 1 | ТО 1 | ТО 1 | ТО 1 | ТО 0,5 | ТО 0,5 |
| | | | | | | ПЗ – 8 | ПЗ 1 1 | | ПЗ 2 1,5 | | | ПЗ 3 0,5 | ПЗ 4 1 | | | ПЗ 5 0,5 | ПЗ 6 0,5 | ПЗ 7 0,5 | ПЗ 8 1 | | ПЗ 9 1 | ПЗ 10 0,5 | |
| | | | Практические – 34 | | | КР – 34 | | ВКР | | | | | | | | | | | | | СКР | | |
| | | | | | | РП – 8 | | | | РП | | | | РП | | | | РП | | | | РП | |
| | | | | | | ВК | ВК | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | Т – 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | Т |

**Условные обозначения:** ТО – изучение теоретического курса; КР – курсовая работа; ВКР – выдача курсовой работы; СКР – сдача курсовой работы; КН – контрольная неделя (аттестационная неделя); ВК – входной контроль (тестирование); ПК – промежуточный контроль (тестирование); РП – работа с периодикой, с Интернетом; ПЗ – практическое занятие; Т – тестирование.

Заведующий кафедрой В. С. Секацкий «_____» _____ 2007 г.

Минобрнауки России
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

**УТВЕРЖДАЮ**
Проректор по учебно-методическому комплексу

_____С.А. Упоров

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ
# Б1.В.ДВ.03.01 ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СРЕДСТВ И ОБЪЕКТОВ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Специальность
15.03.01 Машиностроение

программа подготовки бакалавриата
Направленность (профиль)/ специализация
Производство и реновация машин и оборудования

форма обучения: очная, заочная

год набора: 2019

Автор: Горшков Э.В., доцент, к.т.н.

Одобрен на заседании кафедры

Эксплуатации горного оборудования
*(название кафедры)*

Зав. кафедрой _____
*(подпись)*

Симисинов Д.И.
*(Фамилия И.О.)*

Протокол № 8 от 17.04.2019
*(Дата)*

Рассмотрен методической комиссией факультета

Горно-механического
*(название факультета)*

Председатель _____
*(подпись)*

Барановский В.П.
*(Фамилия И.О.)*

Протокол № 7 от 19.04.2019
*(Дата)*

Екатеринбург
2019

Комплект оценочных средств дисциплины согласован с выпускающей кафедрой эксплуатации горного оборудования

Заведующий кафедрой _____ Симисинов Д.И.

*подпись*

**СОДЕРЖАНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ……3

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ……..…….5

САМООРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЛИТЕРАТУРОЙ……..…6

ПОДГОТОВКА К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ…… 10

ПОДГОТОВКА К ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫМ ЗАДАНИЯМ
…….....11

ПОДГОТОВКА К ТЕСТИРОВАНИЮ……...……..13

ПОДГОТОВКА К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ……...13

ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ……..14

# ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа в высшем учебном заведении - это часть учебного процесса, метод обучения, прием учебно-познавательной деятельности, комплексная целевая стандартизованная учебная деятельность с запланированными видом, типом, формами контроля.

Самостоятельная работа представляет собой плановую деятельность обучающихся по поручению и под методическим руководством преподавателя.

Целью самостоятельной работы студентов является закрепление тех знаний, которые они получили на аудиторных занятиях, а также способствование развитию у студентов творческих навыков, инициативы, умению организовать свое время.

Самостоятельная работа реализует следующие задачи:

- предполагает освоение курса дисциплины;
- помогает освоению навыков учебной и научной работы;
- способствует осознанию ответственности процесса познания;
- способствует углублению и пополнению знаний студентов, освоению ими навыков и умений;
- формирует интерес к познавательным действиям, освоению методов и приемов познавательного процесса,
- создает условия для творческой и научной деятельности обучающихся;
- способствует развитию у студентов таких личных качеств, как целеустремленность, заинтересованность, исследование нового.

Самостоятельная работа обучающегося выполняет следующие функции:

- развивающую (повышение культуры умственного труда, приобщение к творческим видам деятельности, обогащение интеллектуальных способностей студентов);
- информационно-обучающую (учебная деятельность студентов на аудиторных занятиях, неподкрепленная самостоятельной работой, становится мало результативной);
- ориентирующую и стимулирующую (процессу обучения придается ускорение и мотивация);
- воспитательную (формируются и развиваются профессиональные качества бакалавра и гражданина);
- исследовательскую (новый уровень профессионально-творческого мышления).

Организация самостоятельной работы студентов должна опираться на определенные требования, а, именно:

- сложность осваиваемых знании должна соответствовать уровню развития студентов;
- стандартизация заданий в соответствии с логической системой курса дисциплины;
- объем задания должен соответствовать уровню студента;
- задания должны быть адаптированными к уровню студентов.

Содержание самостоятельной работы студентов представляет собой, с одной стороны, совокупность теоретических и практических учебных заданий, которые должен выполнить студент в процессе обучения, объект его деятельности; с другой стороны - это способ деятельности студента по выполнению соответствующего теоретического или практического учебного задания.

Свое внешнее выражение содержание самостоятельной работы студентов находит во всех организационных формах аудиторной и внеаудиторной деятельности, в ходе самостоятельного выполнения различных заданий.

Функциональное предназначение самостоятельной работы студентов в процессе лекций, практических занятий по овладению специальными знаниями заключается в самостоятельном прочтении, просмотре, прослушивании, наблюдении, конспектировании, осмыслении, запоминании и воспроизведении определенной информации. Цель и планирование самостоятельной работы студента определяет преподаватель. Вся информация осуществляется на основе ее воспроизведения.

Так как самостоятельная работа тесно связана с учебным процессом, ее необходимо рассматривать в двух аспектах:

1. аудиторная самостоятельная работа - лекционные, практические занятия;

2. внеаудиторная самостоятельная работа – дополнение лекционных материалов, подготовка к практическим занятиям, подготовка к участию в деловых играх и дискуссиях, выполнение письменных домашних заданий, Контрольных работ (рефератов и т.п.) и курсовых работ (проектов), докладов и др.

Основные формы организации самостоятельной работы студентов определяются следующими параметрами:

- содержание учебной дисциплины;
- уровень образования и степень подготовленности студентов;
- необходимость упорядочения нагрузки студентов при самостоятельной работе.

Таким образом, самостоятельная работа студентов является важнейшей составной частью процесса обучения.

Методические указания по организации самостоятельной работы и задания для обучающихся по дисциплине «Техническая диагностика средств и объектов машиностроения» обращают внимание студента на главное, существенное в изучаемой дисциплине, помогают выработать умение анализировать явления и факты, связывать теоретические положения с практикой, а также облегчают подготовку к выполнению *контрольной работы* и сдаче *зачета*.

Настоящие методические указания позволят студентам самостоятельно овладеть фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю подготовки, опытом творческой и исследовательской деятельности, и направлены на формирование компетенций, предусмотренных учебным планом поданному профилю.

Видами самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «Техническая диагностика средств и объектов машиностроения» являются:

- повторение материала лекций;
- самостоятельное изучение тем курса (в т.ч. рассмотрение основных категорий дисциплины, работа с литературой);
- ответы на вопросы для самопроверки (самоконтроля);
- подготовка к практическим занятиям;
- подготовка к тестированию;
- подготовка контрольной работы;
- подготовка к зачету.

В методических указаниях представлены материалы для самостоятельной работы и рекомендации по организации отдельных её видов.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

### ТЕМА 1: Классификация дефектов деталей машин. Обнаружение и поиск дефектов.

1.Какие формы проявления неработоспособности горных машин *вы знаете?*
2.Назовите основные причины, приводящие к потере работоспособности горного оборудования в процессе его эксплуатации*?*
3.Классификация видов изнашивания?
4.Методы измерения износа и пути снижения интенсивности изнашивания горных машин?
5.Основные закономерности изнашивания?
6.Допустимый и предельный износ?
7.Дефекты, возникающие в процессе эксплуатации горного оборудования?
8.Причины разрушений и анализ поверхностей разрушения деталей?
9. Меры по предупреждению разрушения деталей машин.
10.Методы и средства обнаружения дефектов.

### Тема 2: ***Тестовое и функциональное диагностирование.***

1. Диагностика, как основа ТО и ремонта машин по их фактическому техническому состоянию?
2. Каковы основные этапы внедрения технической диагностики в систему ТО и ремонта машин?
3. Физические основы технической диагностики?
4. Термины и определения технической диагностики?
5. Какие процессы работы машин могут быть использованы в качестве диагностических?
6. Каким требованиям должен удовлетворять выходной сигнал при использовании его в качестве диагностического?

7. Какие задачи должны быть решены при внедрении системы диагностирования на предприятии?
8. Требования к оборудованию, переводимому на техническое диагностирование?
9. Последовательность и методика проведения работ по оснащению оборудования средствами ТД?
10. В чем заключается тестовое диагностирование и каким образом оно осуществляется в условиях горного предприятия?
11. Что включает в себя функциональное диагностирование?

**ТЕМА 3:** ***Технологические принципы диагностирования.***

1. Основные операции составляющие технологический процесс диагностирования?
2. Порядок выполнения работ по диагностике при плановом техническом обслуживании?
3. Диагностирование при возникновении неисправностей в процессе эксплуатации?
4. Рекомендации по установлению вида и объема ремонтно-обслуживающих работ по результатам диагностирования?
5. Каковы основные требования к математическим моделям объекта технического диагностирования?
6. Каким образом осуществляется построение алгоритма диагностирования?
7. Каковы основные требования, предъявляемые к методам технического диагностирования?
8. Субъективные и объективные методы диагностирования?
9. Классификация диагностических датчиков и область их применения?
10. Какие методы не разрушающего контроля находят наибольшее распространение при ремонтах горного оборудования.

**ТЕМА4:** ***Нормирование и нормативы диагностических параметров*****.**

1. Классификация и выбор диагностических параметров.
2. Субъективные и объективные методы диагностирования?
3. Номинальные, предельные и допустимые значения диагностических и структурных параметров?
4. Основной документ в который заносятся результаты диагностирования?
5. Каким образом разрабатываются нормативные данные по диагностике?
6. Совершенствование организации ТО и ремонта машин с применением диагностики.
7. Периодичность диагностирования.
8. Какие факторы оказывают влияние на эффективность использования средств диагностирования?

9.Какова экономическая эффективность от внедрения средств диагностирования горных машин?
10.Пути повышения эффективности диагностирования.

**ТЕМА 5:** ***Прогнозирование износа деталей и технического состояния машин*****.**

1.Каким образом осуществляется прогнозирование технического состояния машин?
2.Методика прогнозирования износа деталей машин.
3.Технологические методы обеспечения долговечности машин.
4.Эксплуатационные методы обеспечения долговечности машин.
5.Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя детали.
6.Эксплуатационные методы управления техническим состоянием промышленного оборудования.
7.Восстановление утраченной работоспособности машин в период производства текущих и капитальных ремонтов.
8.Повышение ресурса промышленного оборудования путем применения системы мониторинга.

## САМООРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЛИТЕРАТУРОЙ

Самостоятельное изучение тем курса осуществляется на основе списка рекомендуемой литературы к дисциплине. При работе с книгой необходимо научиться правильно ее читать, вести записи. Самостоятельная работа с учебными и научными изданиями профессиональной и общекультурной тематики– это важнейшее условие формирования научного способа познания.

Основные приемы работы с литературой можно свести к следующим:

• составить перечень книг, с которыми следует познакомиться;

• перечень должен быть систематизированным (что необходимо для семинаров, что для экзаменов, что пригодится для написания курсовых и выпускных квалификационных работ (ВКР), а что выходит за рамками официальной учебной деятельности, и расширяет общую культуру);

• обязательно выписывать все выходные данные по каждой книге (при написании курсовых и выпускных квалификационных работ это позволит экономить время);

• определить, какие книги (или какие главы книг) следует прочитать более внимательно, а какие – просто просмотреть;

• при составлении перечней литературы следует посоветоваться с преподавателями и руководителями ВКР, которые помогут сориентироваться, на что стоит обратить большее внимание, а на что вообще не стоит тратить время;

• все прочитанные монографии, учебники и научные статьи следует конспектировать, но это не означает, что надо конспектировать «все подряд»:

можно выписывать кратко основные идеи автора и иногда приводить наиболее яркие и показательные цитаты (с указанием страниц);

• если книга – собственная, то допускается делать на полях книги краткие пометки или же в конце книги, на пустых страницах просто сделать свой «предметный указатель», где отмечаются наиболее интересные мысли и обязательно указываются страницы в тексте автора;

• следует выработать способность «воспринимать» сложные тексты; для этого лучший прием – научиться «читать медленно», когда понятно каждое прочитанное слово (а если слово незнакомое, то либо с помощью словаря, либо с помощью преподавателя обязательно его узнать). Таким образом, чтение текста является частью познавательной деятельности. Ее цель – извлечение из текста необходимой информации.

От того, насколько осознанна читающим собственная внутренняя установка при обращении к печатному слову (найти нужные сведения, усвоить информацию полностью или частично, критически проанализировать материал и т.п.) во многом зависит эффективность осуществляемого действия. Грамотная работа с книгой, особенно если речь идет о научной литературе, предполагает соблюдение ряда правил, для овладения которыми необходимо настойчиво учиться. Это серьёзный, кропотливый труд. Прежде всего, при такой работе невозможен формальный, поверхностный подход. Не механическое заучивание, не простое накопление цитат, выдержек, а сознательное усвоение прочитанного, осмысление его, стремление дойти до сути – вот главное правило. Другое правило – соблюдение при работе над книгой определенной последовательности. Вначале следует ознакомиться с оглавлением, содержанием предисловия или введения. Это дает общую ориентировку, представление о структуре и вопросах, которые рассматриваются в книге.

Следующий этап – чтение. Первый раз целесообразно прочитать книгу с начала до конца, чтобы получить о ней цельное представление. При повторном чтении происходит постепенное глубокое осмысление каждой главы, критического материала и позитивного изложения; выделение основных идей, системы аргументов, наиболее ярких примеров и т.д. Непременным правилом чтения должно быть выяснение незнакомых слов, терминов, выражений, неизвестных имен, названий. Студентам с этой целью рекомендуется заводить специальные тетради или блокноты. Важная роль в связи с этим принадлежит библиографической подготовке студентов. Она включает в себя умение активно, быстро пользоваться научным аппаратом книги, справочными изданиями, каталогами, умение вести поиск необходимой информации, обрабатывать и систематизировать ее.

Выделяют четыре основные установки в чтении текста:

- информационно-поисковая (задача – найти, выделить искомую информацию);

- усваивающая (усилия читателя направлены на то, чтобы как можно полнее осознать и запомнить, как сами сведения, излагаемые автором, так и всю логику его рассуждений);

- аналитико-критическая (читатель стремится критически осмыслить материал, проанализировав его, определив свое отношение к нему);

- творческая (создает у читателя готовность в том или ином виде – как отправной пункт для своих рассуждений, как образ для действия по аналогии и т.п. – использовать суждения автора, ход его мыслей, результат наблюдения, разработанную методику, дополнить их, подвергнуть новой проверке).

С наличием различных установок обращения к тексту связано существование и нескольких видов чтения:

- библиографическое – просматривание карточек каталога, рекомендательных списков, сводных списков журналов и статей за год и т.п.;

- просмотровое – используется для поиска материалов, содержащих нужную информацию, обычно к нему прибегают сразу после работы со списками литературы и каталогами, в результате такого просмотра читатель устанавливает, какие из источников будут использованы в дальнейшей работе;

- ознакомительное – подразумевает сплошное, достаточно подробное прочтение отобранных статей, глав, отдельных страниц; цель – познакомиться с характером информации, узнать, какие вопросы вынесены автором на рассмотрение, провести сортировку материала;

- изучающее – предполагает доскональное освоение материала; в ходе такого чтения проявляется доверие читателя к автору, готовность принять изложенную информацию, реализуется установка на предельно полное понимание материала;

- аналитико-критическое и творческое чтение – два вида чтения близкие между собой тем, что участвуют в решении исследовательских задач.

Первый из них предполагает направленный критический анализ, как самой информации, так и способов ее получения и подачи автором; второе – поиск тех суждений, фактов, по которым, или, в связи с которыми, читатель считает нужным высказать собственные мысли.

Из всех рассмотренных видов чтения основным для студентов является изучающее – именно оно позволяет в работе с учебной и научной литературой накапливать знания в различных областях. Вот почему именно этот вид чтения в рамках образовательной деятельности должен быть освоен в первую очередь. Кроме того, при овладении данным видом чтения формируются основные приемы, повышающие эффективность работы с текстом. Научная методика работы с литературой предусматривает также ведение записи прочитанного. Это позволяет привести в систему знания, полученные при чтении, сосредоточить внимание на главных положениях, зафиксировать, закрепить их в памяти, а при необходимости вновь обратиться к ним.

Основные виды систематизированной записи прочитанного:

Аннотирование – предельно краткое связное описание просмотренной или прочитанной книги (статьи), ее содержания, источников, характера и назначения.

Планирование – краткая логическая организация текста, раскрывающая содержание и структуру изучаемого материала.

Тезирование – лаконичное воспроизведение основных утверждений автора без привлечения фактического материала.

Цитирование – дословное выписывание из текста выдержек, извлечений, наиболее существенно отражающих ту или иную мысль автора.

Конспектирование – краткое и последовательное изложение содержания прочитанного. Конспект – сложный способ изложения содержания книги или статьи в логической последовательности. Конспект аккумулирует в себе предыдущие виды записи, позволяет всесторонне охватить содержание книги, статьи. Поэтому умение составлять план, тезисы, делать выписки и другие записи определяет и технологию составления конспекта.

Как правильно составлять конспект? Внимательно прочитайте текст. Уточните в справочной литературе непонятные слова. При записи не забудьте вынести справочные данные на поля конспекта. Выделите главное, составьте план, представляющий собой перечень заголовков, подзаголовков, вопросов, последовательно раскрываемых затем в конспекте. Это первый элемент конспекта. Вторым элементом конспекта являются тезисы. Тезис - это кратко сформулированное положение. Для лучшего усвоения и запоминания материала следует записывать тезисы своими словами. Тезисы, выдвигаемые в конспекте, нужно доказывать. Поэтому третий элемент конспекта - основные доводы, доказывающие истинность рассматриваемого тезиса. В конспекте могут быть положения и примеры. Законспектируйте материал, четко следуя пунктам плана. При конспектировании старайтесь выразить мысль своими словами. Записи следует вести четко, ясно. Грамотно записывайте цитаты. Цитируя, учитывайте лаконичность, значимость мысли. При оформлении конспекта необходимо стремиться к емкости каждого предложения. Мысли автора книги следует излагать кратко, заботясь о стиле и выразительности написанного. Число дополнительных элементов конспекта должно быть логически обоснованным, записи должны распределяться в определенной последовательности, отвечающей логической структуре произведения. Для уточнения и дополнения необходимо оставлять поля.

Конспектирование - наиболее сложный этап работы. Овладение навыками конспектирования требует от студента целеустремленности, повседневной самостоятельной работы. Конспект ускоряет повторение материала, экономит время при повторном, после определенного перерыва, обращении к уже знакомой работе. Учитывая индивидуальные особенности каждого студента, можно дать лишь некоторые, наиболее оправдавшие себя общие правила, с которыми преподаватель и обязан познакомить студентов:

1. Главное в конспекте не объем, а содержание. В нем должны быть отражены основные принципиальные положения источника, то новое, что

внес его автор, основные методологические положения работы. Умение излагать мысли автора сжато, кратко и собственными словами приходит с опытом и знаниями. Но их накоплению помогает соблюдение одного важного правила – не торопиться записывать при первом же чтении, вносить в конспект лишь то, что стало ясным.

2. Форма ведения конспекта может быть самой разнообразной, она может изменяться, совершенствоваться. Но начинаться конспект всегда должен с указания полного наименования работы, фамилии автора, года и места издания; цитаты берутся в кавычки с обязательной ссылкой на страницу книги.

3. Конспект не должен быть «слепым», безликим, состоящим из сплошного текста. Особо важные места, яркие примеры выделяются цветным подчеркиванием, взятием в рамочку, оттенением, пометками на полях специальными знаками, чтобы можно было быстро найти нужное положение. Дополнительные материалы из других источников можно давать на полях, где записываются свои суждения, мысли, появившиеся уже после составления конспекта.

## ПОДГОТОВКА К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Подготовка к практическому занятию включает следующие элементы самостоятельной деятельности: четкое представление цели и задач его проведения; выделение навыков умственной, аналитической, научной деятельности, которые станут результатом предстоящей работы. Выработка навыков осуществляется с помощью получения новой информации об изучаемых процессах и с помощью знания о том, в какой степени в данное время студент владеет методами исследовательской деятельности, которыми он станет пользоваться на практическом занятии. Следовательно, работа на практическом занятии направлена не только на познание студентом конкретных явлений внешнего мира, но и на изменение самого себя. Второй результат очень важен, поскольку он обеспечивает формирование таких общекультурных компетенций, как способность к самоорганизации и самообразованию, способность использовать методы сбора, обработки и интерпретации комплексной информации для решения организационно-управленческих задач, в том числе находящихся за пределами непосредственной сферы деятельности студента. Подготовка к практическому занятию нередко требует подбора материала, данных и специальных источников, с которыми предстоит учебная работа. В ходе самого практического занятия обучающиеся выполняют задания и делают выводы по выполненному практическому заданию.

## ПОДГОТОВКА К ТЕСТИРОВАНИЮ

Тесты – это вопросы или задания, предусматривающие конкретный, краткий, четкий ответ на имеющиеся эталоны ответов. При самостоятельной подготовке к тестированию студенту необходимо:

1. готовясь к тестированию, проработать информационный материал по дисциплине; проконсультироваться с преподавателем по вопросу выбора учебной литературы;

2. четко выяснить все условия тестирования заранее. Студент должен знать, сколько тестов ему будет предложено, сколько времени отводится на тестирование, какова система оценки результатов и т. д.;

3. приступая к работе с тестами, внимательно и до конца нужно прочитать вопрос и предлагаемые варианты ответов; выбрать правильные (их может быть несколько); на отдельном листке ответов вписать цифру вопроса и буквы, соответствующие правильным ответам;

- в процессе решения желательно применять несколько подходов в решении задания. Это позволяет максимально гибко оперировать методами решения, находя каждый раз оптимальный вариант;

- не нужно тратить слишком много времени на трудный вопрос, нужно переходить к другим тестовым заданиям; к трудному вопросу можно обратиться в конце;

- обязательно необходимо оставить время для проверки ответов, чтобы избежать механических ошибок.

## ПОДГОТОВКА К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ

Контрольная работа – это письменная работа, выполняемая студентами самостоятельно, преимущественно по общим математическим и естественно-научным, а также специальным дисциплинам, в которой, как правило, решаются конкретные задачи.

Цель контрольной работы – оценка качества усвоения студентами отдельных, наиболее важных разделов, тем и проблем изучаемой дисциплины, умения решать конкретные теоретические и практические задачи.

Контрольная работа, как правило, имеет аналитическую или описательную части, может решать проблемные ситуации путем проведения численного моделирования или расчетов, в том числе с использованием ПК. По типу они могут иметь характер задач, расчётов, алгоритмов, программ и т.п.

Контрольные работы выполняются студентами самостоятельно в соответствие с учебным планом.

Структура контрольной работы зависит от специфики изучаемой дисциплины. В общем виде контрольная работа должна содержать: титульный лист, введение, основную часть и заключение.

Во введении приводится формулировка контрольного задания, кратко излагается цель контрольной работы, место и роль рассматриваемого вопроса (проблемы) в изучаемой учебной дисциплине.

Основная часть контрольной работы должна, как правило, содержать основные определения, обоснования и доказательства, описание методики расчёта (формулы), а также иметь ссылки на используемые источники информации. Материал работы и ее отдельные положения должны быть взаимосвязаны. Основная часть может также включать анализ теории вопроса по теме контрольной работы. Здесь же приводятся исходные данные и значения параметров в соответствии с заданием на контрольную работу. После этого излагается ход рассуждений, описывается последовательность расчётов, приводятся промежуточные доказательства и результаты решения всей поставленной задачи.

В заключении формулируются краткие выводы по выполненной контрольной работе, а в её конце приводится список использованных источников информации.

Контрольные работы обучающихся выполняются согласно учебному графику и сдаются преподавателю за месяц до защиты контрольной работы. Преподаватель делает отметку о приеме работы в графике сдачи контрольных работ.

Ведущий преподаватель после проверки на титульном листе ставит оценку («зачтено» или «не зачтено») и подписывается. Выявленные в ходе проверки преподавателем замечания фиксируются на полях работы. Контрольные работы, выполненные с нарушением установленных требований, а также их ксерокопии к рассмотрению не принимаются.

Типичными ошибками, допускаемыми обучающихся при подготовке контрольной работы, являются:

– содержание работы не соответствует цели и поставленным задачам контрольной работы;

– нарушение требований к оформлению контрольной работы;

– использование информации без ссылок на источник;

## ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

При подготовке к *зачету* по дисциплине «Техническая диагностика средств и объектов машиностроения» обучающемуся рекомендуется:

1. повторить пройденный материал и ответить на вопросы, используя конспект и материалы лекций. Если по каким-либо вопросам у студента недостаточно информации в лекционных материалах, то необходимо получить информацию из раздаточных материалов и/или учебников (литературы), рекомендованных для изучения дисциплины «Техническая диагностика средств и объектов машиностроения».

Целесообразно также дополнить конспект лекций наиболее существенными и важными тезисами для рассматриваемого вопроса;

2. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* особое внимание необходимо уделять схемам, рисункам, графикам и другим иллюстрациям, так как подобные гра-

фические материалы, как правило, в наглядной форме отражают главное содержание изучаемого вопроса;

3. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* (в случаях, когда отсутствует иллюстративный материал) особое внимание необходимо обращать на наличие в тексте словосочетаний вида «во -первых», «во-вторых» и т.д., а также дефисов и перечислений (цифровых или буквенных), так как эти признаки, как правило, позволяют структурировать ответ на предложенное задание.

Подобную текстовую структуризацию материала слушатель может трансформировать в рисунки, схемы и т. п. для более краткого, наглядного и удобного восприятия (иллюстрации целесообразно отразить в конспекте лекций – это позволит оперативно и быстро найти, в случае необходимости, соответствующую информацию);

4. следует также обращать внимание при изучении материала для подготовки к *зачету* на словосочетания вида «таким образом», «подводя итог сказанному» и т.п., так как это признаки выражения главных мыслей и выводов по изучаемому вопросу (пункту, разделу). В отдельных случаях выводы по теме (разделу, главе) позволяют полностью построить (восстановить, воссоздать) ответ на поставленный вопрос (задание), так как содержат в себе основные мысли и тезисы для ответа.

.

.

Минобрнауки России
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

**УТВЕРЖДАЮ**
Проректор по учебно-методическому комплексу

_____С.А. Упоров

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ Б1.В.ДВ.03.02 РЕМОНТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Специальность
15.03.01 Машиностроение

программа подготовки бакалавриата
Направленность (профиль)/ специализация
Производство и реновация машин и оборудования

форма обучения: очная, заочная

год набора: 2019

Автор: Горшков Э.В., доцент, к.т.н.

| | |
|---|---|
| Одобрен на заседании кафедры | Рассмотрен методической комиссией факультета |
| Эксплуатации горного оборудования | Горно-механического |
| *(название кафедры)* | *(название факультета)* |
| Зав. кафедрой _____ | Председатель _____ |
| *(подпись)* | *(подпись)* |
| Симисинов Д.И. | Барановский В.П. |
| *(Фамилия И.О.)* | *(Фамилия И.О.)* |
| Протокол № 8 от 17.04.2019 | Протокол № 7 от 19.04.2019 |
| *(Дата)* | *(Дата)* |

Екатеринбург
2019

Комплект оценочных средств дисциплины согласован с выпускающей кафедрой эксплуатации горного оборудования

Заведующий кафедрой _____ Симисинов Д.И.

*подпись*

**СОДЕРЖАНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ……3

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ……..…….5

САМООРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЛИТЕРАТУРОЙ……..…6

ПОДГОТОВКА К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ…… 10

ПОДГОТОВКА К ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫМ ЗАДАНИЯМ
…….....11

ПОДГОТОВКА К ТЕСТИРОВАНИЮ……...……..13

ПОДГОТОВКА К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ……...13

ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ……..14

# ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа в высшем учебном заведении - это часть учебного процесса, метод обучения, прием учебно-познавательной деятельности, комплексная целевая стандартизованная учебная деятельность с запланированными видом, типом, формами контроля.

Самостоятельная работа представляет собой плановую деятельность обучающихся по поручению и под методическим руководством преподавателя.

Целью самостоятельной работы студентов является закрепление тех знаний, которые они получили на аудиторных занятиях, а также способствование развитию у студентов творческих навыков, инициативы, умению организовать свое время.

Самостоятельная работа реализует следующие задачи:

- предполагает освоение курса дисциплины;
- помогает освоению навыков учебной и научной работы;
- способствует осознанию ответственности процесса познания;
- способствует углублению и пополнению знаний студентов, освоению ими навыков и умений;
- формирует интерес к познавательным действиям, освоению методов и приемов познавательного процесса,
- создает условия для творческой и научной деятельности обучающихся;
- способствует развитию у студентов таких личных качеств, как целеустремленность, заинтересованность, исследование нового.

Самостоятельная работа обучающегося выполняет следующие функции:

- развивающую (повышение культуры умственного труда, приобщение к творческим видам деятельности, обогащение интеллектуальных способностей студентов);
- информационно-обучающую (учебная деятельность студентов на аудиторных занятиях, неподкрепленная самостоятельной работой, становится мало результативной);
- ориентирующую и стимулирующую (процессу обучения придается ускорение и мотивация);
- воспитательную (формируются и развиваются профессиональные качества бакалавра и гражданина);
- исследовательскую (новый уровень профессионально-творческого мышления).

Организация самостоятельной работы студентов должна опираться на определенные требования, а, именно:

- сложность осваиваемых знании должна соответствовать уровню развития студентов;
- стандартизация заданий в соответствии с логической системой курса дисциплины;
- объем задания должен соответствовать уровню студента;
- задания должны быть адаптированными к уровню студентов.

Содержание самостоятельной работы студентов представляет собой, с одной стороны, совокупность теоретических и практических учебных заданий, которые должен выполнить студент в процессе обучения, объект его деятельности; с другой стороны - это способ деятельности студента по выполнению соответствующего теоретического или практического учебного задания.

Свое внешнее выражение содержание самостоятельной работы студентов находит во всех организационных формах аудиторной и внеаудиторной деятельности, в ходе самостоятельного выполнения различных заданий.

Функциональное предназначение самостоятельной работы студентов в процессе лекций, практических занятий по овладению специальными знаниями заключается в самостоятельном прочтении, просмотре, прослушивании, наблюдении, конспектировании, осмыслении, запоминании и воспроизведении определенной информации. Цель и планирование самостоятельной работы студента определяет преподаватель. Вся информация осуществляется на основе ее воспроизведения.

Так как самостоятельная работа тесно связана с учебным процессом, ее необходимо рассматривать в двух аспектах:

1. аудиторная самостоятельная работа - лекционные, практические занятия;

2. внеаудиторная самостоятельная работа – дополнение лекционных материалов, подготовка к практическим занятиям, подготовка к участию в деловых играх и дискуссиях, выполнение письменных домашних заданий, Контрольных работ (рефератов и т.п.) и курсовых работ (проектов), докладов и др.

Основные формы организации самостоятельной работы студентов определяются следующими параметрами:

- содержание учебной дисциплины;
- уровень образования и степень подготовленности студентов;
- необходимость упорядочения нагрузки студентов при самостоятельной работе.

Таким образом, самостоятельная работа студентов является важнейшей составной частью процесса обучения.

Методические указания по организации самостоятельной работы и задания для обучающихся по дисциплине «Ремонт технологического оборудования машиностроительных предприятий» обращают внимание студента на главное, существенное в изучаемой дисциплине, помогают выработать умение анализировать явления и факты, связывать теоретические положения с практикой, а также облегчают подготовку к выполнению *контрольной работы* и сдаче *зачета*.

Настоящие методические указания позволят студентам самостоятельно овладеть фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю подготовки, опытом творческой и исследовательской деятельности, и направлены на формирование компетенций, предусмотренных учебным планом поданному профилю.

Видами самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «Ремонт технологического оборудования машиностроительных предприятий» являются:

- повторение материала лекций;
- самостоятельное изучение тем курса (в т.ч. рассмотрение основных категорий дисциплины, работа с литературой);
- ответы на вопросы для самопроверки (самоконтроля);
- подготовка к практическим занятиям;
- подготовка к тестированию;
- подготовка контрольной работы;
- подготовка к зачету.

В методических указаниях представлены материалы для самостоятельной работы и рекомендации по организации отдельных её видов.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

**ТЕМА 1: Организация ремонта машин.**

*1.* Какие системы ремонта машин находят применение на ремонтных предприятиях горной отрасли*?*

2. Какие методы ремонта машин Вы знаете*?*

3.Какие стратегии ремонта оборудования применяются на горнодобывающих предприятиях?

4.Основные элементы системы ППР?

5. Структура ремонтного цикла и формы ее представления.?

6.Существующая система планирования ремонтных работ в горном производстве?

7. Методика расчета графика ППР на планируемый период.

8.Определение трудоемкости ремонтных работ на годовую программу?

9.Расчет штатов ремонтного персонала на парк оборудования?

10. Пути совершенствования системы ППР.

**Тема 2: Подготовка ремонтных работ.**

1. В чем заключается организационная подготовка ремонта?

2.Что включает в себя конструкторская подготовка ремонтных работ?

3.Из чего состоит технологическая подготовка ремонта горного оборудования?

4.Построение линейных графиков ремонта.

5.Кем разрабатываются сетевые графики ремонта машин?

6. Что включают в себя и что дают ремонтному производству сетевые графики ремонта?

7. Классификация и общая характеристика способов восстановления деталей машин?

6. Выбор способа восстановления деталей по технологическому, долговечностному и технико-экономическому критерию?

7.Назовите основные эксплуатационные документы, применяемые для горного оборудования?

8.Руководящие материалы, входящие в состав ремонтной документации?

9.Где и каким образом организовано техническое обслуживание карьерного оборудования?

10.Цели, задачи и состав электромеханической службы карьеров?

**ТЕМА 3: Дефектация и дефектоскопия.**

1.Какова специфика работы машин в условиях горного производства?

2.Основные причины приводящие к потере работоспособности машин?

2. Какие виды трения и износов Вы знаете?

3.Меры борьбы с износами деталей?

4.Допустимый и предельный износы. Критерии определения предельных износов.

4.Причины поломок деталей горных машин?

5.Меры борьбы с деформациями и изломами деталей горного оборудования?

6.Какие признаки выбраковки деталей Вы знаете?

7.Какие методы контроля дефектов деталей применяются при проведении ремонтов на ремонтных базах?

8.Какие средства контроля размеров, формы и взаимного расположения деталей ВЫ знаете?

9.Какие методы не разрушающего контроля находят наибольшее распространение при ремонтах горного оборудования?

10.Сущность дефектации и сортировки деталей

. **ТЕМА4: Технология ремонта типовых деталей.**

1.Классификация и общая характеристика способов восстановления деталей машин.

2.Выбор способа восстановления деталей по технологическому, долговечностному и технико-экономическому критерию.

3.Разработка технологии ремонта валов и осей.

4.Ремонт втулок, подшипников скольжения и качения.

5.Основные дефекты корпусных деталей и их ремонт.

6.Расчет режимов восстановления изношенных поверхностей.

7.Расчет режимов механической обработки восстановленных поверхностей.

8. Каким образом осуществляется прогнозирование технического состояния машин?

9. Какое влияние оказывает режим работы и условия эксплуатации на интенсивность изнашивания?

10.Основные закономерности изнашивания деталей машин

**ТЕМА 5: Приемка машин после ремонта.**

1. Особенности сборки машин после ремонта.

2. Проверка качества сборки и обкатка узлов промышленного оборудования на испытательных стендах.

3.Испытания машин после ремонта в условиях ремонтного предприятия.

4. Порядок проведения работ по приемке оборудования из ремонта.

5.Заполнение паспорта оборудования.
6. Сдача отремонтированных машин заказчику.
7. Состав приемной комиссии.
8. Испытания машин после ремонта в условиях эксплуатации.
9. Обкатка машин после проведения капитального ремонта.
10. Оформление акта приемки.

## САМООРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЛИТЕРАТУРОЙ

Самостоятельное изучение тем курса осуществляется на основе списка рекомендуемой литературы к дисциплине. При работе с книгой необходимо научиться правильно ее читать, вести записи. Самостоятельная работа с учебными и научными изданиями профессиональной и общекультурной тематики– это важнейшее условие формирования научного способа познания.

Основные приемы работы с литературой можно свести к следующим:

• составить перечень книг, с которыми следует познакомиться;

• перечень должен быть систематизированным (что необходимо для семинаров, что для экзаменов, что пригодится для написания курсовых и выпускных квалификационных работ (ВКР), а что выходит за рамками официальной учебной деятельности, и расширяет общую культуру);

• обязательно выписывать все выходные данные по каждой книге (при написании курсовых и выпускных квалификационных работ это позволит экономить время);

• определить, какие книги (или какие главы книг) следует прочитать более внимательно, а какие – просто просмотреть;

• при составлении перечней литературы следует посоветоваться с преподавателями и руководителями ВКР, которые помогут сориентироваться, на что стоит обратить большее внимание, а на что вообще не стоит тратить время;

• все прочитанные монографии, учебники и научные статьи следует конспектировать, но это не означает, что надо конспектировать «все подряд»: можно выписывать кратко основные идеи автора и иногда приводить наиболее яркие и показательные цитаты (с указанием страниц);

• если книга – собственная, то допускается делать на полях книги краткие пометки или же в конце книги, на пустых страницах просто сделать свой «предметный указатель», где отмечаются наиболее интересные мысли и обязательно указываются страницы в тексте автора;

• следует выработать способность «воспринимать» сложные тексты; для этого лучший прием – научиться «читать медленно», когда понятно каждое прочитанное слово (а если слово незнакомое, то либо с помощью словаря, либо с помощью преподавателя обязательно его узнать). Таким образом, чтение текста является частью познавательной деятельности. Ее цель – извлечение из текста необходимой информации.

От того, насколько осознанна читающим собственная внутренняя установка при обращении к печатному слову (найти нужные сведения, усвоить информацию полностью или частично, критически проанализировать материал и т.п.) во многом зависит эффективность осуществляемого действия. Грамотная работа с книгой, особенно если речь идет о научной литературе, предполагает соблюдение ряда правил, для овладения которыми необходимо настойчиво учиться. Это серьёзный, кропотливый труд. Прежде всего, при такой работе невозможен формальный, поверхностный подход. Не механическое заучивание, не простое накопление цитат, выдержек, а сознательное усвоение прочитанного, осмысление его, стремление дойти до сути – вот главное правило. Другое правило – соблюдение при работе над книгой определенной последовательности. Вначале следует ознакомиться с оглавлением, содержанием предисловия или введения. Это дает общую ориентировку, представление о структуре и вопросах, которые рассматриваются в книге.

Следующий этап – чтение. Первый раз целесообразно прочитать книгу с начала до конца, чтобы получить о ней цельное представление. При повторном чтении происходит постепенное глубокое осмысление каждой главы, критического материала и позитивного изложения; выделение основных идей, системы аргументов, наиболее ярких примеров и т.д. Непременным правилом чтения должно быть выяснение незнакомых слов, терминов, выражений, неизвестных имен, названий. Студентам с этой целью рекомендуется заводить специальные тетради или блокноты. Важная роль в связи с этим принадлежит библиографической подготовке студентов. Она включает в себя умение активно, быстро пользоваться научным аппаратом книги, справочными изданиями, каталогами, умение вести поиск необходимой информации, обрабатывать и систематизировать ее.

Выделяют четыре основные установки в чтении текста:

- информационно-поисковая (задача – найти, выделить искомую информацию);
- усваивающая (усилия читателя направлены на то, чтобы как можно полнее осознать и запомнить, как сами сведения, излагаемые автором, так и всю логику его рассуждений);
- аналитико-критическая (читатель стремится критически осмыслить материал, проанализировав его, определив свое отношение к нему);
- творческая (создает у читателя готовность в том или ином виде – как отправной пункт для своих рассуждений, как образ для действия по аналогии и т.п. – использовать суждения автора, ход его мыслей, результат наблюдения, разработанную методику, дополнить их, подвергнуть новой проверке).

С наличием различных установок обращения к тексту связано существование и нескольких видов чтения:

- библиографическое – просматривание карточек каталога, рекомендательных списков, сводных списков журналов и статей за год и т.п.;
- просмотровое – используется для поиска материалов, содержащих нужную информацию, обычно к нему прибегают сразу после работы со

списками литературы и каталогами, в результате такого просмотра читатель устанавливает, какие из источников будут использованы в дальнейшей работе;

- ознакомительное – подразумевает сплошное, достаточно подробное прочтение отобранных статей, глав, отдельных страниц; цель – познакомиться с характером информации, узнать, какие вопросы вынесены автором на рассмотрение, провести сортировку материала;

- изучающее – предполагает доскональное освоение материала; в ходе такого чтения проявляется доверие читателя к автору, готовность принять изложенную информацию, реализуется установка на предельно полное понимание материала;

- аналитико-критическое и творческое чтение – два вида чтения близкие между собой тем, что участвуют в решении исследовательских задач.

Первый из них предполагает направленный критический анализ, как самой информации, так и способов ее получения и подачи автором; второе – поиск тех суждений, фактов, по которым, или, в связи с которыми, читатель считает нужным высказать собственные мысли.

Из всех рассмотренных видов чтения основным для студентов является изучающее – именно оно позволяет в работе с учебной и научной литературой накапливать знания в различных областях. Вот почему именно этот вид чтения в рамках образовательной деятельности должен быть освоен в первую очередь. Кроме того, при овладении данным видом чтения формируются основные приемы, повышающие эффективность работы с текстом. Научная методика работы с литературой предусматривает также ведение записи прочитанного. Это позволяет привести в систему знания, полученные при чтении, сосредоточить внимание на главных положениях, зафиксировать, закрепить их в памяти, а при необходимости вновь обратиться к ним.

Основные виды систематизированной записи прочитанного:

Аннотирование – предельно краткое связное описание просмотренной или прочитанной книги (статьи), ее содержания, источников, характера и назначения.

Планирование – краткая логическая организация текста, раскрывающая содержание и структуру изучаемого материала.

Тезирование – лаконичное воспроизведение основных утверждений автора без привлечения фактического материала.

Цитирование – дословное выписывание из текста выдержек, извлечений, наиболее существенно отражающих ту или иную мысль автора.

Конспектирование – краткое и последовательное изложение содержания прочитанного. Конспект – сложный способ изложения содержания книги или статьи в логической последовательности. Конспект аккумулирует в себе предыдущие виды записи, позволяет всесторонне охватить содержание книги, статьи. Поэтому умение составлять план, тезисы, делать выписки и другие записи определяет и технологию составления конспекта.

Как правильно составлять конспект? Внимательно прочитайте текст. Уточните в справочной литературе непонятные слова. При записи не забудьте

вынести справочные данные на поля конспекта. Выделите главное, составьте план, представляющий собой перечень заголовков, подзаголовков, вопросов, последовательно раскрываемых затем в конспекте. Это первый элемент конспекта. Вторым элементом конспекта являются тезисы. Тезис - это кратко сформулированное положение. Для лучшего усвоения и запоминания материала следует записывать тезисы своими словами. Тезисы, выдвигаемые в конспекте, нужно доказывать. Поэтому третий элемент конспекта - основные доводы, доказывающие истинность рассматриваемого тезиса. В конспекте могут быть положения и примеры. Законспектируйте материал, четко следуя пунктам плана. При конспектировании старайтесь выразить мысль своими словами. Записи следует вести четко, ясно. Грамотно записывайте цитаты. Цитируя, учитывайте лаконичность, значимость мысли. При оформлении конспекта необходимо стремиться к емкости каждого предложения. Мысли автора книги следует излагать кратко, заботясь о стиле и выразительности написанного. Число дополнительных элементов конспекта должно быть логически обоснованным, записи должны распределяться в определенной последовательности, отвечающей логической структуре произведения. Для уточнения и дополнения необходимо оставлять поля.

Конспектирование - наиболее сложный этап работы. Овладение навыками конспектирования требует от студента целеустремленности, повседневной самостоятельной работы. Конспект ускоряет повторение материала, экономит время при повторном, после определенного перерыва, обращении к уже знакомой работе. Учитывая индивидуальные особенности каждого студента, можно дать лишь некоторые, наиболее оправдавшие себя общие правила, с которыми преподаватель и обязан познакомить студентов:

1. Главное в конспекте не объем, а содержание. В нем должны быть отражены основные принципиальные положения источника, то новое, что внес его автор, основные методологические положения работы. Умение излагать мысли автора сжато, кратко и собственными словами приходит с опытом и знаниями. Но их накоплению помогает соблюдение одного важного правила – не торопиться записывать при первом же чтении, вносить в конспект лишь то, что стало ясным.

2. Форма ведения конспекта может быть самой разнообразной, она может изменяться, совершенствоваться. Но начинаться конспект всегда должен с указания полного наименования работы, фамилии автора, года и места издания; цитаты берутся в кавычки с обязательной ссылкой на страницу книги.

3. Конспект не должен быть «слепым», безликим, состоящим из сплошного текста. Особо важные места, яркие примеры выделяются цветным подчеркиванием, взятием в рамочку, оттенением, пометками на полях специальными знаками, чтобы можно было быстро найти нужное положение. Дополнительные материалы из других источников можно давать на полях, где записываются свои суждения, мысли, появившиеся уже после составления конспекта.

## ПОДГОТОВКА К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Подготовка к практическому занятию включает следующие элементы самостоятельной деятельности: четкое представление цели и задач его проведения; выделение навыков умственной, аналитической, научной деятельности, которые станут результатом предстоящей работы. Выработка навыков осуществляется с помощью получения новой информации об изучаемых процессах и с помощью знания о том, в какой степени в данное время студент владеет методами исследовательской деятельности, которыми он станет пользоваться на практическом занятии. Следовательно, работа на практическом занятии направлена не только на познание студентом конкретных явлений внешнего мира, но и на изменение самого себя. Второй результат очень важен, поскольку он обеспечивает формирование таких общекультурных компетенций, как способность к самоорганизации и самообразованию, способность использовать методы сбора, обработки и интерпретации комплексной информации для решения организационно-управленческих задач, в том числе находящихся за пределами непосредственной сферы деятельности студента. Подготовка к практическому занятию нередко требует подбора материала, данных и специальных источников, с которыми предстоит учебная работа. В ходе самого практического занятия обучающиеся выполняют задания и делают выводы по выполненному практическому заданию.

## ПОДГОТОВКА К ТЕСТИРОВАНИЮ

Тесты – это вопросы или задания, предусматривающие конкретный, краткий, четкий ответ на имеющиеся эталоны ответов. При самостоятельной подготовке к тестированию студенту необходимо:

1. готовясь к тестированию, проработать информационный материал по дисциплине; проконсультироваться с преподавателем по вопросу выбора учебной литературы;

2. четко выяснить все условия тестирования заранее. Студент должен знать, сколько тестов ему будет предложено, сколько времени отводится на тестирование, какова система оценки результатов и т. д.;

3. приступая к работе с тестами, внимательно и до конца нужно прочитать вопрос и предлагаемые варианты ответов; выбрать правильные (их может быть несколько); на отдельном листке ответов вписать цифру вопроса и буквы, соответствующие правильным ответам;

- в процессе решения желательно применять несколько подходов в решении задания. Это позволяет максимально гибко оперировать методами решения, находя каждый раз оптимальный вариант;

- не нужно тратить слишком много времени на трудный вопрос, нужно переходить к другим тестовым заданиям; к трудному вопросу можно обратиться в конце;

- обязательно необходимо оставить время для проверки ответов, чтобы избежать механических ошибок.

## ПОДГОТОВКА К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ

Контрольная работа – это письменная работа, выполняемая студентами самостоятельно, преимущественно по общим математическим и естественно-научным, а также специальным дисциплинам, в которой, как правило, решаются конкретные задачи.

Цель контрольной работы – оценка качества усвоения студентами отдельных, наиболее важных разделов, тем и проблем изучаемой дисциплины, умения решать конкретные теоретические и практические задачи.

Контрольная работа, как правило, имеет аналитическую или описательную части, может решать проблемные ситуации путем проведения численного моделирования или расчетов, в том числе с использованием ПК. По типу они могут иметь характер задач, расчётов, алгоритмов, программ и т.п.

Контрольные работы выполняются студентами самостоятельно в соответствие с учебным планом.

Структура контрольной работы зависит от специфики изучаемой дисциплины. В общем виде контрольная работа должна содержать: титульный лист, введение, основную часть и заключение.

Во введении приводится формулировка контрольного задания, кратко излагается цель контрольной работы, место и роль рассматриваемого вопроса (проблемы) в изучаемой учебной дисциплине.

Основная часть контрольной работы должна, как правило, содержать основные определения, обоснования и доказательства, описание методики расчёта (формулы), а также иметь ссылки на используемые источники информации. Материал работы и ее отдельные положения должны быть взаимосвязаны. Основная часть может также включать анализ теории вопроса по теме контрольной работы. Здесь же приводятся исходные данные и значения параметров в соответствии с заданием на контрольную работу. После этого излагается ход рассуждений, описывается последовательность расчётов, приводятся промежуточные доказательства и результаты решения всей поставленной задачи.

В заключении формулируются краткие выводы по выполненной контрольной работе, а в её конце приводится список использованных источников информации.

Контрольные работы обучающихся выполняются согласно учебному графику и сдаются преподавателю за месяц до защиты контрольной работы. Преподаватель делает отметку о приеме работы в графике сдачи контрольных работ.

Ведущий преподаватель после проверки на титульном листе ставит оценку («зачтено» или «не зачтено») и подписывается. Выявленные в ходе проверки преподавателем замечания фиксируются на полях работы. Контрольные

работы, выполненные с нарушением установленных требований, а также их ксерокопии к рассмотрению не принимаются.

Типичными ошибками, допускаемыми обучающихся при подготовке контрольной работы, являются:

– содержание работы не соответствует цели и поставленным задачам контрольной работы;

– нарушение требований к оформлению контрольной работы;

– использование информации без ссылок на источник;

## ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

При подготовке к *зачету* по дисциплине «Ремонт технологического оборудования машиностроительных предприятий» обучающемуся рекомендуется:

1. повторить пройденный материал и ответить на вопросы, используя конспект и материалы лекций. Если по каким-либо вопросам у студента недостаточно информации в лекционных материалах, то необходимо получить информацию из раздаточных материалов и/или учебников (литературы), рекомендованных для изучения дисциплины «Ремонт технологического оборудования машиностроительных предприятий».

Целесообразно также дополнить конспект лекций наиболее существенными и важными тезисами для рассматриваемого вопроса;

2. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* особое внимание необходимо уделять схемам, рисункам, графикам и другим иллюстрациям, так как подобные графические материалы, как правило, в наглядной форме отражают главное содержание изучаемого вопроса;

3. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* (в случаях, когда отсутствует иллюстративный материал) особое внимание необходимо обращать на наличие в тексте словосочетаний вида «во -первых», «во-вторых» и т.д., а также дефисов и перечислений (цифровых или буквенных), так как эти признаки, как правило, позволяют структурировать ответ на предложенное задание.

Подобную текстовую структуризацию материала слушатель может трансформировать в рисунки, схемы и т. п. для более краткого, наглядного и удобного восприятия (иллюстрации целесообразно отразить в конспекте лекций – это позволит оперативно и быстро найти, в случае необходимости, соответствующую информацию);

4. следует также обращать внимание при изучении материала для подготовки к *зачету* на словосочетания вида «таким образом», «подводя итог сказанному» и т.п., так как это признаки выражения главных мыслей и выводов по изучаемому вопросу (пункту, разделу). В отдельных случаях выводы по теме (разделу, главе) позволяют полностью построить (восстановить, воссоздать) ответ на поставленный вопрос (задание), так как содержат в себе основные мысли и тезисы для ответа.

**Министерство образования и науки**
**Российской Федерации**
**ФГБОУ ВО «Уральский государственный**
**горный университет»**

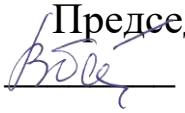
**С. А. Волегов**

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА

***Лабораторный практикум***
**по дисциплине « технологическая оснастка»**
**для студентов направления подготовки**
**15.03.01 «Машиностроение» специализации**
**«Оборудование и технология повышения**
**износостойкости и восстановления деталей**
**машин и аппаратов»**

**Екатеринбург**
**2019**

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**ОДОБРЕНО**
Методической комиссией
горно-механического
факультета УГГУ
Председатель комиссии

проф. В. П. Барановский

Сергей Александрович Волегов

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА

*Лабораторный практикум*
по дисциплине « Технологическое оборудование
машиностроительного производства»
для студентов направления подготовки
15.03.01 «Машиностроение» специализации
«Оборудование и технология повышения износостойкости
и восстановления деталей машин и аппаратов»

Издание УГГУ Екатеринбург, 2019

Волегов С. А. Лабораторный практикум. Руководство по выполнению лабораторных работ по дисциплине «по дисциплине « Технологическое оборудование машиностроительного производства» » для для студентов направления подготовки 15.03.01 «Машиностроение» специализации «Оборудование и технология повышения износостойкости и восстановления деталей машин и аппаратов» Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2017. 83 с.

В руководстве приведены методические указания и приведены краткие теоретические положения, на основе которых решаются отдельные задачи, указывается конкретная справочная и техническая литература, которая должна быть использована при этом. Руководство содержит необходимый объем справочной информации в виде таблиц, для выполнения практических работ.

Руководство по выполнению лабораторных работ рассмотрено на заседании кафедры эксплуатации горного оборудования 2017 г. (протокол № 6 ) и рекомендовано для издания в УГГУ.

Рецензент: А. И. Мамедов канд. техн. наук

© Волегов С. А., 2019
© Уральский государственный горный университет, 2019

# РАБОТА № 1. ИЗУЧЕНИЕ УСТРОЙСТВ, РАСШИРЯЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СТАНКОВ

После того, как получено производственное задание, необходимо решить: с использованием какого оборудования и инструмента можно вести обработку; каким образом закрепить деталь и инструмент на станке; какие средства контроля использовать, чтобы размеры и формы детали соответствовали требованиям чертежа (эскиза).

Могут быть случаи, когда станок не обладает оборудованием, которое необходимо для выполнения задания. Поэтому необходимы устройства, расширяющие технологические возможности имеющихся станков. Так, при отсутствии фрезерного станка несложные фрезерные работы могут быть выполнены на токарном или вертикально-сверлильном станках. На ***специально оборудованном*** вертикально-сверлильном станке может выполняться свыше 50 операций, включающую токарную обработку и фрезерование плоскостей.

***Пример. Приспособления, расширяющие технологические возможности фрезерных станков*** подразделяются на две группы. Приспособления одной группы, такие как дополнительные одно- и многошпиндельные фрезерные головки, головки для фрезерования реек, копировальные приспособления и т.п., не изменяют основного назначения станка, а приспособления другой группы – долбежные, сверлильные и шлифовальные головки – в корне меняют характер выполняемых на станке технологических операций.

*Дополнительная вертикально-фрезерная головка* (рис. 1, *а*), устанавливаемая на горизонтально-фрезерном станке, делает его более универсальным. Головку *2* крепят на вертикальных направляю-

щих *1* станины. Шпиндель *3* головки приводится во вращение от шпинделя станка через зубчатые колеса.

*Приспособление для фрезерования реек* (рис. 1, *б*), закрепляемое на хоботе *4* горизонтально-фрезерного станка, приводится в действие от шпинделя *5* станка. Впадину рейки прорезают фрезой *6* при поперечной подаче стола, а смещение рейки на один шаг выполняется вместе со столом в продольном направлении.

*Двухшпиндельная фрезерная головка* (рис. 1, *в*), может быть использована при обработке заготовки сразу с двух сторон или при фрезеровании ступенчатых поверхностей. В последнем случае один из шпинделей имеет осевое установочное перемещение. В некоторых конструкциях двухшпиндельных фрезерных головок можно регулировать расстояние между осями шпинделей.

*Сверлильная головка* (рис. 1, *г*), установленная на станке, имеет привод шпинделя от электродвигателя *7* через коробку скоростей *8*. Сверлильную головку используют при сверлении малых отверстий, когда необходима большая частота вращения инструмента.

*Шлифовальную головку,* показанную на рис.1, *д*, устанавливают на станине консольно-фрезерного станка, ее шпиндель *11* приводится во вращение шпинделем станка через две ременные передачи, что повышает частоту его вращения.

*Долбежную головку* (рис. 1, *е*) используют на фрезерном станке при отсутствии на производстве долбежного станка. Головку устанавливают на станине горизонтально-фрезерного станка. Ползун *9* с резцом *10* получает возвратно-поступательное движение от шпинделя станка через кривошипно-шатунный механизм.

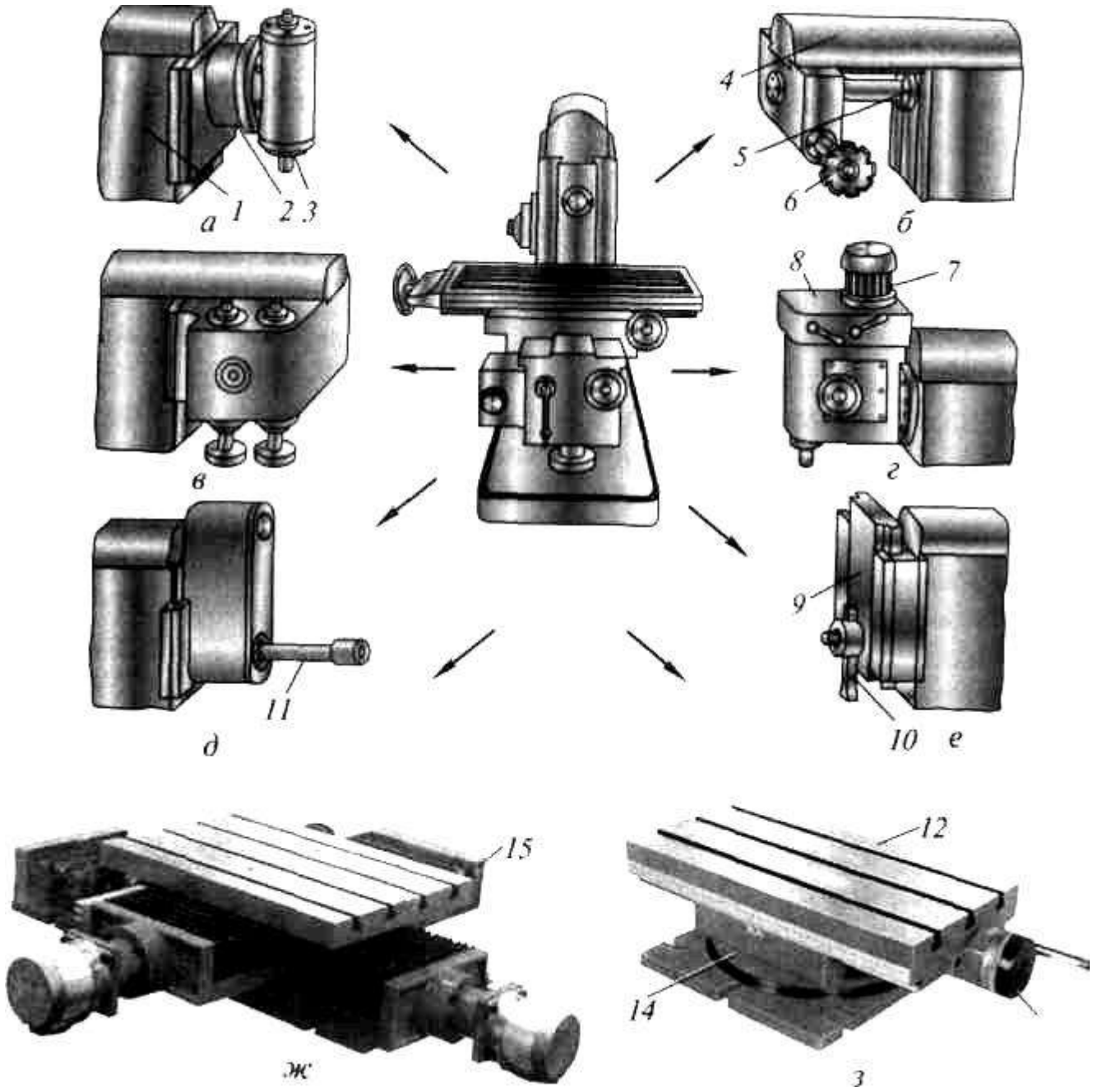



Рис.1. Приспособления, расширяющие технологические возможности фрезерных станков:

*1* – направляющая станины; *2* – вертикально-фрезерная головка; *3,5* – шпиндель;*4* – хобот станка;*5* – шпиндель станка; *6* – фреза; *7* – электродвигатель; *8* – коробка скоростей; *9* – ползун; *10* – резец; *11* – шпиндель шлифовальной головки; *12* – стол для продольных перемещений с пазами;*13* – рукоятка; *14* – поворотный стол;*15* – крестовый стол

Для выполнения работ повышенной точности на универсальных станках нормального класса на стол станка (рис. 1, *ж*) устанавливают

*дополнительный крестовый стол 15*.

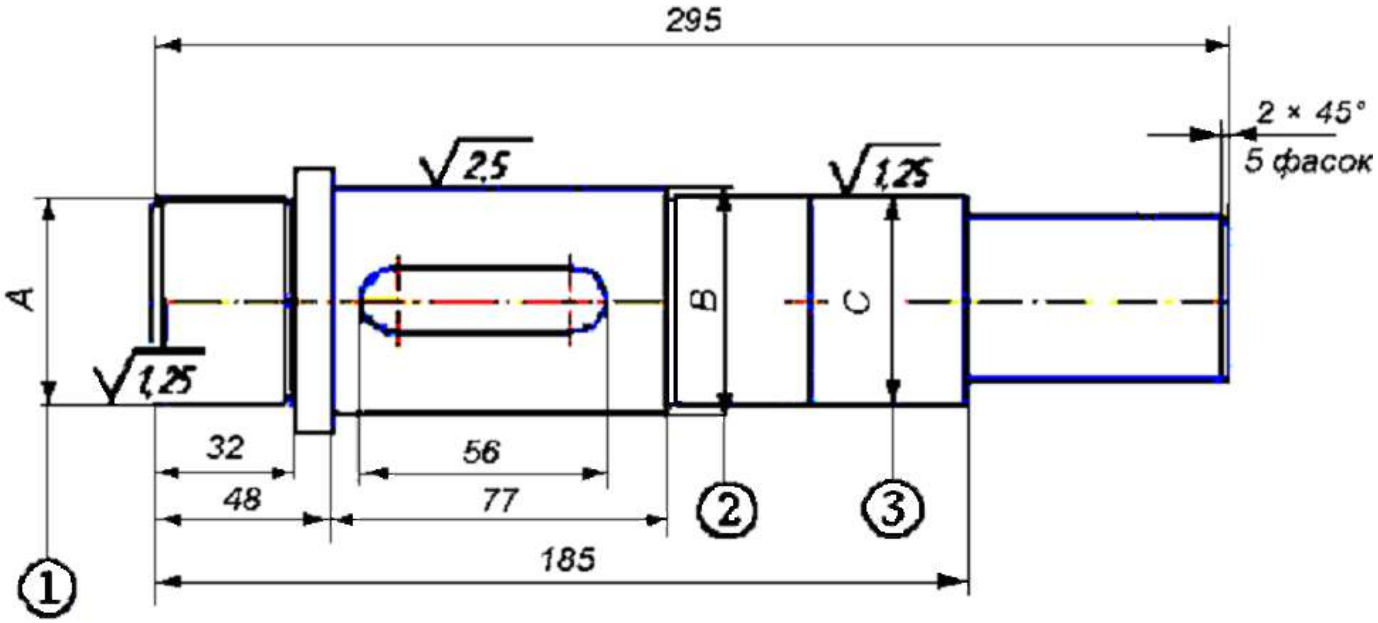
Дальнейшее расширение технологических возможностей горизонтальных и вертикальных фрезерных станков обеспечивает установка на поворотном столе *14* (рис. 1, *з*) *дополнительного стола 12* с пазами для продольных перемещений.

Помощь в выборе и рациональном применении систем станочных приспособлений могут оказать методические указания [2].

## ХОД РАБОТЫ

1. Ознакомиться визуально с конструкциями предлагаемых устройств.
2. Скомпоновать и дать схему устройства, предназначенного для шлифования наружных цилиндрических поверхностей на токарном станке.
3. Подобрать круг (выбрать полную характеристику) и определить режим резания для обработки деталей из заданного материала (по литературе [1]).
4. Скомпоновать и дать схему устройства, предназначенного для обработки (фрезерования) многогранника на токарном станке.
5. Подобрать инструмент и рассчитать режим резания для обработки детали (многогранника) из заданного материала.

6. Данные для расчетов режимов резания брать из табл.1. Для расчета режима резания при обработке детали (многогранника)




принять размеры детали и материал по заданному варианту.

Рис. 2. Эскиз детали

Таблица 1

**Варианты заданий**

| Вариант | поверхность | Диаметр | материал |
|---|---|---|---|
| 1 | 1 | A = 30 | Ст 40 не закаленная |
| 2 | 2 | B = 40 | Ст 35 не закаленная |
| 3 | 3 | C = 50 | Ст 45 не закаленная |
| 4 | 1 | A = 60 | Сталь 40ХНМА закаленная |
| 5 | 2 | B = 70 | Сталь 30ХГС, закаленная |
| 6 | 3 | C = 80 | Ст 40 закаленная |
| 7 | 1 | A = 90 | Ст 40Х закаленная |
| 8 | 2 | B = 100 | Ст 40 Х закаленная |
| 9 | 3 | C = 90 | Ст 45Х закаленная |
| 10 | 1 | A = 80 | Ст 45Х закаленная |
| 11 | 2 | B = 70 | Ст 40Х не закаленная |
| 12 | 3 | C = 60 | Ст 5 не закаленная |

(Форма отчета для лабораторной работы № 1)

Студент _____ Группа _____

Отчет по лабораторной работе № 1
Изучение устройств, расширяющих технологические возможности станков

*Схемы приспособлений*

*Эскиз инструмента с обозначением по ГОСТу*

*Режим резания (расчет)*

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Глинникова Т. П., Волегов С. А.* Пособие по выполнению самостоятельных работ по дисциплине «ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ» ИЗУЧЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И ВЫБОР РЕЖИМА РЕЗАНИЯ (Часть 1) для студентов профилизации «Горные машины и оборудование» направления 150400 – «Технологические машины и оборудование» для студентов очного и заочного обучения Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. 112 с.
2. Методические указания ЕСТТП. Выбор и рациональное применение систем станочных приспособлений. М.: Изд-во стандартов, 1979. – 87 с.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2
# ИЗУЧЕНИЕ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

**Цель работы**: анализ конструкций некоторых рабочих приспособлений.

**Краткие теоретические сведения**

Для правильной работы каждой машины необходимо обеспечить определенное взаимное расположение ее деталей и узлов. При обработке деталей на станках заготовки также должны быть правильно ориентированы относительно механизмов и узлов станков. Погрешности формы и размеров обработанных заготовок определяются отклонениями положений режущих кромок и заготовок от траектории заданного формообразующего движения. Задачи взаимной ориентировки деталей и сборочных единиц в машинах при их сборке и заготовок на станках при изготовлении деталей решаются их базированием.

Под базированием понимается придание заготовке или изделию требуемого положения относительно выбранной системы координат. При механической обработке заготовок на станках базирование осуществляется относительно элементов станка или инструмента. Для обеспечения обработки заготовки необходимо решить две задачи: сориентировать заготовку на станке (обеспечить ее правильное базирование) и закрепить ее в данном положении. Обе эти задачи решаются посредством наложения определенных ограничений (связей) на возможные перемещения заготовки в пространстве. Известно, что для полного исключения подвижности твердого тела в пространстве

необходимо лишить его шести степеней свободы − трех поступательных перемещений вдоль осей координат и трех вращений вокруг указанных осей.

На рис. 3 представлена заготовка призматической формы с наложенными на нее связями в шести опорных точках (т. е. лишенная всех шести степеней свободы). Под опорной точкой понимают идеальную точку контакта заготовки и приспособления, лишающая заготовку одной степени свободы. Поверхности заготовок, используемые для базирования, называются базами. Различают:

- установочную базу − находящуюся в контакте с тремя опорными точками (точки 1, 2 и 3 на рис. 3);
- направляющую базу − находящуюся в контакте с двумя точками (точки 4 и 5);
- упорную базу − находящуюся в контакте с одной точкой (точка 6).

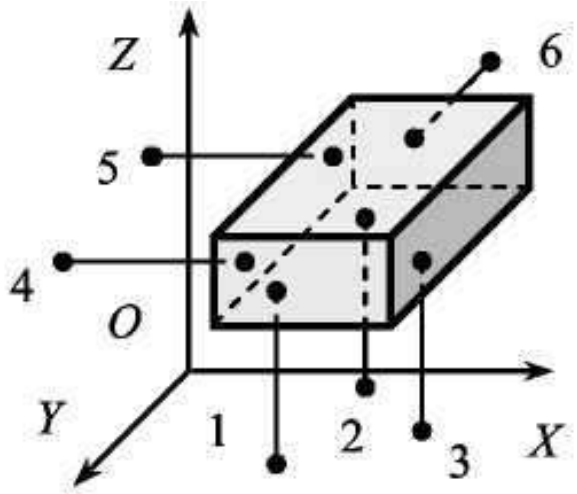



Рис. 3. Схема базирования призматической заготовки

Для повышения точности и надежности ориентировки в качестве установочной базы принимают поверхность с наибольшими раз-

мерами, позволяющими разнести три опорные точки как можно дальше друг от друга. В качестве направляющей базы принимается поверхность, наиболее протяженная по длине.

Для ориентирования тела в пространстве иногда не требуется лишение его всех 6 степеней свободы. Так, например, цилиндрическое тело, в большинстве случаев, допускает вращение вокруг своей оси. Тогда достаточно точно его положение в пространстве определится 5 опорными точками (рис. 4, 5).

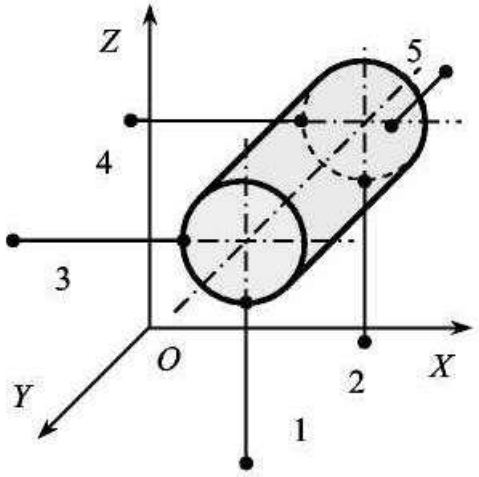



Рис. 4. Схема базирования длинной цилиндрической заготовки

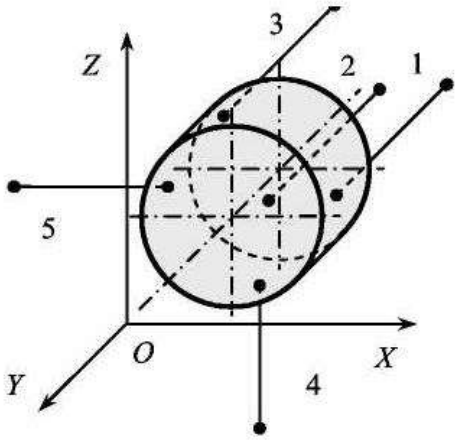



Рис. 5. Схема базирования диска

Для базирования заготовок и изделий в процессе их механической обработки и сборки используются приспособления − вспомогательные устройства, предназначенные для выполнения операций механической обработки, сборки и контроля.

По целевому назначению приспособления делятся:

- на станочные приспособления для установки и закрепления обрабатываемых заготовок на станках. В зависимости от вида обработки различают токарные, фрезерные, сверлильные, расточные, шлифовальные и другие приспособления;

- приспособления для крепления режущего инструмента. Они характеризуются большим числом нормализованных деталей и конструкций, что объясняется нормализацией и стандартизацией самих режущих инструментов; сборочные приспособления используют при выполнении сборочных операций, требующих большой точности сборки и приложения больших усилий; контрольно-измерительные приспособления применяют для контроля заготовок, промежуточного и окончательного контроля, а также для проверки собранных узлов и машин. Контрольные приспособления служат для установки мерительного инструмента;
- приспособления для захвата, перемещения и перевертывания обрабатываемых заготовок, а также отдельных деталей и узлов при сборке.

В зависимости от вида производства, технологических требований станочные приспособления подразделяют:

- на универсальные приспособления (УП) – применяют для оснащения станков, работающих в условиях единичного производства, допускают установку заготовок различной формы и размеров. УП не обеспечивают высокой точности установки заготовок. К ним относятся универсальные, поворотные, делительные столы; самоцентрирующие патроны, тиски, кондукторы;
- универсально-сборные (УСП) − предназначены для оснащения станков, работающих в условиях единичного и мелкосерийного производства, их собирают из взаимозаменяемых узлов состоит из нескольких групп элементов и узлов: 1) базовые элементы, в том числе, плиты, угольники и др.; 2) опорные и корпусные элементы, опоры,

планки, угольники и др.; 3) направляющие и установочные элементы - втулки, шпонки, штыри, колонки и др.; 4) прижимные элементы - прихваты, кулачки и др.; 5) крепежные элементы - болты, гайки, шайбы, штифты и др.; 6) неразборные узлы - зажимные, установочные, силовые и др.;

- сборно-разборные (СРП) − применяют в условиях мелкосерийного и серийного производства, их собирают из нормализованных и стандартизованных узлов и деталей, которые возможно дорабатывать в процессе сборки приспособления, предназначены для крепления однотипных заготовок;
- универсально-переналаживаемые (УПП) – применяются в мелкосерийном и серийном производствах, состоят из корпусных деталей, снабженных сменными наладками, при этом корпусные детали и их приводы сохраняются постоянными, являясь неразборной частью. В состав УПП входят кулачковые и цанговые патроны, тиски, делительные устройства, скальчатые кондукторы, столы и др.;
- специальные (СП) − предназначены для выполнения налаженных операций, закрепленных за определенными станками, разрабатываются на конкретные заготовки для выполнения конкретных операций, обеспечивают высокую точность и быстрое закрепление, используются в условиях массового производства.

Приспособления для токарных и круглошлифовальных станков.

К ним относятся центры, поводковые приспособления, оправки, цанги, люнеты, патроны различных типов.

Центры устанавливают в шпинделе передней бабки токарного или шлифовального станка.

Они подразделяются на следующие типы:

- неподвижные;
- вращающиеся (рис. 6);
- плавающие;
- рифленые

Конусная поверхность центра предназначена для установки детали и имеет угол при вершине 60°, 90°, 120°; хвостовик центра изготавливают с конусом Морзе определенного номера (№ 2, 3, 4, 5, 6).

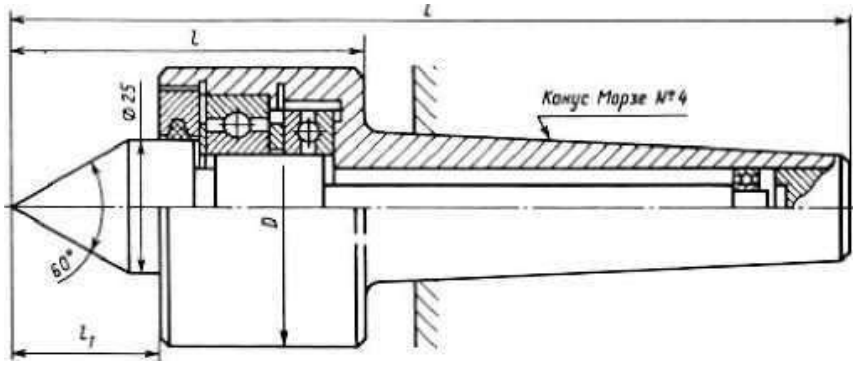



Рис. 6. Задний вращающийся центр для установки детали с центровыми отверстиями

Поводковые приспособления применяют для передачи вращательного движения (крутящего момента) от шпинделя станка к обрабатываемой детали, установленной в центрах, на оправке или в патроне. К поводковым приспособлениям относятся хомутики, поводковые планшайбы, поводковые патроны. Схема точения заготовки *2*, закрепленной в центрах и поводковом патроне *3* с хомутиком *1*, представлена на рис. 7.

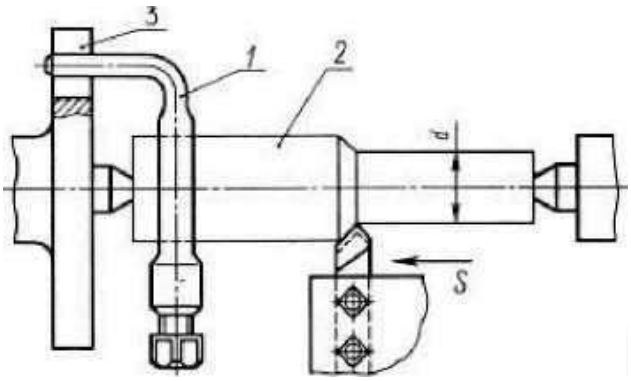



Рис.7. Схема обработки заготовки на токарном станке

Поводковые патроны имеют два или три эксцентриковых кулачка с насечкой, которые в начале обработки под действием сил резания зажимают обрабатываемую деталь, установленную в центрах станка, и передают ей крутящий момент от шпинделя станка; с увеличением крутящего момента резания автоматически увеличивается крутящий момент патрона. Для удобства установки деталей на центры применяют конструкции с автоматически раскрывающимися кулачками.

Кулачковые патроны применяют для установки и зажима различных деталей, обрабатываемых на токарных и шлифовальных станках. В зависимости от количества кулачков патроны разделяют на двух-, трех- и четырехкулачковые.

Наибольшее применение имеют универсальные трехкулачковые спирально-реечные патроны с плоской спиралью и ручным ключевым зажимом (рис. 8). В корпусе 1 патрона расположен диск 2, имеющий на одном конце коническое зубчатое колесо, на другом − спиральные реечные пазы, находящиеся в зацеплении с рейками 3. В крестообразном пазу реек 3 устанавливают и закрепляют винтами 4 прямые или обратные накладные кулачки. При вращении

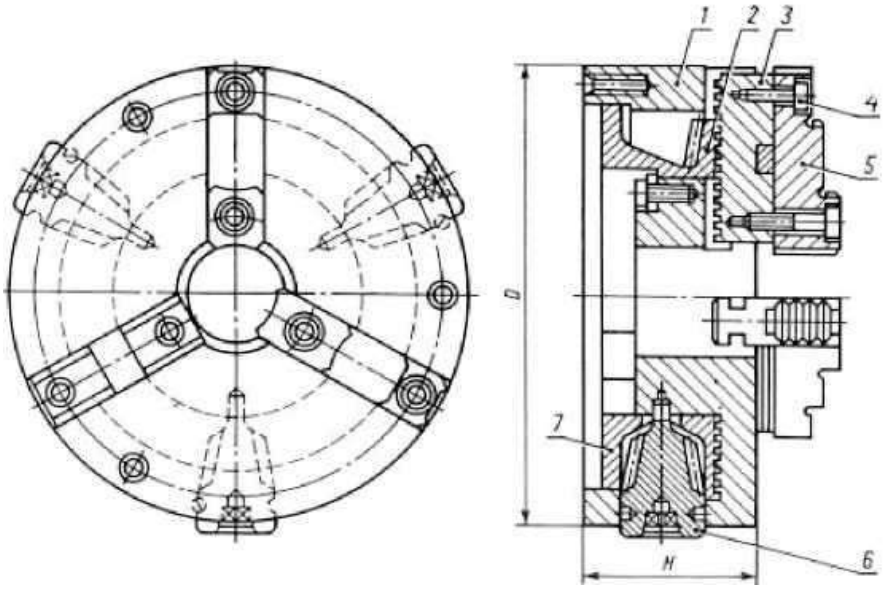



Рис. 8. Трехкулачковый спирально-реечный самоцентрирующий патрон

торцовым ключом одного из трех конических зубчатых колес 6, находящихся в зацеплении с коническим зубчатым венцом диска 2, последний поворачивается и перемещает рейки 3 с кулачками 5 к оси патрона при зажиме детали и от оси − при ее освобождении. Крышка 7 удерживает диск 2 в корпусе патрона от продольного смещения и препятствует попаданию в патрон стружки и грязи.

Цанговые патроны используются для закрепления заготовок из сортового проката простой геометрической формы. Основным элементом такого патрона является цанга -разрезная пружинящая втулка. Конструкция цангового патрона с центрированием по наружному диаметру заготовки с выдвижной цангой представлена на рис. 7 (N - осевая сила; Q - радиальная сила, действующая на деталь; Q1 - сила

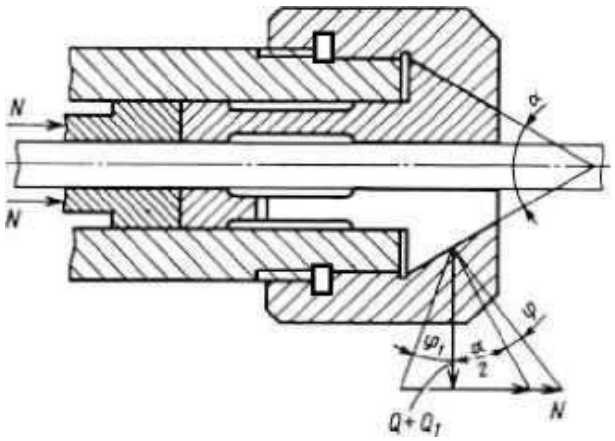



Рис. 9. Цанговый патрон с выдвижной цангой

предварительного сжатия лепестков цанги; α = 30 ... 40° – угол при вершине конуса цанги; φ = 6...8° – угол трения).

Оправки применяют для установки деталей по центральному отверстию. К таким деталям относятся втулки, гильзы, кольца, зубчатые колеса, обрабатываемые на многорезцовых, шлифовальных и других станках. Зажим и разжим детали на оправке производится механизированным приводом. В зависимости от способа закрепления оправки на станке различаются центровые, шпиндельные и фланцевые оправки.

Центровые оправки имеют центровые отверстия, которыми они устанавливаются на центры токарных, шлифовальных и других металлорежущих станков. Они могут иметь коническую рабочую поверхность для обеспечения высокой точности центрирования (рис. 10, *а*). Для установки деталей с зазором (рис.10, *б*) или натягом используется гладкая оправка, на цилиндрической части которой устанавливают обрабатываемую деталь.

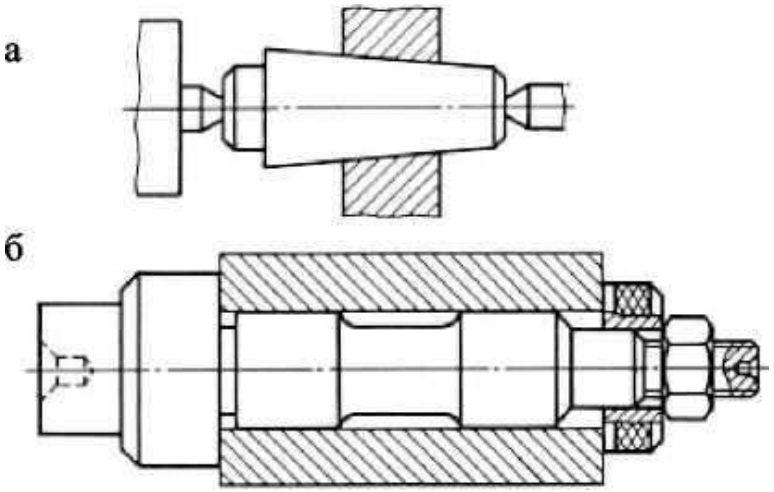



Рис. 10. Центровые оправки для установки цилиндрических заготовок в центрах на токарном станке

Шпиндельные оправки конической частью вставляются в корпус шпинделя станка. Для обеспечения высокой концентричности наружных и внутренних поверхностей применяется оправка с разрезной втулкой, на которой устанавливают и зажимают обрабатываемую деталь (рис.11).

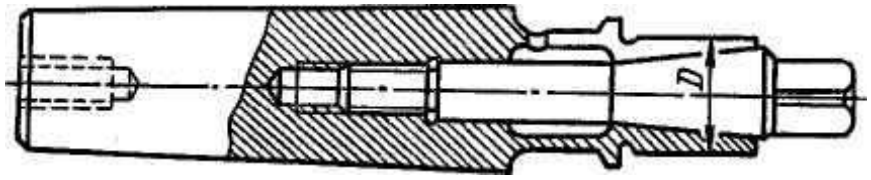


Рис. 11. Шпиндельная разжимная оправка

Люнеты (рис. 12) применяют в качества дополнительных опор при обработке нежестких валов. Используются универсальные неподвижные или подвижные люнеты с раздвижными кулачками и специальные, предназначенные для обработки определенных деталей или для поддержания приспособления, установленного на шпинделе станка и имеющего большой вылет.

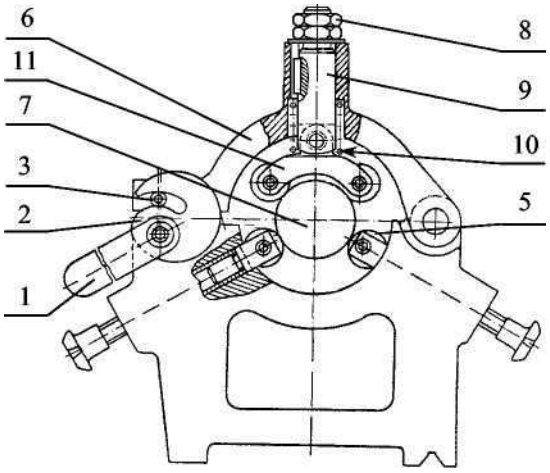



Рис. 12. Неподвижный универсальный люнет

В корпус 4 люнета установлены два шарикоподшипника 5. В отверстие крышки 6 вставлен валик 9 с пружиной, на конце валика подвижно закреплена серьга 11с двумя шарикоподшипниками 5. При закреплении обрабатываемого вала 7 опускают крышку 6 люнета и верхней гайкой 8 регулируют положения валика 9. Рукояткой 1 поворачивают эксцентрик 2, в спиральный паз которого входит штифт 3, установленный в крышке 6, и крышка перемещается к центру люнета. При этом пружина 10 прижимает серьгу 11с верхними подшипниками к валу и он зажимается между верхними и нижними подшипниками.

Приспособления для сверлильных станков

Кондукторы предназначены для установки деталей, обрабатываемых на сверлильных станках, имеют кондукторные втулки для направления режущего инструмента.

Кондукторные втулки (рис. 13) служат для направления режущего инструмента при обработке отверстий в деталях на сверлильных, агрегатных и расточных станках. Кондукторные втулки классифицируются на постоянные без буртика и с буртиком (рис. 11, а) и

сменные с буртиком (рис. 11, б, в). При обработке деталей с направлением режущего инструмента кондукторными втулками необходимо применять охлаждение для предупреждения большого нагревания инструмента и возможности его заедания во втулке. Кондукторные плиты служат для установки в их отверстиях кондукторных втулок.

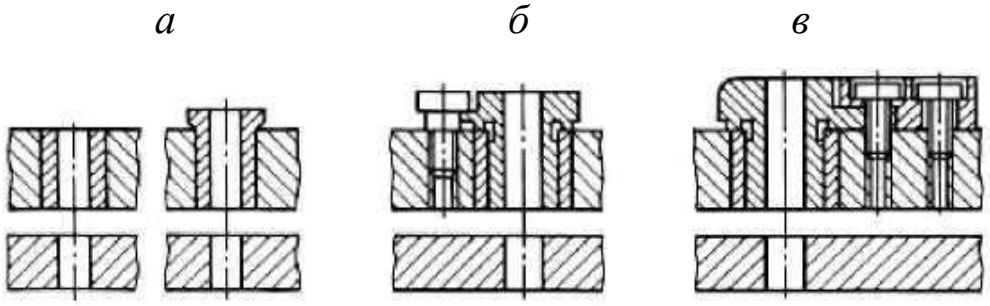



Рис. 13. Кондукторные втулки

Различают кондукторы накладные, стационарные, передвижные, поворотные. Наиболее широко применяются скальчатые кондукторы консольного и портального типов, с ручным или пневматическим зажимом (рис. 14).

В конструкции любого скальчатого кондуктора входят постоянные и сменные узлы (наладки). Постоянная часть кондуктора состоит из двух или трех расположенных в корпусе скалок, несущих кондукторную плиту, механизма для перемещения скалок и зажима обрабатываемых деталей. Сменные наладки проектируются в соответствия с конфигурацией обрабатываемых деталей и состоят из установочно-зажимных узлов и сменной кондукторной плиты с комплектом кондукторных втулок.

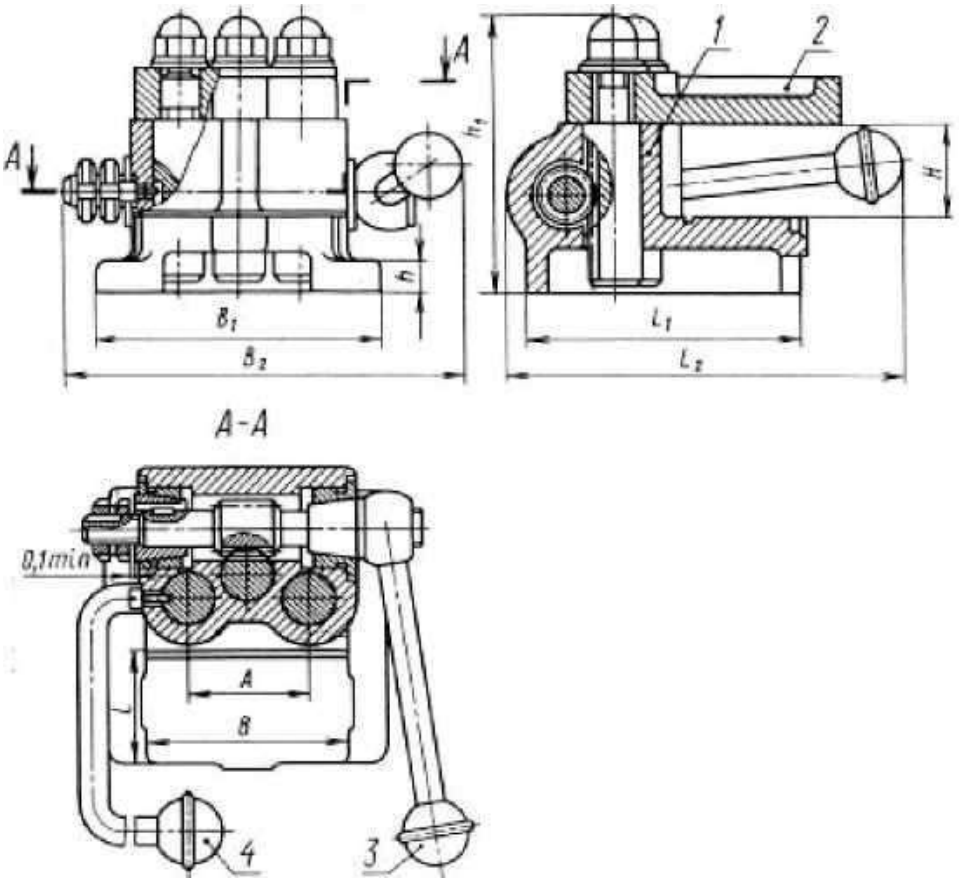



Рис. 14. Кондуктор скальчатый с конусным зажимом

В отверстиях корпуса 1 скользят три скалки, на которых гайками закреплена кондукторная плита 2. Средняя скалка-рейка с косыми зубами связана с зубчатым валиком. Правый конец этого валика имеет конический участок, а на левом конце его на шпонке смонтирована конусная втулка. Оба конуса притерты в конических отверстиях крышек. Опускание плиты 2 осуществляется рукояткой 3.

В момент контакта плиты с обрабатываемой деталью скалка-рейка останавливается. При дальнейшем нажиме на рукоятку горизонтальная составляющая реакции со стороны скалки-рейки на зубчатый валик смещает его влево, затягивает первый конусный замок и стопорный механизм. Для освобождения детали и подъема плиты ру-

коятку вращают в обратную сторону. Горизонтальная составляющая реакции зубца скалки на зубец валика изменяет свое направление и выжимает конический участок валика из конического гнезда крышки, что дает возможность поднять плиту. В ее крайнем верхнем положении скалка-рейка, действуя на зубчатый валик, смещает его вправо, при этом коническая втулка затягивается в гнездо крышки и срабатывает левый самотормозящийся конусный замок, удерживая плиту в верхнем положении.

Приспособления для фрезерных станков

Приспособления, применяемые во фрезерных станках можно разделить на приспособления для закрепления заготовок, приспособления для закрепления фрез и приспособления, расширяющие технологические возможности фрезерных станков.

Станочные тиски являются универсальным приспособлением, их применяют для базирования различных по форме и размерам деталей. Тиски имеют постоянные детали (корпус, салазки, механизм зажима) и сменные губки, которые используют при обработке деталей различных типоразмеров. По конструкции механизма зажима тиски различаются на винтовые и эксцентриковые. По типу силового привода - с ручным приводом, с механическим приводом, пневматические, пневмогидравлические, гидравлические. Кроме того, тиски бывают поворотные и неповоротные.

Тиски станочные с эксцентриковым зажимом и одной подвижной губкой (рис. 15) имеют корпус 1, по направляющим которого перемещается подвижная губка 2 с помощью ходового

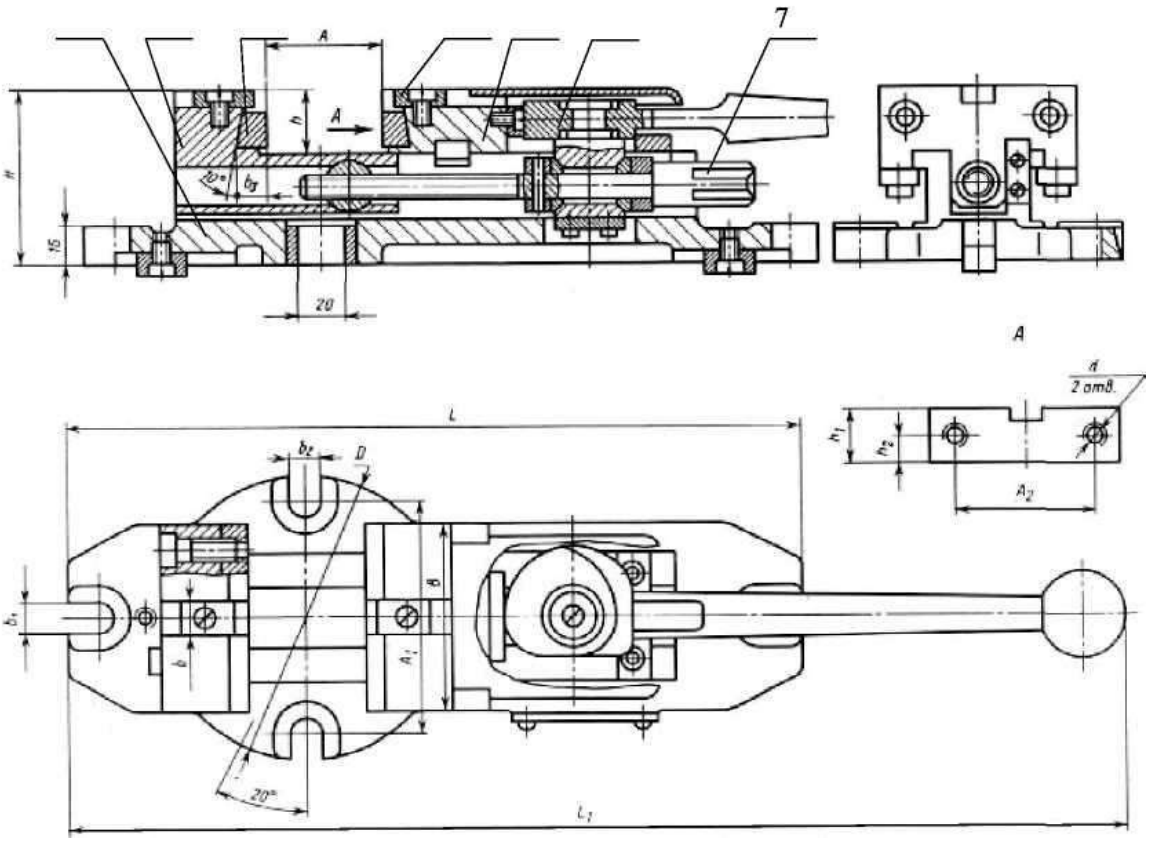
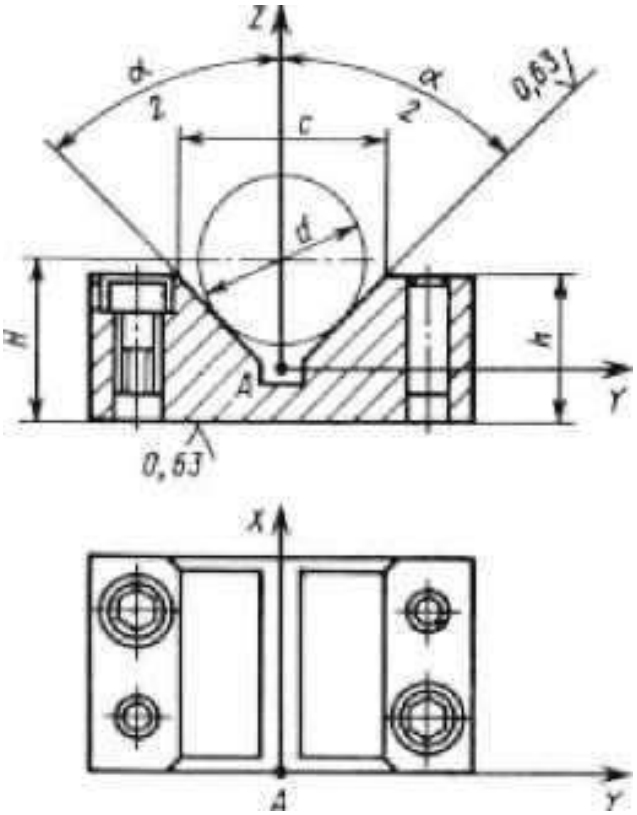



Рис. 15. Тиски станочные с эксцентриковым зажимом и одной подвижной губкой

винта 7 (при наладке тисков) и эксцентрика 6 с рукояткой (в процессе эксплуатации тисков). Деталь закрепляется между опорными поверхностями подвижной губки 2 и неподвижной губки 5. Накладные губки 3 выполняются в соответствии с формой зажимаемой детали и фиксируются с помощью накладных шпонок 4. Тиски могут устанавливаться непосредственно на стол станка или крепиться с помощью подставок.

Для базирования деталей, имеющих цилиндрические поверхности, используют опорные призмы различных конструкций. Призмы (рис. 16) применяются для базирования коротких заготовок или как элемент опорной сборной призмы, предназначенной для базирования

длинных заготовок. При установке деталей по черновой базе, а также при установке ступенчатых валов рабочие поверхности призм делают узкими




.Рис. 16. Призма для установки цилиндрических заготовок по обработанным поверхностям

Для расширения технологических возможностей фрезерных станков используют различные приспособления, позволяющие сообщить детали дополнительные рабочие или вспомогательные движения. К ним относятся круглые поворотные столы, делительные головки с прерывистым и непрерывным поворотом и др.

Делительные головки применяют для установки, зажима и периодического поворота заготовок на требуемый угол или для их непрерывного вращения при фрезеровании винтовых канавок.

Конструкции делительных головок весьма разнообразны, хотя

состоят из одних и тех же частей: корпуса, поворотной части, делительного механизма (фиксатора) и механизма зажима поворотной части.

Наиболее распространена универсальная лимбовая делительная головка (рис. 17, *а, б*). Она состоит из корпуса 1, делительного лимба5, поворотного барабана 2 и шпинделя 4 с центром. В корпусе на шпинделе жестко закреплено червячное зубчатое колесо (обычно с числом зубьев $z$ = 40), находящееся в зацеплении с однозаходным червяком ($k$ = 1). Вращение шпинделю сообщают рукояткой 6. Поворот рукоятки и соответственно заготовки на требуемый угол осуществляется с помощью лимба 5. Для удобства отсчета используют раздвижной сектор 7. На шпинделе 4 закреплен лимб 3 для непосредственного деления заготовки на части.

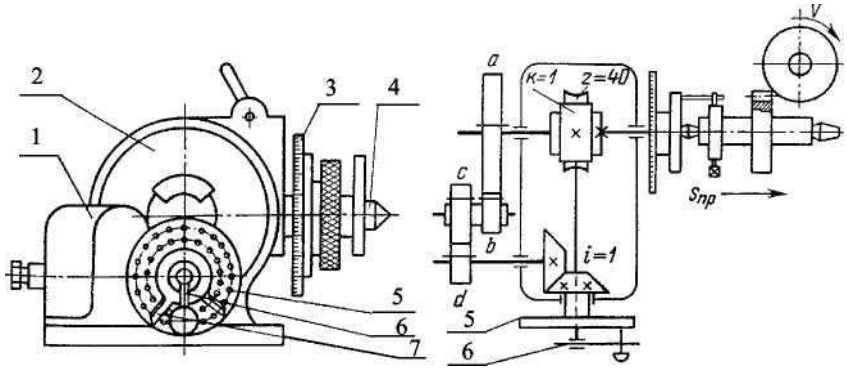



Рис. 17. Универсальная делительная головка

Винтовые канавки фрезеруют при непрерывном вращении шпинделя делительной головки, которое он получает от винта продольной подачи стола универсально-фрезерного станка через сменные зубчатые колеса *a, b, c* и *d.*

Установка и зажим обрабатываемых деталей в делительных головках обычно производятся с помощью центров (при наличии зад-

ней бабки), трехкулачковых патронов, цанг и других центрирующих устройств, монтируемых на шпинделе головки.

Необходимое оборудование, приспособление, инструмент, материалы

Задний центр.

Хомутики.

Оправки.

- Люнет.

Трехкулачковый патрон.

Кондуктор.

Машинные тиски.

Делительные головки.

**Правила техники безопасности**

Выполнять только порученное задание.

Бережно относиться к приборам и оборудованию.

По окончании работы убрать за собой рабочее место.

Порядок выполнения работы

1. Подобрать станочное приспособление для закрепления детали в соответствии с вариантом (табл. 1).

Таблица 1

| Номер варианта | Эскиз детали | Номер варианта | Эскиз детали | Номер варианта | Эскиз детали |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Рис. 16 * | 6 | Рис. 21 * | 11 | Рис. 26 * |
| 2 | Рис. 17 * | 7 | Рис. 22 * | 12 | Рис. 27 * |
| 3 | Рис. 18 * | 8 | Рис. 23 * | 13 | Рис. 28 * |
| 4 | Рис. 19 * | 9 | Рис. 24 * | 14 | Рис. 29 * |
| 5 | Рис. 20 * | 10 | Рис. 25 * | 15 | Рис. 30 * |

* Неуказанные предельные отклонения размеров: H14, h14, ±IT14/2.

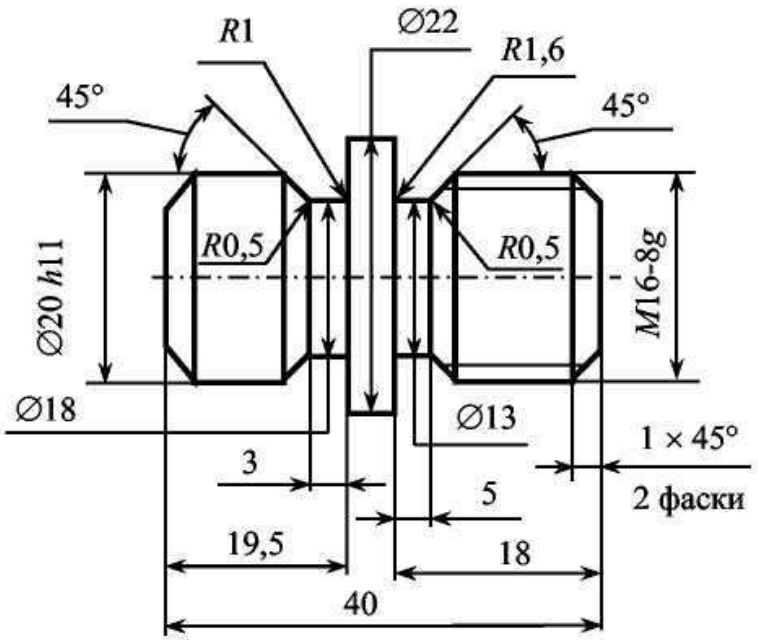
Указать наименование приспособления, охарактеризовать его назначение и область применения.

Вычертить схематический эскиз рабочих элементов приспособления.

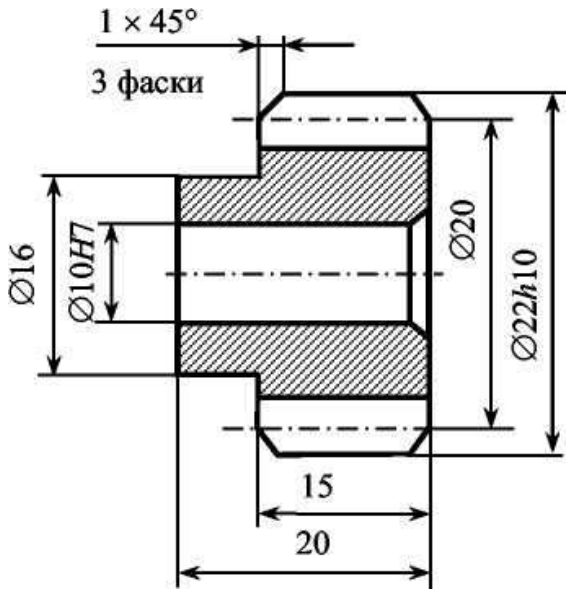
Описать устройство и работу приспособления с указанием применяемого станка, режущего инструмента.

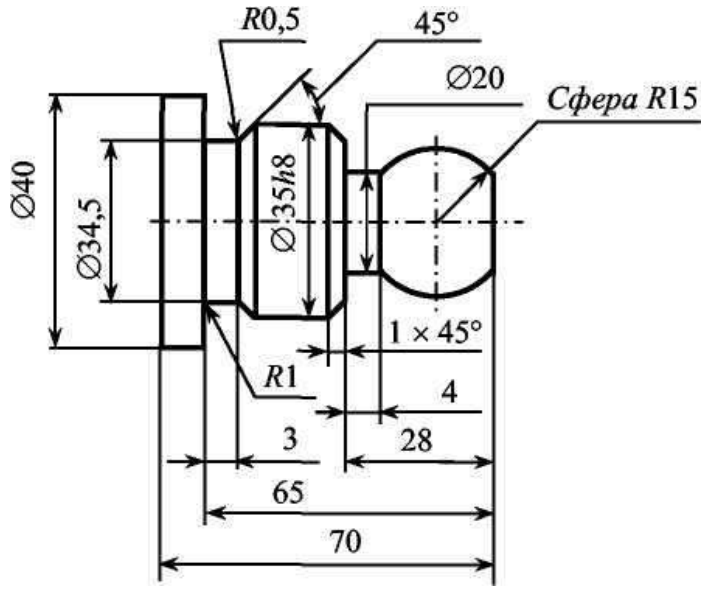
Содержание отчета

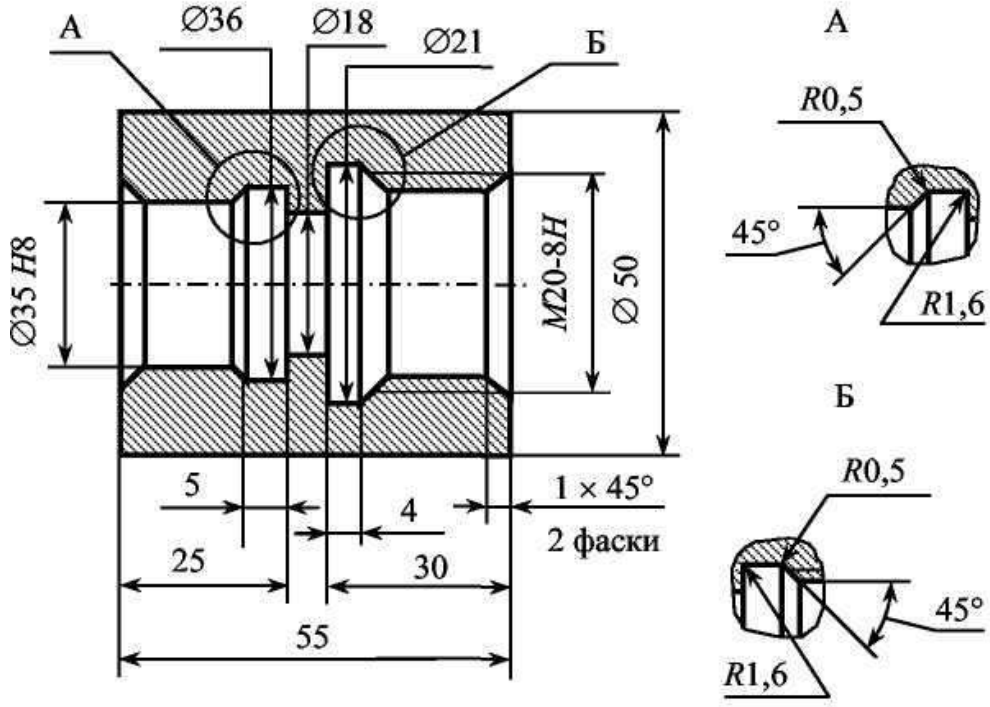
1. Отчет должен быть оформлен на листах формата А4.
2. В отчете должны быть приведены: цель работы, эскиз детали и приспособления, наименование, назначение и область применения приспособления, описание его устройства и работы. и деталей. Комплекты УСП стандартизованы, каждый комплект
3. Эскизы детали и приспособления должны быть выполнены в соответствии с правилами оформления технологического документа - карты эскизов КЭ **[13].**




| | |
|---|---|
| Модуль, мм | 1 |
| Число зубьев | 20 |




R0,5
45°
∅20
Сфера R15
∅40
∅34,5
∅35h8
1 × 45°
R1
4
3
28
65
70


А
∅36
∅18
∅21
Б
∅35 H8
M20-8H
∅ 50
5
4
1 × 45°
2 фаски
25
30
55


А
R0,5
45°
R1,6
Б
R0,5
45°
R1,6

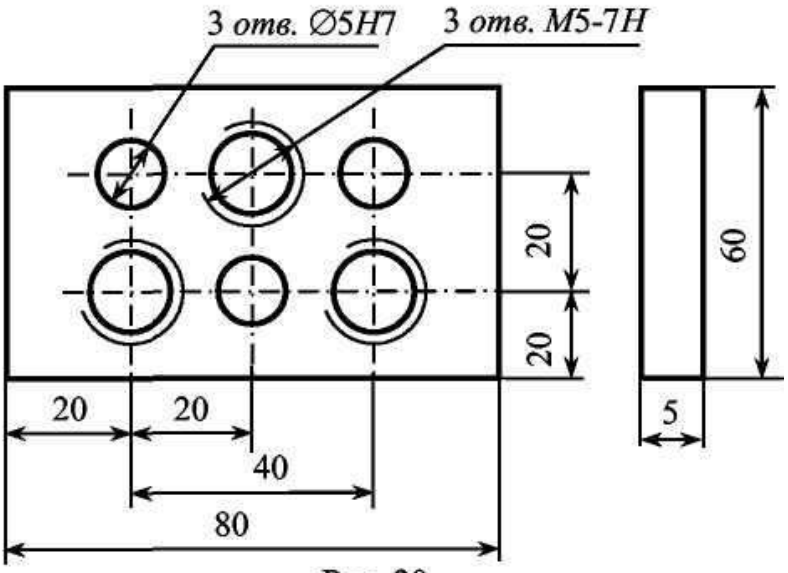
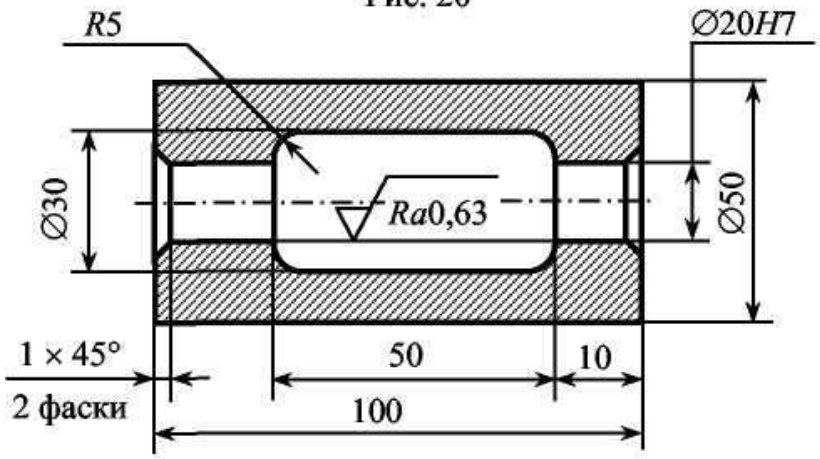
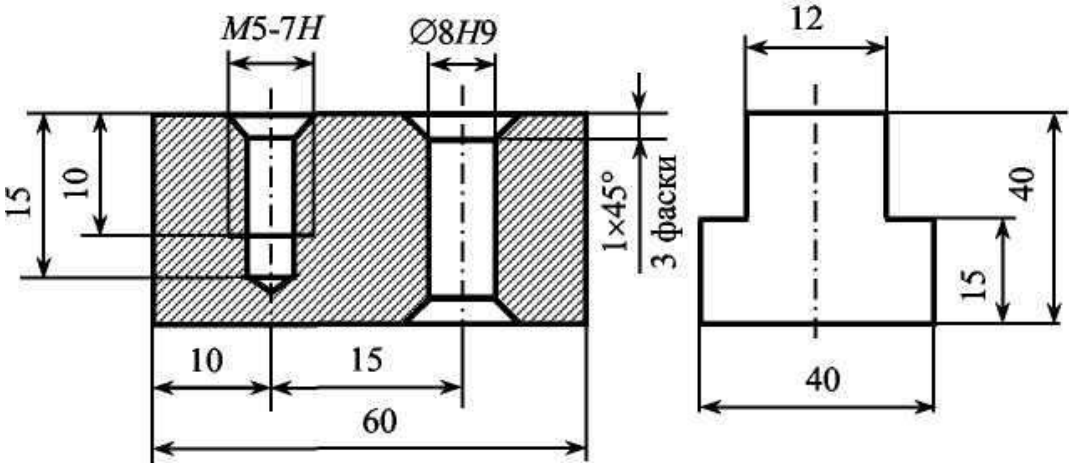
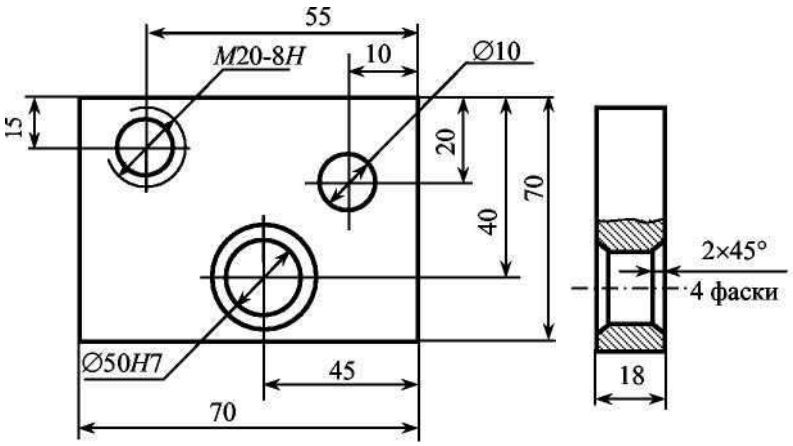
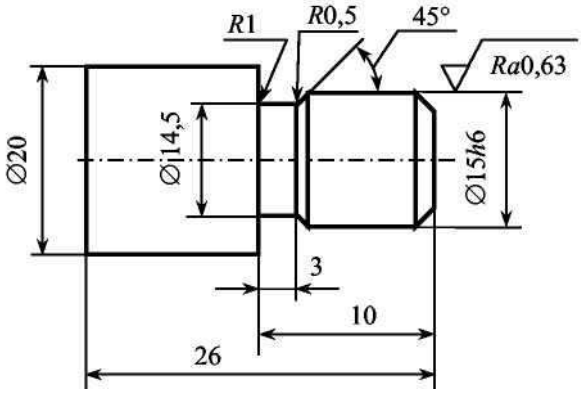

3 отв. ∅5H7
3 отв. M5-7H
20
20
60
20
20
40
80
5

Рис. 20


R5
∅20H7
∅30
Ra0,63
∅50
1 × 45°
2 фаски
50
10
100


M5-7H
∅8H9
12
15
10
1×45°
3 фаски
40
15
10
15
40
60


55
M20-8H
10
∅10
15
20
40
70
2×45°
4 фаски
∅50H7
45
70
18


R1
R0,5
45°
Ra0,63
∅20
∅14,5
∅15h6
3
10
26

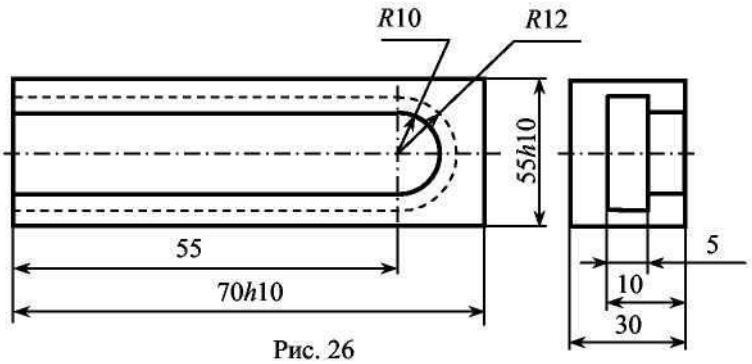

R10
R12
55h10
55
70h10
5
10
30

Рис. 26

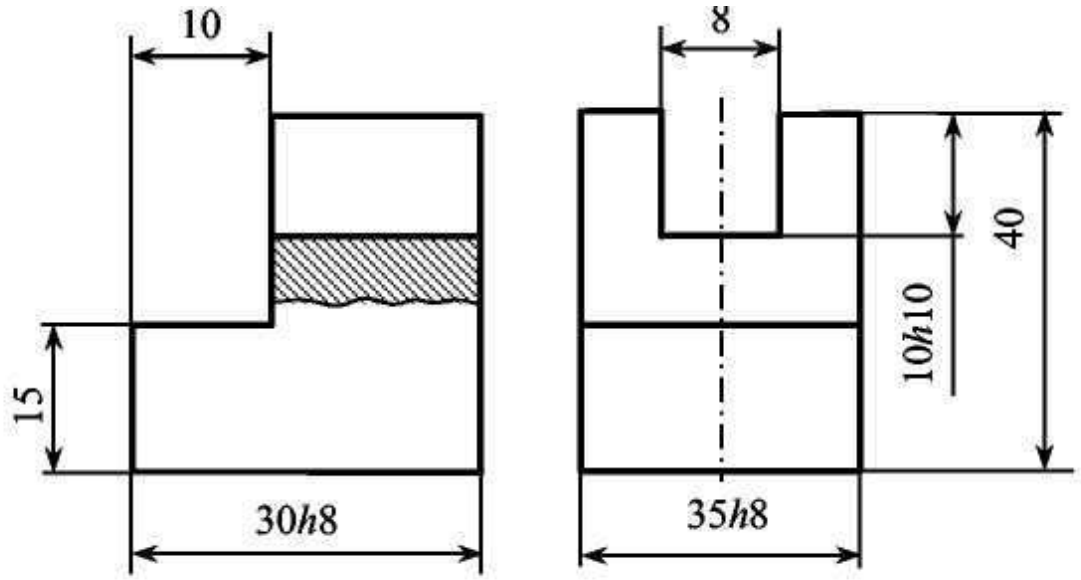

10
8
40
10h10
15
30h8
35h8

Рис. 27

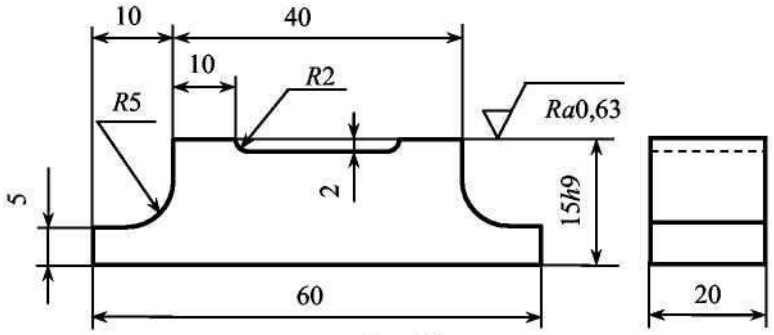
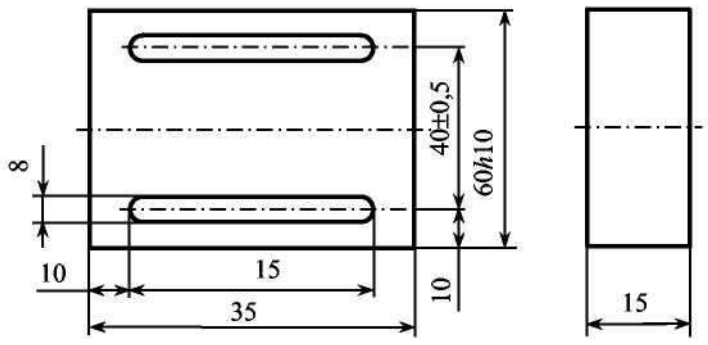
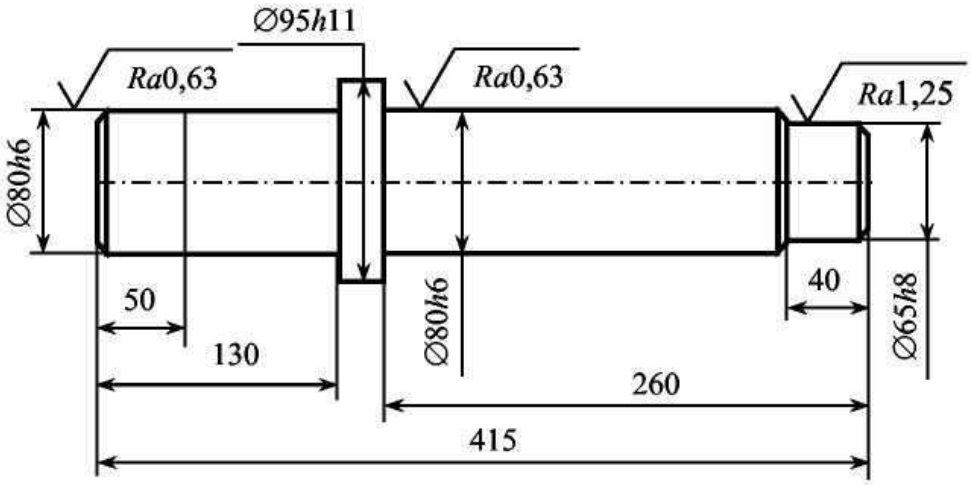
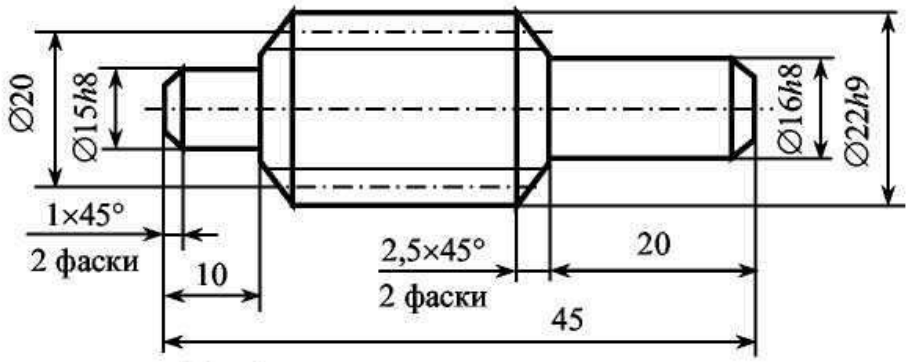

10
40
10
R2
R5
Ra0,63
5
2
15h9
60
20

Рис. 28


40±0,5
60h10
8
10
15
35
10
15




| | |
|---|---|
| Модуль, мм | 1 |
| Число зубьев | 20 |

Рис. 30

## Контрольные вопросы

1. Что называется станочным приспособлением?

2. Каковы преимущества применения приспособлений в технологическом процессе?

3. Какие приспособления используются для токарных и круглошлифовальных станков?

4. Каков принцип действия универсального трехкулачкового спирально-реечного патрона?

5. В чем особенности конструкции скальчатых кондукторов?

6. Какие виды тисков применяются на фрезерных станках?

7. Какие виды приспособлений используются для фрезерных станков?

8. Каково устройство и принцип действия делительной головки?

# РАБОТА № 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕРЖИВАЮЩЕГО УСИЛИЯ ЗАЖИМНОГО УСТРОЙСТВА

**Цель работы**: определение усилия зажима заготовки $P_З$.

**Краткие теоретические сведения**

Основными элементами приспособлений являются установочные, зажимные, направляющие, делительные (поворотные), крепежные детали, корпуса и механизированные приводы.

Их назначение следующее:

*установочных элементов* - определение положения обрабатываемой заготовки относительно приспособления и относительно режущего инструмента;

*зажимных элементов* - закрепление обрабатываемой заготовки;

*направляющих элементов* - осуществление требуемого направления движения инструмента;

*делительных или поворотных элементов* - точное изменение положения обрабатываемой поверхности заготовки относительно режущего инструмента;

*крепежных элементов* - соединение отдельных элементов между собой;

*корпусов приспособлений* (как базовых деталей) - размещение на них всех элементов приспособлений;

*механизированных приводов* - автоматическое закрепление обрабатываемой заготовки.

Установка заготовок в приспособлениях включает в себя их ба-

зирование и закрепление. Для точной обработки заготовок необходимо осуществлять ее правильное расположение в приспособлении по отношению к устройствам оборудования, определяющим траекторию движения инструмента или самой заготовки, обеспечивать постоянство контакта баз с опорными точками. Силы закрепления заготовки должны предотвращать возможный отрыв заготовок от установочных элементов приспособления, сдвиг или поворот ее под действием сил резания и обеспечить надежное закрепление в процессе обработки.

Силы резания и их моменты определяют по формулам теории резания или по данным нормативных справочников. Силы закрепления должны быть достаточными с некоторым коэффициентом запаса, который рассчитывают как произведение коэффициентов, учитывающих условия обработки.

При конструировании станочного приспособления необходимо произвести расчет усилия зажима $P_З$. Полученное значение $P_З$ используется при выполнении расчетов на прочность элементов зажимных устройств и силовых приводов. Величина усилия зажима определяется, исходя из значений сил резания, условий обработки и состояния поверхностей зажимных устройств.

*Определение усилия зажима при точении в зависимости от схемы закрепления деталей в патроне и на оправке*

1. Усилие зажима при обтачивании валика с закреплением в патроне (рис. 31)

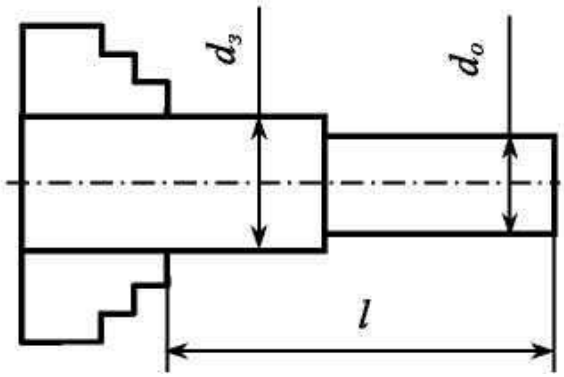



Рис. 31. Схема закрепления заготовки в патроне

При закреплении валика в патроне величина усилия зажима зависит от отношения $l/d_з$ и $dз/d_о$, где l - вылет заготовки - из патрона, $d_з$ - диаметр заготовки, $d_о$ - диметр обработанной поверхности. Чем больше отношение $l/d_з$ и $dз/d_о$, тем больше должно быть усилие зажима.

Составляющие силы резания сводятся к одной результирующей силе $R$, стремящейся сдвинуть заготовку вдоль оси и повернуть вокруг нее:

$$R = k\sqrt{P_z^2\left(\frac{d_з}{d_о}\right)^2 + P_x^2}$$

где $P_x$, $P_z$ - составляющие силы резания вдоль осей $x$, $z$ соответственно; $k$ - коэффициент надежности закрепления, учитывающий влияние составляющей $P_y$, вылета заготовки из патрона, а также непрерывные изменения величины и направления действующих сил, выбирается из табл. 2.

Таблица 2

| $l/d_з$ | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 |
|---|---|---|---|---|
| $k$ | 1,0 | 1,5 | 2,5 | 4,0 |

Усилие зажима на кулачки патрона $P_з$ равно:

где $\mu$ - коэффициент сцепления, зависящий от характера опорной поверхности (для гладких кулачков 0,25; для рифленых -0,3.… 0,5); z - количество кулачков.

2. Усилие зажима при обтачивании закрепленной на цанговой оправке (рис. 32) заготовки

Усилие зажима определяется следующим образом

$$P_з = \frac{k}{\mu}\sqrt{\left(\frac{2M_{рез}}{d_з}\right)^2 + P_x{}^2 tg(\alpha+\varphi)},$$

где $\mu$ - коэффициент сцепления, равный 0,3….. 1; $\kappa$ - коэффициент надежности, равный 1,2… 1,5; $M_{рез}$ - момент резания, равный $P_z$-$r$; $r$ - расстояние от оси до точки приложения силы резания; $a$ - половина угла при вершине конуса цанги; <$p$ - угол трения в цанге

{$tg(p$ = 0,2); $d_з$ - зажимаемый диаметр заготовки.

3. Усилие зажима при обтачивании втулки, закрепленной на жесткой оправке с торцовым зажимом (рис. 33)

$$P_з = \frac{k}{\mu}\sqrt{\left(\frac{2M_{рез}}{d_з}\right)^2}$$

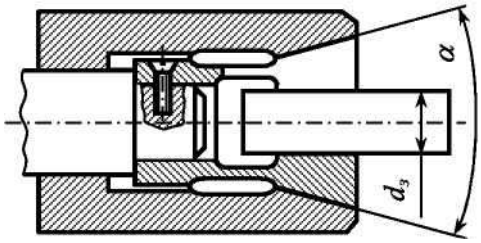



Рис. 32. Схема закрепления заготовки на цанговой оправке

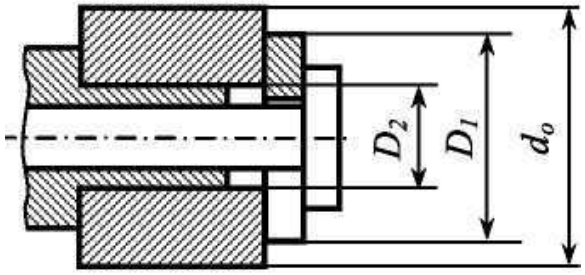



Рис. 33. Схема закрепления на цилиндрической оправке с торцовым зажимом

Усилие зажима определяется следующим образом

$$\frac{kP_z d_o}{(D_1 + D_2)\mu},$$

где $\mu$ - коэффициент сцепления, равный 0,1…0,15; $k$ —коэффициент надежности,равный 1,5… 2,5; $d_o$ - диаметр обрабатываемой поверхности; $D1$ - наружный диаметр торцовой шайбы; $D_2$ - диаметр оправки.

## Необходимое оборудование, приспособления, инструмент, Материалы

1. Токарно-винторезный станок 1616
2. Токарный трехкулачковый самоцентрирующий патрон.
3. Оправка цанговая.
4. Оправка цилиндрическая.
5. Измерительные инструменты: штангенциркуль ШЦ-125 (ГОСТ 166-89), микрометр МК (ГОСТ 6507-90).

## Правила техники безопасности

1. Работать в лаборатории разрешается только после проведения инструктажа.

2. Выполнять только ту работу, которая поручена преподавателем. Не работать на оборудовании и оснастке, не изучив правил техники безопасности.

3. Приступая к выполнению работы, предварительно ознакомиться с устройством токарного станка.

4. По окончании работы навести порядок на рабочем месте.

## Порядок выполнения работы

1. По заданным режимам резания (взятым из табл. 3 в соответствии с вариантом) определить значения составляющих усилия резания $P_z$, $P_x$, $Py$

$$P_{z,y,x} = 10 C_p t^{x_p} S^{y_p} v^{n_p} K_{\mu p},$$

где $C_p$ - коэффициент; $t$ - глубина резания, мм; $S$ - подача, мм/об; v - скорость резания, равнаям/мин; $K_№$ - коэффициент (точение без охлаждения); $n$ -частота вращения шпинделя, об/мин.

, $$v = \frac{\pi d_з n}{1000},$$

При продольном наружном точении заготовки из стали 45 с пределом прочности $\sigma_в$ = 750 МПа проходным резцом с углами γ = 15°, ф = 45°, $\lambda = 0°$

$P_x : P_y : P_z$ =1 : 0,45 : 0,35; $C_p$ =300; $x_p$ =1,0;

Таблица 3

| Номер вари-анта | Схема за-крепления | dз, мм | do,мм | l, мм | S, мм/об | n, об/мин | α, град | D1, мм | D2,мм |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | Рис.9 | 38 | 35 | 25 | 0,07 | 315 | — | — | — |
| 2 | Рис. 10 | 52 | 48 | 32 | 0,14 | 400 | 15 | - | - |
| 3 | Рис.9 | 45 | 40 | 50 | 0,21 | 500 | - | - | - |
| 4 | Рис. 11 | 60 | 58 | 46 | 0,28 | 630 | - | 25 | 50 |
| 5 | Рис.9 | 75 | 70 | 28 | 0,07 | 500 | - | - | - |
| 6 | Рис. 10 | 32 | 30 | 50 | 0,14 | 400 | 10 | - | - |
| 7 | Рис.9 | 50 | 46 | 40 | 0,21 | 315 | - | - | - |
| 8 | Рис. 11 | 80 | 75 | 65 | 0,28 | 400 | - | 32 | 56 |
| 9 | Рис.9 | 65 | 60 | 55 | 0,07 | 500 | - | - | - |
| 10 | Рис. 10 | 48 | 45 | 30 | 0,14 | 630 | 15 | - | - |
| 11 | Рис.9 | 78 | 75 | 65 | 0,21 | 315 | — | — | — |
| 12 | Рис. 11 | 86 | 82 | 42 | 0,28 | 400 | - | 28 | 52 |
| 13 | Рис.9 | 36 | 34 | 46 | 0,07 | 500 | - | - | - |
| 14 | Рис. 10 | 28 | 25 | 52 | 0,07 | 630 | 10 | - | - |
| 15 | Рис.9 | 40 | 36 | 80 | 0,14 | 500 | - | - | - |
| 16 | Рис.9 | 44 | 40 | 36 | 0,21 | 400 | — | — | — |
| 17 | Рис. 10 | 36 | 34 | 46 | 0,28 | 315 | 15 | - | - |
| 18 | Рис.9 | 60 | 55 | 50 | 0,21 | 400 | - | - | - |
| 19 | Рис. 11 | 55 | 54 | 36 | 0,07 | 500 | - | 20 | 40 |
| 20 | Рис.9 | 72 | 68 | 80 | 0,14 | 630 | - | - | - |
| 21 | Рис. 10 | 36 | 32 | 50 | 0,21 | 315 | 10 | — | — |
| 22 | Рис.9 | 46 | 44 | 75 | 0,28 | 400 | - | - | - |
| 23 | Рис. 11 | 86 | 82 | 46 | 0,07 | 500 | - | 32 | 60 |
| 24 | Рис.9 | 54 | 52 | 40 | 0,14 | 630 | - | - | - |
| 25 | Рис. 10 | 38 | 35 | 50 | 0,21 | 500 | 10 | - | - |
| 26 | Рис. 11 | 80 | 76 | 62 | 0,28 | 630 | — | 26 | 52 |
| 27 | Рис.9 | 36 | 34 | 56 | 0,07 | 315 | - | - | - |
| 28 | Рис. 10 | 42 | 40 | 68 | 0,14 | 400 | 15 | - | - |
| 29 | Рис. 11 | 75 | 70 | 60 | 0,21 | 500 | - | 28 | 56 |
| 30 | Рис.9 | 40 | 38 | 65 | 0,28 | 630 | - | - | - |

$y_{P_z}$=0,754; $n_{P_z}$=-0,15; $K_{\mu P_z} = \left(\frac{\sigma_в}{750}\right)^n$, где $n$=0,75.

2. Для заданной схемы закрепления заготовки определить усилие зажима.

Результаты вычислений занести в табл. 4.

| $d_3$, мм | $d_o$, мм | $l$, мм | $v$, м/мин | $S$, мм/об | $t$, мм | $P_z$, Н | $P_x$, Н | $R$, Н | $P_3$, Н |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | |

## Содержание отчета

1. Сведения о зажимных устройствах.

2. Схема закрепления с указанием вылета заготовки, диаметра заготовки и диаметра обработанной поверхности.

3. Расчет усилий резания и результирующего усилия.

4. Определение усилия зажима для заданных режимов обработки.

## Контрольные вопросы

1. Как различаются станочные приспособления по назначению?

2. Какие приспособления используются для токарных станков?

3. Какие элементы входят в состав в зажимного устройства?

**4.** Какие исходные данные необходимо знать для расчета усилия зажима?

**5.** Каковы факторы, влияющие на величину усилия зажима?

# РАБОТА № 4.ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК В ТИСКАХ, ПАТРОНЕ

Цель работы: определение погрешности закрепления заготовки в тисках и трехкулачковом патроне.

## Краткие теоретические сведения

В результате возникновения случайных погрешностей при обработке партии заготовок на настроенном станке истинный размер каждой заготовки является случайной величиной и подчиняется закону распределения случайной величины - закону нормального распределения (Гаусса).

Рассеяние размеров обрабатываемых заготовок вызывается многочисленными случайными факторами различного характера, оказывающими свое воздействие одновременно и независимо друг от друга. В числе таких факторов: вид обработки; погрешность установки заготовки в приспособлении; погрешность настройки станка.

Погрешность установки заготовки складывается из погрешности базирования $\omega_б$, закрепления $\omega_з$ и приспособления $\omega_{пр}$.

Погрешность базирования в ряде случаев связана с несовпадением измерительной и технологической баз или вызвана особенностями формы опорных поверхностей заготовки и установочных элементов приспособления (рис. 35). Погрешность базирования определяется как разность предельных расстояний измерительной базы заготовки относительно установленного на размер инструмента. Выражения для расчета погрешности базирования при различной форме базирующих поверхностей заготовок и установочных элементов

приспособлений приведены в справочной литературе.

Погрешность закрепления возникает при закреплении заготовки в приспособлении, при этом во многих случаях происходит перемещение заготовки (выжимание из приспособления) и появление зазора между базирующей поверхностью заготовки и соответствующей установочной поверхностью приспособления (рис. 36). Изменение перемещения заготовки при ее закреплении в приспособлении в большинстве случаев определяется экспериментальным путем.

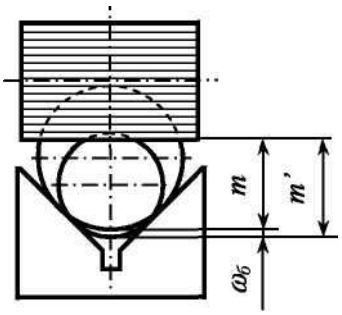



Рис. 35. Возникновение погрешности базирования

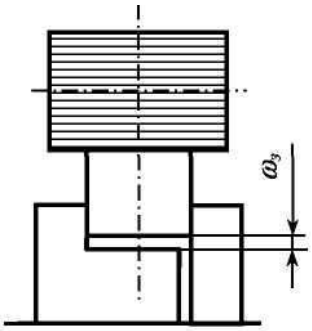



Рис. 36. Погрешность закрепления

Погрешность приспособления зависит от погрешности изготовления и сборки приспособления, его износа и неточности установки на станке.

## Необходимое оборудование, приспособления, инструмент, материалы

1. Тиски станочные, подкладки.
2. Патрон трехкулачковый.
3. Станок вертикально-фрезерный.
4. Станок токарно-винторезный.
5. Образцы деталей.
6. Измерительные инструменты: индикаторная головка со стойкой, штангенциркуль.

## Правила техники безопасности

1. Работать в лаборатории разрешается только после проведения инструктажа. Не работать на оборудовании и оснастке, не изучив правил техники безопасности.

2. Выполнять только ту работу, которая поручена преподавателем.

3. Перед началом работы на металлорежущих станках необходимо: привести в порядок рабочую одежду - застегнуть обшлага рукавов; заправить концы одежды так, чтобы не было развевающихся концов; волосы убрать под головной убор; привести в порядок рабочее место, убрать все лишнее со станка, осмотреть и подготовить для работы режущий, измерительный, крепежный инструмент и приспособления; предварительно ознакомиться с устройством станка по его описанию, после чего проверить ис-

правность станка на холостом ходу.

4. Во время работы на металлорежущих станках необходимо: перед включением станка убедиться, что его пуск никому не угрожает опасностью; применять указанные в операционной карте режимы резания.

5. Во время работы категорически запрещается снимать и открывать ограждения и предохранительные устройства станка.

6. По окончании работы навести порядок на рабочем месте.

## Порядок выполнения работы

1. Установить станочные тиски и индикаторную стойку на столе вертикально-фрезерного станка (рис. 37).

2. Установить заготовку 2 в тиски на подкладку 3 и рукой прижать к неподвижной губке 1 тисков. В этом положении индикатору 5 дать натяг и установить его стрелку на нуль.

3. Многократно закрепить и раскрепить заготовку в тисках, перемещая подвижную губку 4 тисков и фиксируя каждый раз показания индикатора, при этом применять следующие способы установки и закрепления заготовки:

- заготовка свободно кладется на подкладку тисков и зажимается от руки с произвольным усилием зажима;

- заготовка свободно кладется на подкладку тисков, после чего производится легкое предварительное зажатие тисков; затем легким постукиванием молотка по заготовке плотно прижимают ее к подкладке и производят проверку плотности прилегания заготовки путем по-

пытки вынуть прокладку из-под нее; если подкладка плотно прижата

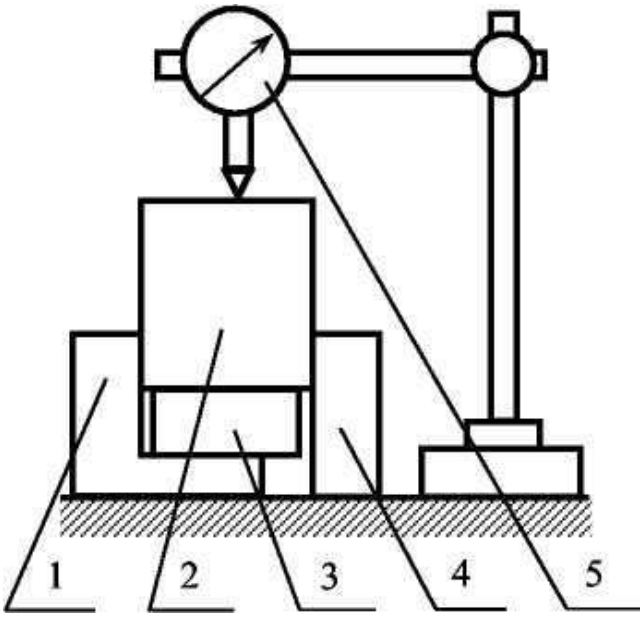



Рис. 37. Схема установки заготовки в тисках

заготовкой, то производится окончательный зажим тисков. Каждый способ установки повторить 25 … 30 раз. Обработать результаты замеров, сгруппировав их в восьми - десяти интервалах и определяя среднее взвешенное арифметическое значение действительных размеров погрешности закрепления, равное $\omega_{з.ср} = 1 \sum \omega_з.im_i$, и $\sigma$- среднее квадратическое отклонение, равное $a = Л—J^{ct)_{3l}}$-,-$(o_{3cp}jm_t$ , где /и, - частота (т.е. количество величин погрешности данного интервала размеров); $n$ - количество всех измерений. Все полученные результаты занести в табл. 6. Построить график осевых смещений для различных способов установки и закрепления заготовки.

4. Установить на шпинделе токарно-винторезного станка трехкулачковый патрон.

Таблица 6

| Способ установки и закрепления заготовки | Интервал,м | Частота тг | Частость m/n | Среднее арифметическое значение ωср, мм | Среднее квадратическое отклонение σ, мм |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |
| | | | | | |

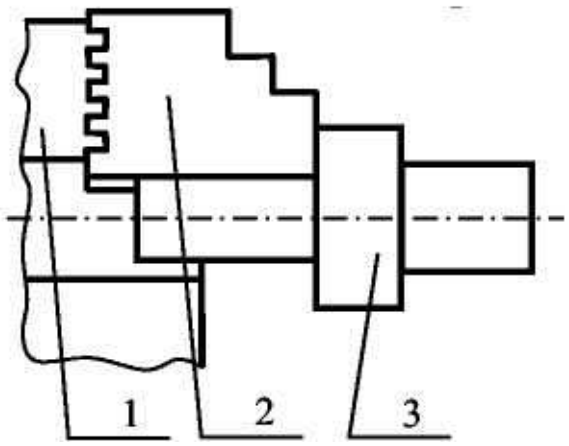



Рис. 38. Схема установки заготовки в трехкулачковом патроне

5. Установить обрабатываемую заготовку 3 в патрон 1 и, не закрепляя ее плотно, прижать буртиком к торцевым поверхностям кулачков 2 (рис. 38). В этом положении подвести суппорт с укрепленным в державке резцедержателя индикатором, измерительный наконечник которого должен касаться торца закрепляемой заготовки по линии центров с натягом 1 …. 2 мм; после чего закрепить суппорт и установить стрелку индикатора на нуль.

6. Многократно закрепляя заготовку (25…30 раз), при каждой ее повторной установке записывать показания индикатора, фиксирующего действительную величину погрешности $\omega_з$.

7. Обработать результаты замеров (см. п. 4), занести полученные

данные в табл. 7. и построить график осевых смещений.

Таблица 7

| Интервал, мм | Частота | Частость m/n | Среднее арифметическое значение $\omega_{ср}$, мм | Среднее квадратическое отклонение σ, мм |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |
| | | | | |

## Содержание отчета

1. Сведения об используемых приспособлениях и измерительных средствах (наименование, цена деления).
2. Эскизы схем установки заготовок с простановкой размеров.
3. Заполненные табл. 6 и 7.
4. Построенные графики осевых смещений.

## Контрольные вопросы

1.Какие факторы влияют на точность обработки партии заготовок?

2. Из каких составляющих складывается погрешность установки заготовки в приспособлении?

3. Чем вызвана погрешность базирования заготовок?

4. Вследствие чего возникает погрешность закрепления заготовок?

5. Чем обусловлено возникновение погрешности приспособления?

# РАБОТА № 5. ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ УНИВЕРСАЛЬНЫХ БЕЗНАЛАДОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Универсальные безналадочные приспособления (УБП) применяются в единичном и серийном типе производства для установки и закрепления обрабатываемой заготовки с различной формой и различными габаритами. К ним относятся универсальные патроны, тиски, поворотные столы и т. д.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Изучить конструкцию 4-х кулачкового патрона (привести схему и дать описание его работы).

1. Изучить конструкцию 3-х кулачкового самоцентрирующего патрона (**привести схему патрона и дать описание его работы**).
2. Изучить конструкции 2-х типов люнетов (подвижного и неподвижного) и **дать их схемы и способ монтажа на станке**.
3. Изучить конструкции поводковых устройств, используемых на токарных и шлифовальных станках (**привести схемы**).
4. Изучить конструкции патронов, используемых для крепления сверл на сверлильных и токарных станках (**привести схемы**).
5. Изучить конструкции машинных тисков (**привести схему работы**).
6. Рассчитать усилие зажима в тисках при сверлении сквозного отверстия заданного диаметра.
7. Рассчитать усилие зажима в тисках при фрезеровании заданной поверхности

В ответах должны быть приведены ***эскизы, поясняющие работу*** универсального безналадочного приспособления.

Таблица 2

**Варианты заданий**

| Вариант | Диаметр детали, мм | Ширина фрезерования и глубина резания, мм | Диаметр отверстия, мм | Материал |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 30 | 10/2 | 10 | Ст 40 |
| 2 | 40 | 10/3 | 20 | Ст 35 |
| 3 | 50 | 15/4 | 10 | Ст 45 |
| 4 | 60 | 15/5 | 10 | Сталь 40ХНМА |
| 5 | 70 | 20/5 | 20 | Сталь 30ХГС, |
| 6 | 80 | 20/10 | 30 | Ст 40 |
| 7 | 90 | 50/1 | 12 | Ст 40Х |
| 8 | 100 | 40/10 | 15 | Ст 40 Х |
| 9 | 90 | 15/1 | 25 | Ст 45Х |
| 10 | 80 | 30/5 | 20 | Ст 45Х |
| 11 | 70 | 40/10 | 5 | Ст 40Х |
| 12 | 60 | 12/1 | 10 | Ст 5 |

## ПРИМЕРЫ СОСТАВЛЕНИЯ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ И ИСХОДНОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗАЖИМНОГО УСИЛИЯ

Величину необходимого зажимного усилия W, как правило, определяют на основе решения задачи статики, рассматривая равновесие детали под действием приложенных к ней сил и моментов. предварительно необходимо составить расчетную схему, т.е. изобразить на схеме установки заготовки все силы, действующие на заготовку: силы и моменты резания, зажимные усилия, реакции опор и силы трения в местах контакта заготовки с установочными элементами и зажимными устройствами. Расчетную схему следует составлять для наиболее неблагоприятного варианта местоположения режущего

инструмента по длине обрабатываемой поверхности, когда для удержания заготовки от перемещения или поворота под действием сил и моментов резания требуется приложить наибольшее зажимное усилие.

Пользуясь расчетной схемой, следует установить направление возможного перемещения или поворота заготовок под действием сил и моментов резания, определить величину проекций всех сил на направление перемещения и составить уравнение сил и моментов.

В случае использования принципа возможных перемещений [1] составить уравнения элементарных работ в направлении перемещения заготовка, т.е. $\Sigma \delta A = 0$.

Так как в производственных условиях всегда возможны отступления от тех условий применительно в которым рассчитывались по нормативам силы и моменты резания, то возможны отклонения величин сил и моментов резания от расчетных. В большинстве случаев будет иметь место увеличение сил и моментов резания их, величин, рассчитанных или взятых из таблиц нормативов по режимам резания. Поэтому возможное увеличение сил и моментов резания следует учесть введением коэффициента надежности закрепления ($K$) путем умножения на него сил и моментов резания, входящих в составленные уравнения статики или динамики.

На основании решения уравнения получают формулы для расчета зажимного усилия $W$, обеспечивающего надежное закрепление заготовки. Сказанное проиллюстрируем примерами.

**Пример 1.**

На операции фрезерования плоскости (рис. 3, *а*) при принятом методе установки и схеме закрепления заготовки под действием сил резания может только поворачиваться относительно точки *О*.

Из условия равновесия заготовки (рис.3, *а*) уравнение моментов будет $$W \cdot a + F \cdot l = P_z \cdot b + P_V \cdot l$$

После подстановки значения $F = f \cdot W$ и введения коэффициента надежности *K* уравнение примет вид

$$W \cdot a + f \cdot W \cdot l = K(P_z \cdot b + P_V \cdot l),$$

откуда

$$W = \frac{K(P_z \cdot b + P_V \cdot l)}{a + f \cdot l},$$

где *f* – коэффициент трения между заготовкой и зажимными устройствами. Обозначения остальных величин даны на рис. 3, *а*.

Используя принципы возможных перемещений, исходное уравнение для нахождения зажимной силы *W* (по примеру 1) будет иметь вид:

$$Mp_z \cdot \delta\varphi + Mp_V \cdot \delta\varphi + M_W \cdot \delta\varphi + M_F \cdot \delta\varphi = 0,$$

или $$Mp_Z + Mp_V + M_W + M_F = 0.$$

Раскрывая значение моментов (взятых относительно т. *О*) и силы трения и вводя коэффициент надежности *K*, уравнение примет вид

$$W \cdot a + W \cdot l \cdot f = K(P_Z \cdot b + P_V \cdot l).$$

откуда

$$W = \frac{K(P_Z \cdot b + P_V \cdot l)}{a + f \cdot l},$$

т.е. получили то же самое значение.

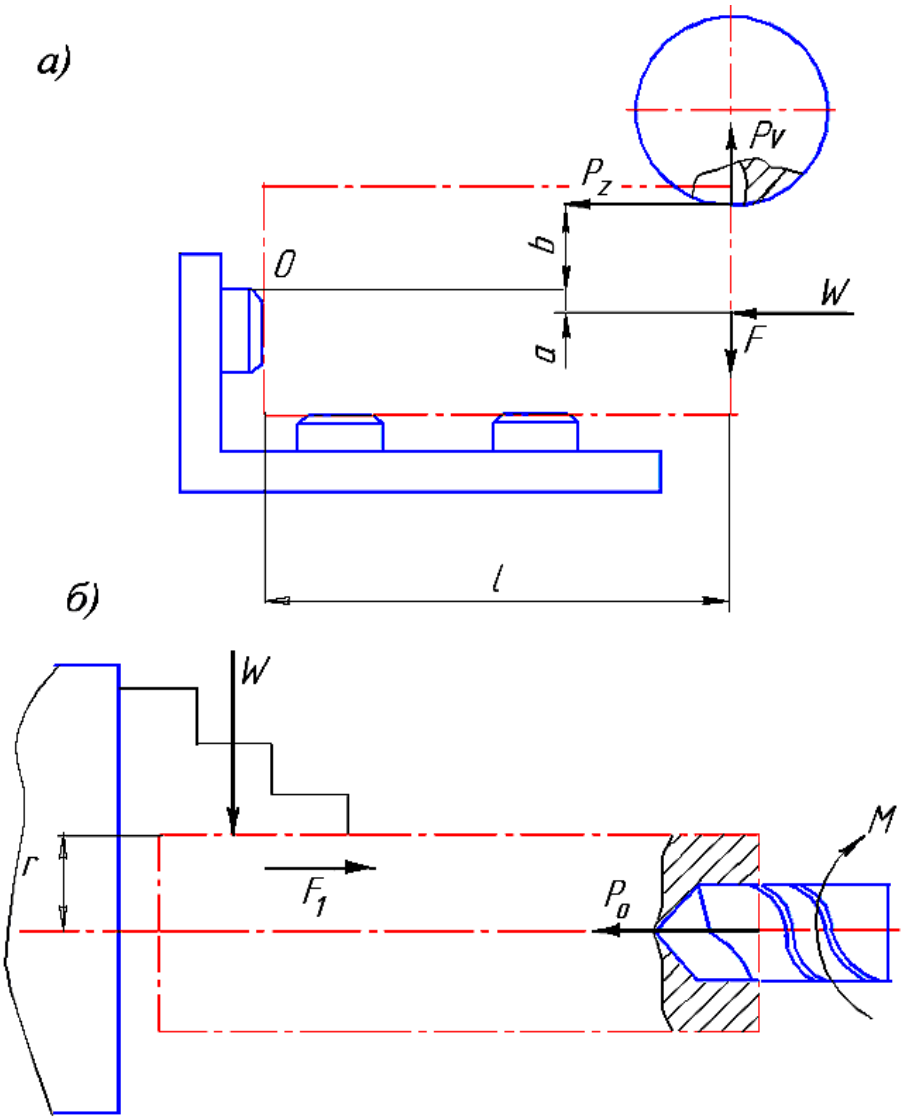



Рис. 3. Расчетные схемы

**Пример 2.**

При сверлении отверстия в заготовке, закрепленной в трехкулачковом патроне (рис. 3, *б*), она может перемещаться вдоль кулачков

под действием силы резания $\boldsymbol{P_0}$ (усилие подачи) и провертываться в кулачках под действием момента резания $\boldsymbol{M}$.

Необходимо приложить такое зажимное усилие, чтобы не было ни перемещения, ни провертывания детали относительно кулачков. В зависимости от формы насечки на кулачках, сопротивление перемещению и провертыванию может быть различным, так как при этом могут быть различными коэффициенты трения.

Допустим, что при перемещении заготовки в кулачках вдоль её оси коэффициент трения будет $f_1$, а при провертывании $f_2$. Тогда силы трения между кулачком и заготовкой будут составлять

при перемещении $F_1 = f_1 \cdot W$,

при провертывании $F_2 = f_2 \cdot W$.

Определим величину зажимного усилия при условии недопустимости перемещения заготовок в кулачках. Пользуясь принятыми обозначениями (рис. 3, *б*) и имея в виду, что у патрона три кулачка, составим уравнение сил: $3F_1 = P_0$.

После подстановки значения $F_1$ и введения коэффициента $K$ уравнение примет вид $3f_1W = KP_0$

откуда

$$W = \frac{K \cdot P_0}{3 \cdot f_1} \text{ (на один кулачок).}$$

Теперь определим величину зажимного усилия при условии недопустимости провертывания заготовки в кулачках.

Так как заготовка зажата в трех кулачках, уравнение моментов будет иметь следующий вид: $3F_2 \cdot r = M$,

где $M$ – момент сил резания;

$F_2$ – сила трения между кулачком и деталью при провертывании последней;

$r$ – радиус наружной цилиндрической поверхности детали на участке закрепления её в кулачках.

После подстановки значения $F_2$ и введения коэффициента $\boldsymbol{K}$ уравнение примет вид

$$3F_2 \cdot r = 3 f_2 \cdot W \cdot r = K \cdot M ,$$

откуда

$$W = \frac{KM}{3 f_2 \cdot r} \text{ (на 1 кулачок).}$$

После подстановки численных данных в конечные формулы по примеру 2 получим два значения величины зажимного усилия $\boldsymbol{W}$. В качестве расчетного следует брать максимальное значение.

В примере 2 принцип возможных перемещений дает исходные уравнения из условия перемещения заготовки:

$$F_1 \cdot \delta S + P_0 \cdot \delta S = 0 \text{ или } F_1 + P_0 = 0,$$

при провертывании заготовки

$$M_{F2} \cdot \delta\varphi + M\delta\varphi = 0 \text{ или } M_{F2} + M = 0.$$

Раскрывая значение сил и моментов трения и вводя коэффициент надежности $K$, получим:

$$W \cdot f_1 = K \cdot P_0, \text{ откуда } W = \frac{KP_0}{f_1} \text{ (на 3 кулачка),}$$

$$W \cdot f_2 = K \cdot M \text{ , откуда } W = \frac{KM}{f_2 r} \text{ (на 3 кулачка)}$$

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА НАДЕЖНОСТИ ЗАКРЕПЛЕНИЯ "*К*" И ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ

Таблица 3

**Значения коэффициента трения**

| Характеристика контактируемых поверхностей | Значение $f$ |
|---|---|
| **А. Контактируемая пара деталь – установочный элемент.** Обработанная поверхность заготовки контактирует с плоскостью опорных пластин, с плоскостью магнитной плиты и т.п. | 0,10 – 0,15 |
| Обработанная поверхность детали контактирует с установочным элементом по линии (установка на призму) или сфере (установка на опорный штырь со сферической головкой) | 0,18 – 0,3 |
| Необработанная поверхность детали контактирует с закаленным насеченным элементом (установка на опорные штыри с насеченной головкой) | 0,5 – 0,8 |
| **Б. Контактируемая пара зажимной элемент-деталь.** Контактный элемент с плоской контактной поверхностью при закреплении соприкасается с плоской обработанной поверхностью детали | 0,1 – 0,15 |
| Контактный элемент при закреплении соприкасается с цилиндрической поверхностью детали (при установке в кулачках, в цанге и т.п.): | |
| при гладкой поверхности контактного элемента | 0,25 |
| поверхность контактного элемента имеет кольцевые канавки | 0,35 |
| поверхность контактного элемента имеет крестообразные канавки | 0,45 |
| Контактный элемент, имевший кольцевые канавки соприкасается с необработанной поверхностью детали | 0,4 – 0,5 |
| Контактный элемент, имеющий насечку на контактной поверхности, соприкасается с необработанной поверхностью детали | 0,5 – 0,8 |

Значение коэффициента надежности закрепления ***К***, введенного в уравнения, следует выбирать дифференцированно в зависимости от конкретных условий выполнения операции и способа закрепления заготовка. Величину коэффициента ***К*** можно представить как произведение первичных коэффициентов, каждый из которых отражает влияние определенного фактора **[2].** Следовательно,

$$K = K_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \ .$$

Коэффициент $K_0$, представляющий собой гарантированный коэффициент запаса надежности закрепления, для всех случаев следует брать равным 1,5.

Таблица 4

**Значения коэффициента $K_2$**

| Способы обработки | Компонент сил резания | Значение | Обрабатываемый материал |
|---|---|---|---|
| Сверление | Крутящий момент<br>Осевая сила | 1,15<br>1,10 | Чугун |
| Предварительное зенкерование | Крутящий момент<br>Осевая сила | 1,3<br>1,2 | Чугун при износе по заданной поверхности 1,5мм |
| Предварительное точение | Тангенциальная сила<br>Радиальная сила<br><br>Сила подачи | 1,0<br>1,4<br>1,2<br>1,6<br>1,25 | Сталь и чугун<br>Сталь<br>Чугун<br>Сталь<br>Чугун |
| Цилиндрическое предварительное и чистовое фрезерование | Окружная сила | 1,75 –1,90<br><br>1,2 – 1,4 | Вязкие стали<br><br>Твердые стали и чугуны |
| Торцевое предварительное и чистовое фрезерование | Окружная сила | 1,75 –1,90<br><br>1,2 – 1,4 | Вязкие стали<br><br>Твердые стали и чугуны |

Коэффициент $K_1$, учитывает увеличение силы резания из-за случайных неровностей на заготовках. Для черновой обработки $K_1$ = 1,2, для чистовой $K_1$ = 1,0.

Коэффициент $K_2$ учитывает увеличение силы резания вследствие затупления инструмента. Значения $K_2$ приведены в табл. 4, а значение остальных коэффициентов в табл. 5.

Приведенные значения коэффициентов $K_0 – K_6$ позволяют определить величину $K$ для проектируемого приспособления с учетом

конкретных условий выполнения операций.

Таблица 5

**Значения коэффициентов $K_3$, $K_4$, $K_5$ и $K_6$**

| Обозначение коэффициента | Фактор, учитываемый введением коэффициента | Значение коэффициента | |
|---|---|---|---|
| $K_3$ | Увеличение силы резания при прерывистом резании | 1,2 | - при точении |
| $K_4$ | Непостоянство зажимного усилия | 1,3<br><br>1,0 | - для ручных зажимных устройств;<br>- для пневматических и гидравлических устройств |
| $K_5$ | Степень удобства расположения рукояток в ручных зажимных устройствах | 1,0<br><br>1,2 | - при удобном расположении и малой длине рукоятки;<br>- при диапазоне угла отклонений рукоятки 90° |
| $K_6$ | Неопределенность из–за неисправностей места контакта детали с установочными элементами, имеющими большую установочную поверхность | 1,0 | - для установочного элемента, имеющего ограниченную поверхность контакта с деталью |
| | Учитывая только при наличии момента, стремящегося повернуть деталь | 1,5 | - для установочного элемента |

## Сверление [3]

При сверлении глубина резания $t$ – 0,5$D$.

**Подача.** При сверлении отверстий без ограничивающих факторов выбираем максимально допустимую по прочности сверла подачу (табл. 2.6).

**Скорость резания**. Скорость резания, м/мин, при сверлении

$$V = \frac{C_v D^q}{T^m S^y} K_v .$$

Значения коэффициентов $C_v$ и показателей степени приведены для сверления в (табл. 6), а значения периода стойкости $T$ – (в табл. 2.30).

Общий поправочный коэффициент на скорость резания, учитывающий фактические условия резания,

$$K_v = K_{мv} K_{иv} K_{lv}.$$

где $K_{MV}$ – коэффициент, учитывающий качество обрабатываемого материала (см. табл. 1.7); $K_{ПV}$ – коэффициент, учитывающий состояние поверхности заготовки (см. табл.1.9); $K_{ИV}$ – коэффициент, учитывающий материал инструмента (см. табл.1.8).

**Крутящий момент**, Н·м, и осевую силу, Н, рассчитывают по формулам:

При сверлении:

$$M_{кр} = 10 C_м D^q S^y K_р; \quad P_о = 10 C_р D^q S^y K_р.$$

Значения коэффициентов $C_м$ и $C_р$, и показателей степени приведены в (табл. 7).

Таблица 6

**Значения коэффициента $C_v$ и показателей степени в формуле скорости резания при сверлении**

| Обрабатываемый материал: | Материал режущей части инструмента | Подача $S$, мм/об | Коэффициент и показатели степени | | | | Охлаждение |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $C_v$ | $q$ | $y$ | $m$ | |
| Сталь конструкционная углеродистая, $\sigma_в$ = 750 МПа | Р6М5 | ≤0,2<br>>0,2 | 7,0<br>9,8 | 0,40 | 0,70<br>0,50 | 0,20 | Есть |
| Сталь жаропрочная 12Х18Н9Т, *НВ* 141 | | – | 3,5 | 0,50 | 0,45 | 0,12 | |
| Чугун серый, *НВ* 190 | | ≤0,3<br>>0,3 | 14,7<br>17,1 | 0,25 | 0,55<br>0,40 | 0,12<br>5 | Нет |
| | ВК8 | – | 34,2 | 0,45 | 0,30 | 0,20 | |

**Примечание:** Для сверл из быстрорежущей стали рассчитанные по приведенным данным скорости резания действительны при двойной заточке и подточенной перемычке, При одинарной заточке сверл из быстрорежущей стали рассчитанную скорость резания следует уменьшать, умножая ее на коэффициент $K_{3v} = 0{,}75$.

Таблица 7

**Значения коэффициентов и показателей степени в формулах крутящего момента и осевой силы при сверлении**

| Обрабатываемый материал | Материал режущей части инструмента | Коэффициент и показатели степени в формулах | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Крутящего момента | | | | Осевой силы | | | |
| | | $C_M$ | $q$ | $x$ | $y$ | $C_p$ | $q$ | $x$ | $y$ |
| Конструкционная углеродистая сталь $\sigma_в = 750$ МПа | Быстрорежущая сталь | 0,034 | 2,0 | – | 0,8 | 68 | 1,0 | – | 0,7 |
| Серый чугун *НВ* 190 | Твёрдый сплав | 0,012 | 2,2 | – | 0,8 | 42 | 1,2 | – | 0,75 |
| | Быстрорежущая сталь | 0,021 | 2,0 | – | 0,8 | 42,7 | 1,0 | – | 0,8 |
| Ковкий чугун *НВ*150 | Быстрорежущая сталь | 0,021 | 2,0 | – | 0,8 | 43,3 | 1,0 | – | 0,8 |
| | Твёрдый сплав | 0,01 | 2,2 | – | 0,8 | 32,8 | 1,2 | – | 0,75 |

**Примечание:** Рассчитанные по формуле осевые силы при сверлении действительны для свёрл с подточенной перемычкой; с неподточенной перемычкой осевая сила при сверлении возрастает в 1,33 раза.

Коэффициент, учитывающий фактические условия обработки, в данном случае зависит только от материала обрабатываемой заготовки и определяется выражением

$$K_p = K_{мр}$$

Значения коэффициента $K_{мр}$ приведены для стали и чугуна в (табл. 8).

Таблица 8

**Поправочный коэффициент $K_{мр}$ для стали и чугуна, учитывающий влияние качества обрабатываемого материала на силовые зависимости**

| Обрабатываемый материал | Расчетная формула | Показатель степени ***n*** при определении | | |
|---|---|---|---|---|
| | | составляющей $P_z$ силы резания при обработке резцами | крутящего момента $M$ и осевой силы $P_o$ при сверлении, рассверливании и зенкеровании | Окружной силы резания $Pz$ при фрезеровании |
| Конструкционная углеродистая и легированная сталь $\sigma_в$ МПа:<br>≤600<br>>600 | $K_{мр} = \left(\frac{\sigma_в}{750}\right)^n$ | 0,75/0,35<br>0,75 | 0,75/0,75<br>0,75/0,75 | 0,3/0,3<br>0,3/0,3 |
| Серый чугун | $K_{мр} = \left(\frac{HB}{190}\right)^n$ | 0,4/0,55 | 0,6/0,6 | 1,0/0,55 |
| Ковкий чугун | $K_{мр} = \left(\frac{HB}{150}\right)^n$ | 0,4/0,55 | 0,6/0,6 | 1,0/0,55 |

**Примечание:** В числителе приведены значения показателя степени ***n*** для твердого сплава, в знаменателе для быстрорежущей стали.

## Фрезерование[3]

**Глубина фрезерования *t* и ширина фрезерования *B*** – понятия, связанные с размерами слоя заготовки, срезаемого при фрезеровании.

Во всех видах фрезерования, за исключением торцового, *t* определяет продолжительность контакта зуба фрезы с заготовкой; *t* измеряют в направлении, перпендикулярном к оси фрезы. Ширина фрезерования *B* определяет длину лезвия зуба фрезы, участвующую в реза-

нии; $B$ измеряют в направлении, параллельном оси фрезы.

**Подача.** При фрезеровании различают подачу на один зуб $S_z$, подачу на один оборот фрезы $S$ и подачу минутную $S_м$, мм/мин, которые находятся в следующем соотношении:

$$S_м = S\, n\ = s_z\, z\, n,$$

где $n$ – частота вращения фрезы, об/мин; $z$ – число зубьев фрезы.

Исходной величиной подачи при черновом фрезеровании является величина ее на один зуб $S_Z$. Рекомендуемые подачи для различных фрез и условий резания приведены в табл.,2.28.

**Скорость резания** – окружная скорость фрезы, м/мин,

$$v = \frac{C_v D^q}{T^m t^x S_z^y B^u z^p} K_v .$$

Значения коэффициента $C_v$ и показателей степени приведены в (табл. П2.2.3), а периода стойкости $T$ – в (табл. 2.30).

Общий поправочный коэффициент на скорость резания, учитывающий фактические условия резания:

$$K_v = K_{мv} K_{пv} K_{иv},$$

где $K_{мv}$ – коэффициент, учитывающий качество обрабатываемого материала (см. табл. 1.7); $K_{пv}$ – коэффициент, учитывающий состояние поверхности заготовки (см. табл. 1.9); $K_{иv}$ – коэффициент, учитывающий материал инструмента (см. табл. 1.8).

Таблица 8

**Поправочный коэффициент $K_{мр}$ для стали и чугуна, учитывающий влияние качества обрабатываемого материала на силовые зависимости**

| **Обрабатываемый материал** | Расчетная формула | Показатель степени $n$ при определении | | |
|---|---|---|---|---|
| | | составляющей $P_z$ силы резания при обработке резцами | крутящего момента $M$ и осевой силы $P_o$ при сверлении, рассверливании и зенкеровании | Окружной силы резания $P_z$ при фрезеровании |
| Конструкционная углеродистая и легированная сталь<br>$\sigma_в$ МПа:<br>≤600<br>>600 | $K_{мр} = \left(\frac{\sigma_в}{750}\right)^n$ | <br><br>0,75/0,35<br>0,75 | <br><br>0,75/0,75<br>0,75/0,75 | <br><br>0,3/0,3<br>0,3/0,3 |
| Серый чугун | $K_{мр} = \left(\frac{HB}{190}\right)^n$ | 0,4/0,55 | 0,6/0,6 | 1,0/0,55 |
| Ковкий чугун | $K_{мр} = \left(\frac{HB}{150}\right)^n$ | 0,4/0,55 | 0,6/0,6 | 1,0/0,55 |

**Примечание:** В числителе приведены значения показателя степени $n$ для твердого сплава, в знаменателе для быстрорежущей стали.

**Сила резания.** Главная составляющая силы резания при фрезеровании – окружная сила, Н

$$P_z = \frac{10 C_p t^x S_z^y B_z^u}{D^q n^w} K_{мр},$$

где $z$ – число зубьев фрезы; $n$ – частота вращения фрезы, об/мин.

Значения коэффициента $C_p$ и показателей степени приведены в (табл. 9), поправочный коэффициент на качество обрабатываемого материала $K_{мр}$ для стали и чугуна – в (табл. 8). Величины остальных составляющих силы резания: горизонтальной (сила подачи) $P_h$, вертикальной $P_v$, радиальной $P_y$, осевой $P_x$ устанавливают из соотноше-

ния с главной составляющей $P_z$ .

Таблица 9

**Значения коэффициента $C_P$ и показателей степени в формуле окружной силы $P_Z$ при фрезеровании**

| Фрезы | Материал режущей части инструмента | Коэффициент и показатели степени | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $C_P$ | $x$ | $y$ | $u$ | $q$ | $w$ |
| *Обработка конструкционной углеродистой стали, $\sigma_в$ = 750 МПа* | | | | | | | |
| Торцовые | Твердый сплав<br>Быстрорежущая сталь | 825<br>82,5 | 1,0<br>0,95 | 0,75<br>0,8 | 1,1<br>1,1 | 1,3<br>1,1 | 0,2<br>0 |
| Цилиндрические | Твердый сплав<br>Быстрорежущая сталь | 101<br>68,2 | 0,88<br>0,86 | 0,75<br>0,72 | 1,0<br>1.0 | 0,87<br>0,86 | 0<br>0 |
| Дисковые, прорезные и отрезные | Твердый сплав<br>Быстрорежущая сталь | 261<br>68,2 | 0,9<br>0,86 | 0,8<br>0,72 | 1,1<br>1,0 | 1,1<br>0,86 | 0,1<br>0 |
| Концевые | Твердый сплав<br>Быстрорежущая сталь | 12,5<br>68,2 | 0,85<br>0,86 | 0,75<br>0,72 | 1,0<br>1,0 | 0,73<br>0,86 | –0,13<br>0 |

**Примечание**: Окружная сила $P_z$, рассчитанная по табличным данным, соответствует работе фрезой без затупления. При затуплении фрезы до допускаемой величины износа сила возрастает: при обработке мягкой стали ($\sigma_в$ < 600 МПа) в 1,75 – 1,9 раза; во всех остальных случаях – в 1,2 – 1,4 раза.

*(Форма отчета для лабораторных работ № 2)*

Студент _____ Группа _____

***Отчет по лабораторной работе №2.***

***Изучение конструкций универсальных безналадочных приспособлений***

*Схемы приспособлений (эскизы) и описание работы*

*Режим резания (расчет)*

*Расчет усилия зажима в тисках при сверлении сквозного отверстия заданного диаметра d =*

## ЛИТЕРАТУРА


1. *Тарг С. М.* Краткий курс теоретической механики: Для вузов. – 4 – изд. – М.: Наука, 1966. – 478 с.
2. *Корсаков В. С.* Основы конструирования приспособлений. – 2 – е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1965. – 367 с.
3. *Глинникова Т. П., Волегов С. А.* Пособие по выполнению самостоятельных работ по дисциплине «ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ» ИЗУЧЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И ВЫБОР РЕЖИМА РЕЗАНИЯ

(Часть 1) для студентов профилизации «Горные машины и оборудование» направления 150400 – «Технологические машины и оборудование» для студентов очного и заочного обучения Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2006. 112 с.

4. *Справочник технолога-машиностроителя: В 2-х т. Т. 1* /Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Суслова. М.:Машиностроение-1, 2001. -912 с.
5. *Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2* / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Суслова. - М.:Машиностроение-1, 2001. - 944 с.

# РАБОТА № 6. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ 3-Х КУЛАЧКОВОГО ПАТРОНА ПО ТОЧНОСТИ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЭТАЛОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

## ХОД РАБОТЫ

1. Установить кулачки патрона ключом на размер, превышающий посадочный диаметр эталонной детали на 0,5 … 1 мм.
2. Установить эталонную деталь в кулачки и подвести наконечник индикатора **к торцу** буртика (обеспечив **натяг 1 – 2** мм).
3. Прижать пальцем буртик эталонной детали к кулачкам и зафиксировать показания индикатора.
4. Закрепить ключом эталонную деталь в патроне и зафиксировать показание индикатора.
5. Подвести наконечник индикатора к цилиндрической части буртика (обеспечив **натяг 1 – 2** мм).
6. Повернуть деталь с патроном на угол > 360° и зафиксировать **торцовое биение буртика** детали по индикатору (абсолютная величина смещения стрелки индикатора).
7. Установить кулачки патрона ключом на размер, превышающий посадочный диаметр эталонной детали на 0,5 … 1 мм.
8. Повернуть деталь в кулачках на любой угол.
9. Повторить выполнение пунктов с 3 по 7-й ***25 раз(!)***.
10. Результаты занести в таблицу.

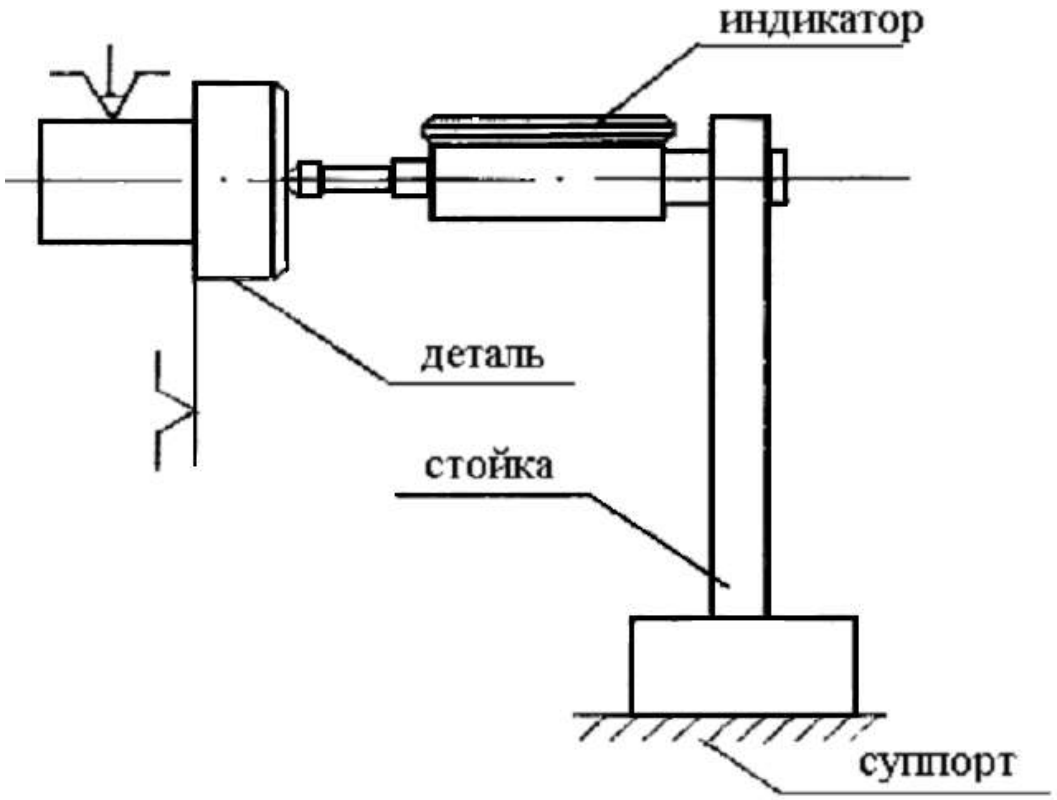



Рис. 6.Схема эксперимента

11. Провести обработку результатов:

а) определить $\overline{\Delta} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta_i}{n}$,

б) определить $S_\Delta = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{n} (\Delta_i - \overline{\Delta})^2}{n-1}}$,

где $\overline{\Delta}$ – средняя ошибка закрепления (погрешность);

$\Delta$ – ошибки закрепления;

$n$ – число повторений опыта;

$S_\Delta$ – ***стандарт ошибки.***

12. Повторить эксперименты по пп. 1…9 на 3-х станках.

13. Провести анализ точности закрепления деталей в 3-х патронах

по $\overline{\Delta}, S_{\Delta}$ и сделать выводы.

14. Провести сравнение величины радиального биения заготовки по $\Delta r$ для 3-х станков и сделать выводы.

**Биения** в машинах и механизмах – отклонение от правильного взаимного расположения поверхностей во вращающихся (колеблющихся) цилиндрических деталях машин и механизмов. Радиальное Б. – разность наибольшего $A_{макс}$ и наименьшего $A_{мин}$ расстояний от точек реальной поверхности цилиндрической детали до базовой оси вращения в сечении, перпендикулярном к этой оси (рис. 7); радиальное Б. – результат смещения центра (эксцентриситета) рассматриваемого сечения относительно оси вращения.

Торцовое Б. – разность наибольшего и наименьшего расстояний от точек реальной торцовой поверхности, расположенных на окружности заданного диаметра ($D$), до плоскости, перпендикулярной к базовой оси вращения (рис. 8); торцовое Б. – результат неперпендикулярности торцовой поверхности к базовой оси и отклонений формы торца по линии измерения.

Б. – вредное явление в машинах и механизмах; они приводят к повышенному износу и выходу из строя деталей машин.




Рис. 7. Схема радиального биения.

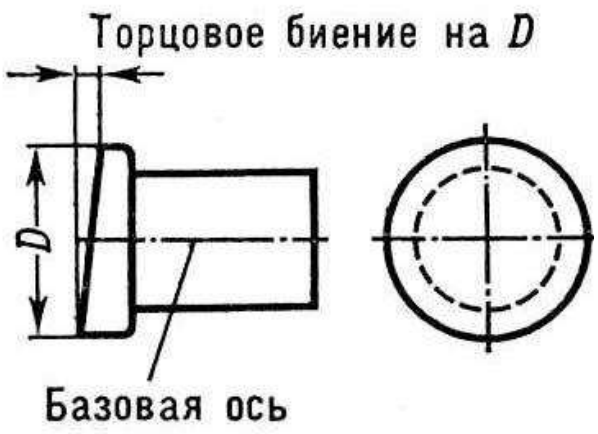



Рис. 8. Схема торцового биения.

*(Форма отчета для лабораторной работы № 3)*

*Студент* _____ *Группа* _____

***Отчет по лабораторной работе № 3.***

***Сравнительный анализ 3-хкулачковых патронов***

*Схема эксперимента*

*Таблица*

***Результаты замеров. Станок №***

| *№ опыта* | *Показание индикатора* | | *Ошибка закрепления* | *Торцовое биение детали при повороте* |
|---|---|---|---|---|
| | *до закрепления* | *после закрепления* | | |
| | $a_i$ | $a_{i+1}$ | $\Delta i = a_{i+1} - a_i$ | $\Delta r$ |
| ***1*** | | | | |
| ***2*** | | | | |
| ***3*** | | | | |
| ***…*** | | | | |
| ***…*** | | | | |
| ***25*** | | | | |

***Обработка результатов***

***ВЫВОДЫ:***

# РАБОТА № 7. ИЗУЧЕНИЕ ДЕЛИТЕЛЬНОЙ ГОЛОВКИ И РАСЧЕТ ГИТАРЫ СМЕННЫХ ШЕСТЕРЕН ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДЕЛЕНИЯ И ФРЕЗЕРОВАНИЯ ВИНТОВЫХ КАНАВОК

Делительные головки являются важнейшими принадлежностями консольно-фрезерных станков, которые расширяют их технологические возможности. Делительные головки служат для периодического поворота заготовки вокруг ее оси на определенный угол (деление на равные или неравные части); установки заготовки под требуемым углом относительно стола; непрерывного вращения заготовки при фрезеровании винтовых канавок большого шага на режущем инструменте или винтовых зубьев зубчатых колес.

Наибольшее распространение имеют универсальные делительные головки (УДГ). Делительная головка (см. рис. 9) состоит из червяка ***K*** (всегда однозаходный, т. е. $k = 1$), а также червячного колеса $Z_{ЧШ}$, имеющего 40, 60 или 80 зубьев и закрепленного на валу *11*. Червяк можно вращать рукояткой *7*, длину (т. е. радиус) которой можно менять и фиксировать с помощью фиксатора *8* на определенной окружности делительного диска *9*, соединенного с корпусом головки. Второй фиксатор *10* удерживает или освобождает делительный диск относительно корпуса делительной головки. Ножки раздвижного сектора *6* позволяют избежать погрешности при отсчете числа отверстий, когда вращают рукоятку, чтобы обеспечить деление.

Принцип деления заключается в том, что однозаходный червяк вращает червячное колесо с числом зубьев 40, 60 или 80. Отношение

$N = Z_{ЧШ} / k$ называют ***характеристикой делительной головки***. Одному обороту рукоятки *7*, т. е. одному обороту червяка, соответствует поворот червячного колеса на один зуб. Таким образом, если червячное колесо имеет 40 зубьев, оно повернется на 1/40 оборота. Для того чтобы заготовка, установленная на делительной головке, повернулась на один оборот, необходимо повернуть рукоятку на 40 оборотов.

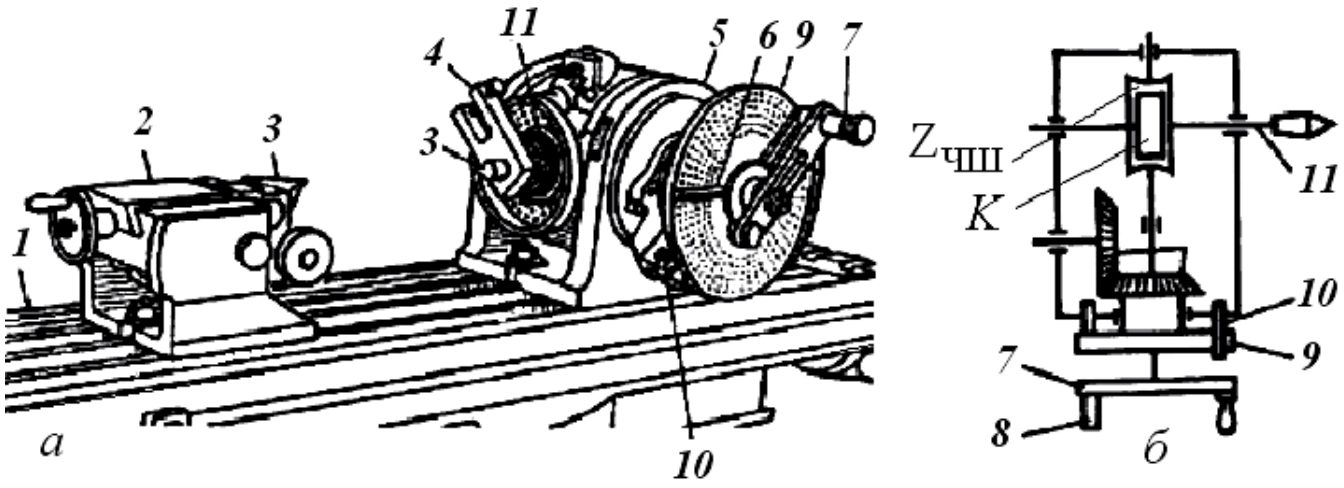



Рис. 9. Делительная головка:
*а* – установка на фрезерном станке; *б* – кинематическая схема при настройке на простое деление:
*1* – стол станка; *2* – задняя бабка; *3* – центры; *4* – оправка; *5* – корпус делительной головки; *6* – раздвижной сектор; 7 – рукоятка настройки; *8* – фиксатор; *9* – делительный диск; *10* – фиксатор (стопор); *11* – шпиндель.

Делительные диски имеют ряды окружностей, на которых расположено определенное число отверстий.

Число отверстий делительного диска:

на одной стороне: 16, 17, 19, 21, 23, 29, 30, 31;
на другой стороне: 33, 37, 39,41, 43, 47, 49, 54.

Применяются следующие способы наладки универсальных де-

лительных головок: для простого деления, дифференциального деления и фрезерования винтовых канавок.

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Научиться рассчитывать и настраивать делительную головку на простое, дифференциальное деление и фрезерование винтовых канавок.

## ХОД ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. По заданию преподавателя рассчитать и начертить кинематические схемы делительной головки:

- для простого деления,
- для дифференциального деления,
- для фрезерования винтовых канавок.

2. Профрезеровать с помощью простого деления заданный многогранник.

3. Дать эскиз фрезы с основными параметрами и углами.

4. Настроить гитару делительной головки для дифференциального деления.

5. Отчет по работе выполняется на специальном бланке.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

### Метод простого деления

При простом делении вращение шпинделя (рис. 11) передается от рукоятки *7* с фиксатором через червяк *K* и червячное колесо, расположенное в средней части шпинделя. При этом делительный диск *9* должен быть закреплен с помощью стопора *10* относительно корпуса делительной головки.

Простое деление окружности на равные и неравные части проводится с помощью рукоятки *4* с фиксатором. Величина поворота рукоятки отсчитывается по отверстиям на делительном диске и фиксируется стержнем фиксатора.

Настройка головки заключается в определении числа оборотов рукоятки. Величина поворота рукоятки определяется по формуле:

$$n_{\text{р}} = \frac{N}{z},$$

где $z$ – число, на которое требуется разделить обрабатываемую деталь;

$N$ – характеристика делительной головки (передаточное число – основные стандартные значения 30, 40, 60);

$Z_{\text{ЧШ}}$ – число зубьев червячной шестерни;

$K$ – число заходов червяка для данной головки,

$$N = 40; \quad K = 1; \quad Z_{\text{ЧШ}} = 40.$$

Если при вычислении число оборотов рукоятки получится дробным, то его необходимо преобразовать таким образом, чтобы

знаменатель дроби был ***равен числу отверстий на одной из окружностей на делительном диске 9.***

**Пример.** Требуется профрезеровать 18 канавок. Определить число оборотов рукоятки.

$$n_{\text{р}} = \frac{N}{z} = \frac{40}{18} = 2\frac{4}{18} = 2\frac{2}{9} = 2\frac{2^{\times 6}}{9^{\times 6}} = 2 + \frac{12}{54}.$$

Число 2 показывает, что после фрезерования каждой канавки рукоятку *7* необходимо повернуть на 2 полных поворота и двенадцать отверстий на окружности делительного диска с числом отверстий 54. Итак, для деления заготовки на 18 частей необходимы 2 оборота рукоятки *7* и 12 отверстий на окружности делительного диска *9* с 54 отверстиями. Устанавливаем раздвижной сектор *6* так, чтобы общее число отверстий, заключенных между внутренними сторонами (с фаской) линеек, было 12 + 1 = 13 (т.е. 12 интервалов между отверстиями) и к двум оборотам рукоятки добавляем поворот сектора.

**Метод дифференциального деления.**

Необходимый поворот шпинделя в случае дифференциального деления осуществляется поворотом рукоятки и делительного диска. Для этого фиксатор *10* (см. рис. 10) должен быть освобожден. Вращение делительного диска будет осуществляться от шпинделя *11* (см. рис. 10) через гитару сменных колес и коническую пару с передаточным отношением $i = 1$. Настройка головки заключается в определении числа оборотов рукоятки (как и в простом делении) и чисел зубьев гитары сменных колес.

Число оборотов рукоятки подсчитывают обычным методом деления, заменяя число делений, на которое нельзя разделить методом простого деления, числом $z_{\text{ПР}}$, близким к нему, но на которое возможно деление.

$$n_{\text{Р}} = \frac{N}{z_{\text{ПР}}}.$$

В этом случае при каждом приеме деления будет возникать погрешность $\alpha_x$, которая должна компенсироваться дополнительным поворотом делительного диска в ту или иную сторону. Этот поворот обеспечивается гитарой сменных колес $\frac{a}{b}\cdot\frac{c}{d}$ или $\frac{a}{d}$ с паразитным промежуточным колесом.

$$\frac{a}{b}\cdot\frac{c}{d}=i_{\text{г}}=\frac{N(z-z_{\text{ПР}})}{z_{\text{ПР}}}.$$

Направление вращения делительного диска должно быть тем же, что и направление вращения рукоятки.

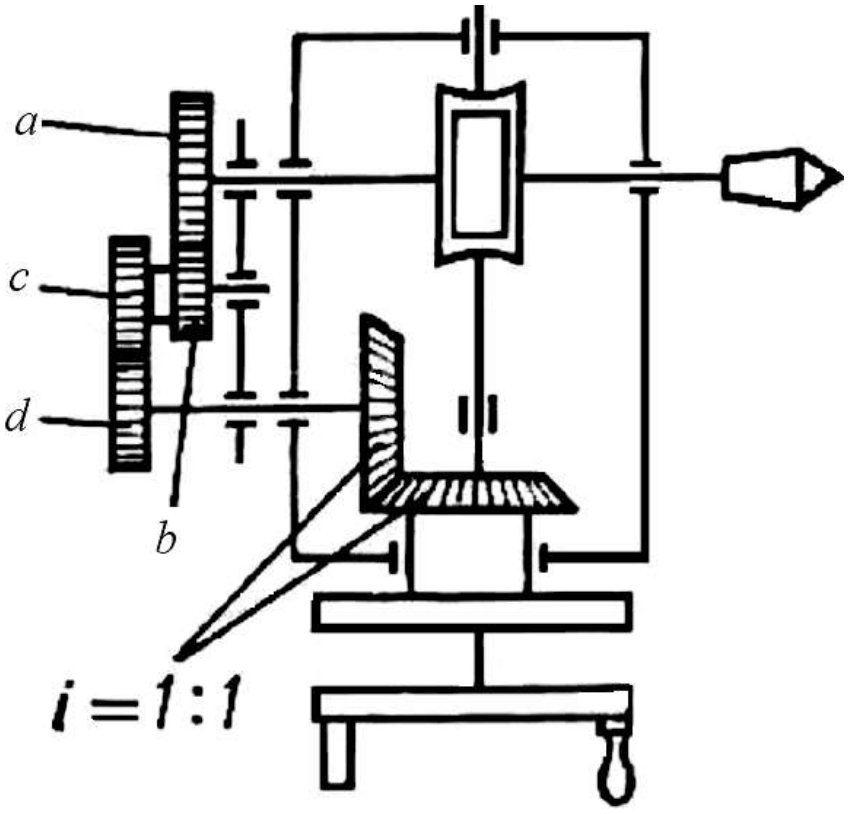



Рис. 10. Кинематическая схема УДГ, настроенной на дифференциальное деление.

**Пример.** Требуется нарезать шестерню с числом зубьев $z$ = 93. Подбираем вспомогательное число $z_{\text{ПР}}$, близкое к заданному числу зубьев $z_{\text{ПР}}$ = 90.

В этом случае поворот рукоятки при делении определяется как

$$n_{\text{Р}} = \frac{N}{z_{\text{ПР}}} = \frac{40}{90} = \frac{4^{\times 6}}{9^{\times 6}} = \frac{24}{54} \quad \text{оборота.}$$

Передаточное отношение гитары, обеспечивающей деление на 93

$$i_{\text{г}} = \frac{N(z - z_{\text{ПР}})}{z_{\text{ПР}}} = \frac{40 \cdot (93 - 90)}{90} = \frac{120}{90} = \frac{4 \cdot 3}{3 \cdot 3} = \frac{4^{\times 10} \cdot 3^{\times 20}}{3^{\times 10} \cdot 3^{\times 20}} = \frac{40 \cdot 60}{30 \cdot 60}.$$

Получим $a = 40$, $b = 30$, $c = 60$, $d = 60$(см. Таблицу на стр.51).

Количество шестерен в гитаре может быть равным от 2 до 5.

Знак "–" значения передаточного отношения гитары сменных колес $i_{\text{г}}$ означает, что направление поворота делительного диска *9* (рис. 10) осуществляется в противоположную сторону от поворота рукоятки, уменьшая величину поворота рукоятки относительно делительного диска.

**Фрезерование винтовых канавок**

Фрезерование винтовых канавок производится при продольном перемещении стола фрезерного станка и одновременном вращении детали, закрепленном в делительной головке относительно своей оси. Для согласования вращения детали с продольным перемещением стола устанавливается гитара сменных шестерен, передающая вращение от ходового винта фрезерного станка через пару конических шестерен, червяк и червячное колесо на шпиндель делительной головки *11*. Делительный диск *9* при этом должен быть освобожден от стопора *10* и соединен с рукояткой фиксатором *8* (см. рис. 9 и 11).

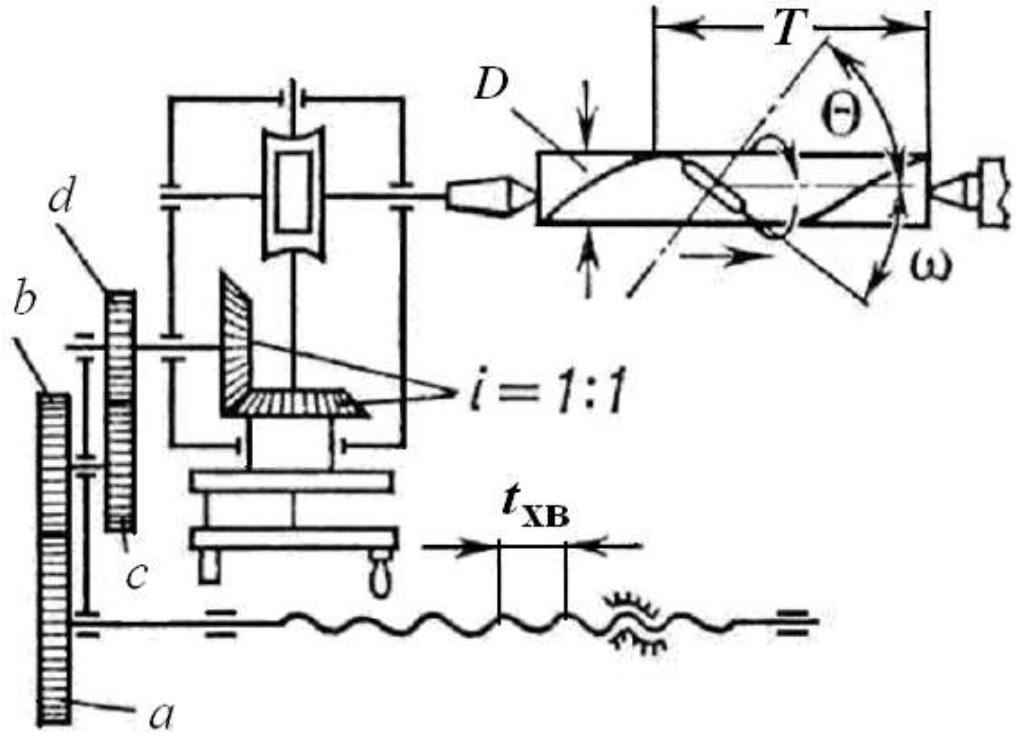



Рис. 11. Кинематическая схема УДГ,
настроенной на фрезерование винтовой канавки.

За один поворот заготовки стол должен перемещаться на величину:

$$1_{\text{ОБ.ЗАГ.}} \cdot \frac{Z_{\text{ЧШ}}}{K} \cdot i_k \cdot \frac{1}{i_{\Gamma}} = \frac{NT}{t_{\text{Х}} \cdot b},$$

$$i_k = 1; \quad \frac{Z_{\text{ЧШ}}}{K} = N; \quad i_{\Gamma} = \frac{t_{\text{ХВ}} \cdot N}{T} = \frac{a}{b} \cdot \frac{c}{d},$$

где $t_{\text{ХВ}}$ – шаг ходового винта продольной подачи фрезерного станка;

$T$ – шаг нарезаемой винтовой канавки;

$N$ – характеристика делительной головки.

При нарезании винтовых канавок фреза должна быть повернута

на угол наклона винтовой линии заготовки ω. Это достигается поворотом стола на тот же угол, который определяется по формуле

$$\mathrm{tg}\alpha = \frac{\pi \cdot D}{T},$$

где $D$ – диаметр обрабатываемой детали.

Следовательно, нарезание винтовых канавок возможно лишь на универсально-фрезерном станке, имеющем поворотный стол.

**Пример.** Профрезеровать винтовую канавку с шагом $T = 25$ мм: шаг ходового винта $t_{\text{ХВ}} = 6$ мм, диаметр заготовки $D = 12$ мм.

$$i_{\Gamma} = \frac{a}{b} \cdot \frac{c}{d} = \frac{40 \cdot 6}{25} = \frac{40^{\times 2} \cdot 6^{\times 15}}{1^{\times 2 \times 15} \cdot 25} = \frac{80}{30} \cdot \frac{90}{25}$$ (см. табл. 10).

Таблица 10

**Набор сменных шестерен к гитаре сменных шестерен**

| № | Количество зубьев у шестерни | Количество шестерен в наборе | № | Количество зубьев у шестерни | Количество шестерен в наборе |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 25 | 2 | 7 | 60 | 2 |
| 2 | 30 | 2 | 8 | 70 | 2 |
| 3 | 35 | 2 | 9 | 80 | 2 |
| 4 | 40 | 2 | 10 | 90 | 2 |
| 5 | 50 | 2 | 11 | 100 | 2 |
| 6 | 55 | 2 | – | – | – |

Формулы для определения:

а) диаметра заготовки шестерни по заданному количеству зубьев и модулю – $D = m(z + 2)$,

б) высоты зуба – $h = 2{,}2 \cdot m$.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назначение делительной головки.
2. В чем заключается настройка делительной головки?
3. На каких станках можно попользовать делительную головку?
4. Какие работы можно выполнять с помощью делительной головки?
5. В чем заключается настройка делительной головки?
6. На каких станках можно производить фрезерование винтовых поверхностей?

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Горбунов Б.И.* Обработка металла резанием.- М.: Машиностроение. 1981.– 286 с.

2. *Барбашов Ф.А. и др*. Фрезерные и зуборезные работы. -М.: Высшая школа, 1983.– 304 с.

3. Головки делительные универсальные: Техническое описание и инструкция по эксплуатации Ю-42.47.013 ТО, 1978.

# СОДЕРЖАНИЕ

РАБОТА № 1. ИЗУЧЕНИЕ УСТРОЙСТВ, РАСШИРЯЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СТАНКОВ ..... 3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ИЗУЧЕНИЕ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ ..... 10
РАБОТА № 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕРЖИВАЮЩЕГО УСИЛИЯ ЗАЖИМНОГО УСТРОЙСТВА ..... 36
РАБОТА № 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК В ТИСКАХ, ПАТРОНЕ ..... 44
РАБОТА № 5. ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ УНИВЕРСАЛЬНЫХ БЕЗНАЛАДОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ ..... 51
РАБОТА № 6. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ 3-Х КУЛАЧКОВОГО ПАТРОНА ПО ТОЧНОСТИ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЭТАЛОННЫХ ДЕТАЛЕЙ ..... 69
РАБОТА № 7. ИЗУЧЕНИЕ ДЕЛИТЕЛЬНОЙ ГОЛОВКИ ИРАСЧЕТ ГИТАРЫ СМЕННЫХ ШЕСТЕРЕН ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДЕЛЕНИЯ И ФРЕЗЕРОВАНИЯ ВИНТОВЫХ КАНАВОК ..... 73

Сергей Александрович Волегов

**Лабораторный практикум**

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА

*Лабораторный практикум*
по дисциплине « Технологическое оборудование
машиностроительного производства»
для студентов направления подготовки
15.03.01 «Машиностроение» специализации
«Оборудование и технология повышения износостойкости
и восстановления деталей машин и аппаратов»

Корректура кафедры эксплуатации горного оборудования

Подписано в печать

Бумага писчая. Формат бумаги 60 × 84 1/16. Печать на ризографе.

Печ.л. 3,4. Уч.– изд.л. Тираж 50 экз. Заказ №

Издательство УГГУ.

620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева 30.

Уральский государственный горный университет

Лаборатория множительной техники

Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

**С. А. Волегов, Т.П. Глинникова**

# ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ И ПРИСПОСОБЛЕНИЯ. МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

***практикум***

**по выполнению самостоятельных работ для студентов направления бакалавриата: 15.03.01 «Машиностроение» и СПО специальности 15.02.01 «Монтаж и техническая эксплуатация промышленного оборудования (по отраслям)»**

***очного и заочного обучения***

**Екатеринбург**
**2019**

Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
Методической комиссией
горно-механического факультета
Председатель комиссии
проф. В. П. Барановский

С. А. Волегов, Т. П. Глинникова

# ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ И ПРИСПОСОБЛЕНИЯ. МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

*практикум*
по выполнению самостоятельных работ
для студентов направления бакалавриата:
15.03.01 «Машиностроение» и СПО
специальности 15.02.01 - «Монтаж и техническая эксплуатация промышленного оборудования (по отраслям)»
*очного и заочного обучения*

Издание УГГУ Екатеринбург, 2019

Рецензент: *А. П. Комиссаров*, д-р техн. наук, профессор кафедры ГМК Уральского государственного горного университета

Руководство рассмотрено на заседании кафедры эксплуатации горного оборудования 05 марта 2016 г. (протокол № 6) и рекомендовано для переиздания в УГГУ.

**Волегов С. А., Глинникова** Т. П. ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ И ПРИСПОСОБЛЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА: практикум по выполнению самостоятельных работ для студентов направления бакалавриата:15.03.01 «Машиностроение» и СПО специальности 15.02.01 «Монтаж и техническая эксплуатация промышленного оборудования (по отраслям)» очного и заочного обучения / Волегов С. А., Глинникова Т. П**.** Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2019. – *** с.

Руководство составлено для проведения лабораторных работ по дисциплине "Технологическое оборудование машиностроительного производства". В руководстве изложены краткие сведения об устройстве токарно-винторезных станков и методах обработки на них. Рассмотрен выбор инструмента в зависимости от обрабатываемой поверхности.

Для студентов специальности для студентов направления бакалавриата: 15.03.01 «Машиностроение» очного и заочного обучения

© Волегов С. А., Глинникова Т. П., 2019
© Уральский государственный горный университет, 2019

# РАБОТА №1
# АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКАХ

## Задание

Для поверхностей, заданных в исходных данных (табл. 1), обозначить на эскизе направляющую и образующую линии, определить обратимость поверхностей, предложить метод образования поверхностей (копирование, след, обкат, касание), назвать металлорежущий станок, на котором выбранный метод может быть реализован**.**

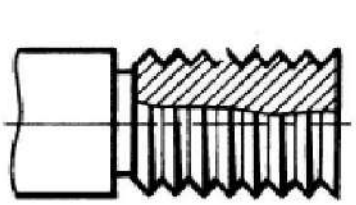
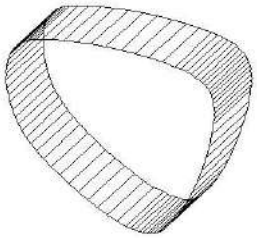
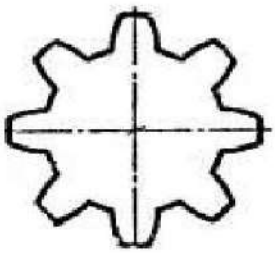
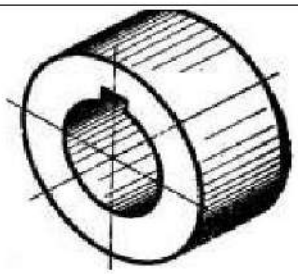
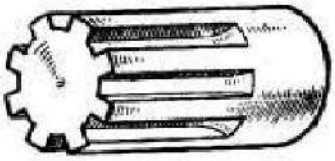
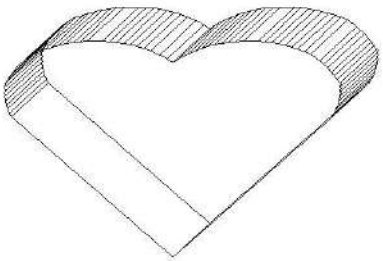
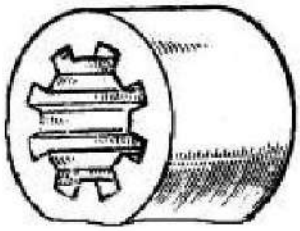
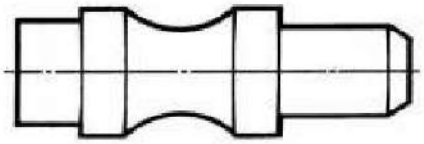
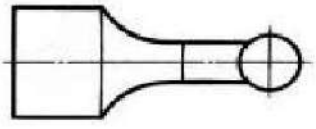
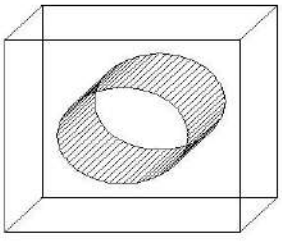
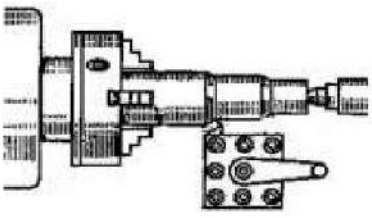
## Теоретические сведения

Поверхности деталей машин, обрабатываемые на металлорежущих станках, могут быть геометрически представлены как результат согласованного движения двух производящих линий: образующей и направляющей. При обработке перемещение образующей линии по направляющей, образующее требуемую поверхность, обеспечивается относительным движением заготовки и инструмента. В отдельных случаях роль образующей линии выполняет профиль режущей кромки инструмента. Поверхности детали, образованные определенным способом согласования линий, могут быть обратимые (плоские, цилиндрические) и необратимые (винтовая, коническая). При образовании обратимых поверхностей образующая и направляющая линии могут менять свои функции, а при образовании необратимых – нет. Производящая линия может быть получена одним из следующих методов:

1. Метод копирования (производящая линия представляет собой копию режущей кромки инструмента, которая перемещается в направлении движения подачи).
2. Метод обката (производящая линия получается как огибающая несколько положений режущей кромки инструмента при ее обкате по начальной окружности).
3. Метод следа (производящая линия получается в результате движения режущей точки вдоль заданной траектории, т. е. является следом от движения режущей точки).

Таблица 1

**Исходные данные для анализа поверхностей**

| Варианты | Наименование | Вид поверхности |
|---|---|---|
| 1.<br><br>2. | Резьбовая поверхность,<br><br>Наружный контур кулачка |   |
| 3.<br><br>4. | Зуб колеса<br><br>Шпоночный паз |   |
| 5.<br><br>6. | Шлицевый вал<br><br>Внутренний контур |   |
| 7.<br><br>8. | Шлицевое отверстие<br><br>Фасонный профиль |   |
| 9.<br><br>10. | Фасонный профиль<br><br>Отверстие |   |
| 11.<br><br>12. | Внутренний зуб колеса<br><br>Поверхность ступенчатого вала |   |

4. Метод касания (производящая линия образуется как огибающая совокупность траекторий движения режущей точки). Отметим, что при методе следа контакт режущей кромки инструмента постоянный, а при методе касания – прерывистый.

# РАБОТА №2
# РАСЧЕТ МОДУЛЯ РЕЙКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАДАННОЙ ВЕЛИЧИНЫ ПОДАЧИ

## Задание

Определить значение модуля рейки для получения заданной величины подачи суппорта токарного станка, который перемещается в продольном направлении с подачей *S*.

**Исходные данные:** $Z_ш$ − число зубьев приводной реечной шестерни; $i_р$ − передаточное отношение механизма реверса; $i_г$ − передаточное отношение гитары сменных колес; $i_{кп}$ − передаточное отношение коробки подач; $i_ф$ − передаточное отношение фартука. Исходные данные приведены в табл. 2.

## Теоретические сведения

Зубчато-реечные передачи относятся к механизмам для преобразования вращательного движения в поступательное. Зубчато-реечные передачи состоят из двух основных элементов: зубчатой рейки и реечной шестерни (рис. 2). В токарных станках зубчато-реечная передача применяется для преобразования вращательного движения, передаваемого на реечную шестерню от коробки подач через ходовой вал и механизмы фартука, в поступательное движение суппорта станка. Реечная шестерня, закрепленная на валу фартука, входит в зацепление с зубчатой рейкой, закрепленной на станине, что и обеспечивает поступательное перемещение суппорта станка по продольным направляющим.

Основными параметрами зубчато-реечной передачи являются модуль рейки и число зубьев реечной шестерни. Для решения задачи следует составить уравнение кинематического баланса, связывающее

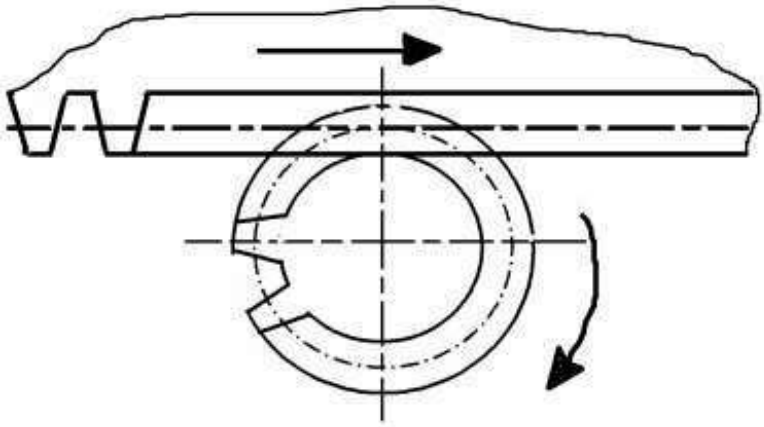


Рис. 2. Зубчато-реечная передача

Таблица 2

**Исходные данные для расчета значения модуля рейки**

| Вариант | $S$ мм/об | $i_р$ | $i_г$ | $i_{кп}$ | $i_ф$ | $Z_ш$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,150 | 0,66 | 0,625 | 0,10 | 0,04 | 12 |
| 2 | 0,150 | 0,70 | 0,500 | 0,10 | 0,04 | 16 |
| 3 | 0,200 | 0,66 | 0,625 | 0,10 | 0,04 | 18 |
| 4 | 0,200 | 0,70 | 0,500 | 0,10 | 0,03 | 20 |
| 5 | 0,340 | 0,66 | 0,625 | 0,10 | 0,04 | 14 |
| 6 | 0,340 | 0,66 | 0,400 | 0,10 | 0,03 | 12 |
| 7 | 0,300 | 0,66 | 0,625 | 0,10 | 0,04 | 16 |
| 8 | 0,300 | 0,65 | 0,500 | 0,15 | 0,02 | 14 |
| 9 | 0,124 | 0,66 | 0,625 | 0,10 | 0,04 | 18 |
| 10 | 0,124 | 0,50 | 0,500 | 0.10 | 0,03 | 20 |
| 11 | 0,100 | 0,66 | 0,625 | 0,10 | 0,04 | 22 |
| 12 | 0,100 | 0,66 | 0,500 | 0,08 | 0,02 | 24 |
| 13 | 0,120 | 0,66 | 0,625 | 0,10 | 0,04 | 22 |
| 14 | 0,120 | 0,50 | 0,400 | 0,08 | 0,05 | 20 |
| 15 | 0,120 | 0,60 | 0,500 | 0,12 | 0,03 | 18 |
| 16 | 0,150 | 0,70 | 0,500 | 0,10 | 0,03 | 16 |
| 17 | 0,200 | 0,70 | 0,500 | 0,10 | 0,04 | 24 |
| 18 | 0,200 | 0,65 | 0,625 | 0,08 | 0,02 | 26 |
| 19 | 0,250 | 0,66 | 0,625 | 0,10 | 0,04 | 28 |
| 20 | 0,250 | 0,70 | 0,625 | 0,15 | 0,04 | 22 |

движение шпинделя и движение суппорта (за один оборот шпинделя суппорт перемещается на величину подачи). Следовательно,

$$1_{\text{об.шп.}} \cdot C_{\text{кц}} \cdot i_v \cdot \pi \cdot m \cdot Z_{\text{ш}} = S ,$$

где $C_{\text{кц}}$ – постоянное передаточное отношение, характеризующее цепь; $i_v$ − передаточное отношение регулирующего звена, $m$ – модуль реечного колеса, мм; $S$ – величина подачи, мм/об.

# РАБОТА №3
# РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ СМЕЩЕНИЯ ЗАДНЕЙ БАБКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОНУСА НА ТОКАРНОМ СТАНКЕ

## Цель работы

Изучить способы обработки конических поверхностей на токарно-винторезном станке модели 1616. Изучить приемы наладки станка на данный вид работы при различных способах точения.

**Исходные данные (**табл. 3**)**: $d_1$ – меньший диаметр, мм; $d_2$ – диаметр основания, мм; $l$ – высота конуса, мм; $L$ – расстояние между центрами, мм.

## Задание

Определить величину смещения центра задней бабки $h$ при обработке на токарном станке конусного валика с параметрами, приведенными в исходных данных. Дать рекомендации по настройке станка для изготовления конических поверхностей.

## Теоретические сведения.

Обработка конических поверхностей на токарных станках связана с образованием конуса (рис. 3). Основным параметром конической поверхности является конусность, которая определяется из выражения

$$K = \frac{D - d}{l} = 2\text{tg}\alpha,$$

где $D$ – большой диаметр конуса, мм; $d$ – малый диаметр конуса, мм;

$l$ – расстояние между этими диаметрами, мм;α – угол при вершине конуса, °.

Таблица 3

**Исходные данные для изготовления конического валика в миллиметрах**

| Вариант | Параметры | | | | Вариант | Параметры | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $d$ | $D$ | $l$ | $L$ | | $d_1$ | $d_2$ | $l$ | $L$ |
| 1 | 35 | 40 | 150 | 200 | 13 | 25 | 30 | 100 | 120 |
| 2 | 30 | 40 | 120 | 200 | 14 | 25 | 32 | 100 | 120 |
| 3 | 25 | 30 | 100 | 150 | 15 | 25 | 35 | 100 | 120 |
| 4 | 35 | 45 | 120 | 180 | 16 | 30 | 35 | 100 | 120 |
| 5 | 35 | 50 | 120 | 150 | 17 | 30 | 40 | 100 | 120 |
| 6 | 35 | 40 | 120 | 180 | 18 | 30 | 42 | 100 | 120 |
| 7 | 20 | 30 | 120 | 130 | 19 | 35 | 40 | 120 | 130 |
| 8 | 20 | 30 | 110 | 130 | 20 | 35 | 42 | 120 | 130 |
| 9 | 40 | 45 | 150 | 200 | 21 | 35 | 48 | 120 | 130 |
| 10 | 45 | 50 | 160 | 200 | 22 | 40 | 58 | 120 | 130 |
| 11 | 48 | 52 | 160 | 200 | 23 | 40 | 56 | 120 | 150 |
| 12 | 45 | 50 | 80 | 100 | 24 | 40 | 55 | 150 | 150 |

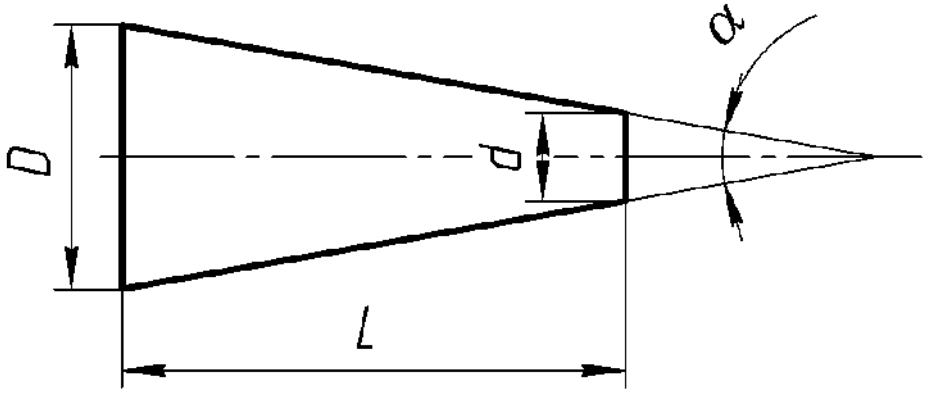



Рис. 3. Элементы конуса:
α – угол конуса; $d$ – малый диаметр конуса; $D$ – большой диаметр конуса;
$l$ – длина конуса

Конусность обозначается

__1: $x$ ,

где 1 – условное обозначение половины разности диаметров мм;
$x$ – величина, показывающая во сколько раз расстояние между этими диаметрами больше половины разности диаметров.

Например, для конусности __1 : 20 , известном $D$ = 60 мм и $d$ = 50 мм, расстояние между этими диаметрами

$$L = \frac{D - d}{1} \cdot 20 = \frac{60 - 50}{1} \cdot 20 = 200\text{мм}.$$

ГОСТом предусмотрен ряд значений конусности в диапазоне __1 : 500 – __1 : 3.

Конусы с конусностью 1:20 называются "Метрические". В табл.4 представлен размерный ряд метрических конусов

Таблица 4

| Конус метрический | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Обозначение | 4 | 6 | 80 | 100 | 120 | 160 |
| $D$, мм | 4 | 6 | 80 | 100 | 120 | 160 |
| $d$, мм | 3 | 4,6 | 71,5 | 90 | 108,5 | 145,5 |
| Конусность | 1:20 | | | | | |

Предусмотрены (ГОСТ 15945-70) конусы с конусностью 7:24. В табл.5. представлен размерный ряд конусов 7:24

Таблица 5

| Конус7:24 | | |
|---|---|---|
| Обозначение конусов | $D$, мм | $d$, мм |
| 10 | 15,87 | 9,5 |
| 15 | 19,05 | 11,2 |
| 25 | 25,40 | 13,8 |
| 30 | 31,75 | 17,4 |
| 35 | 38,1 | 21,4 |
| 40 | 44,45 | 25,3 |
| 45 | 57,15 | 32,4 |
| 50 | 69,85 | 39,6 |
| 55 | 88,90 | 50,5 |
| 60 | 107,95 | 60,2 |
| 65 | 133,35 | 75,0 |
| 70 | 165,10 | 92,9 |
| 75 | 203,20 | 114,3 |

В станкостроительной и инструментальной промышленности широко применяются конусы "Морзе". Размеры этих конусов приведены в табл.6.

Таблица 6

| Обозначение конуса | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Конусность | 1:19,212 | 1:20,047 | 1:20,020 | 1:19,922 | 1:19,254 | 1:19,002 | 1:19,180 |
| *D*, мм | 9,045 | 12,065 | 17,780 | 23,825 | 31,267 | 44,399 | 63,348 |
| *d*, мм | 6,7 | 9,7 | 14,9 | 20,2 | 26,5 | 38,2 | 54,6 |

## Способы точения конусов и наладка станка

На токарно-винторезном станке получить коническую поверхность можно следующими способами:

– фасонным резцом;
– поворотом резцовых салазок;
– смещением корпуса задней бабки;
– применением копировальной линейки.

**Фасонным резцом** точатся короткие конусы длиной не более 20 мм. Схема резания представлена на рис. 4.

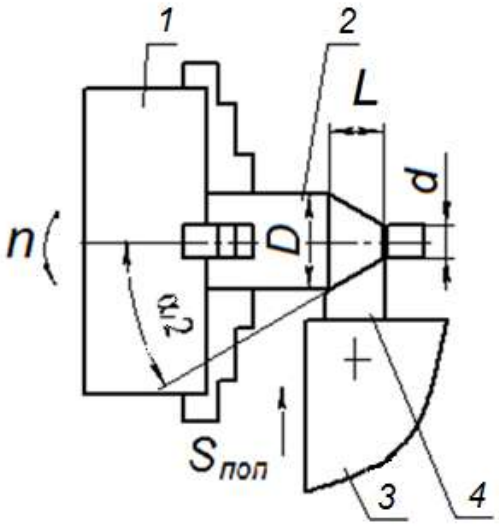



Рис. 4. Точение конуса фасонным резцом:
*1* – трехкулачковый патрон; *2* – обтачиваемая заготовка; *3* – резцедержатель; *4* – фасонный резец; *n* – вращение шпинделя; $S_{поп}$ – поперечная подача.

Данный способ требует два формообразующих движения: главное – вращение шпинделя $n$; установочное – перемещение резцедержателя $S_{поп}$

При использовании этого метода надо установить фасонный резец в резцедержатель и перемещать суппорт в поперечном направлении до упора, который настраивается по требуемым размерам конической поверхности.

Преимущество способа: не требуется дополнительная настройка станка. Недостатки способа: небольшая (до 20 мм) длина конуса $L$.

**Поворотом резцовых салазок** точатся относительно длинные конуса, но не более 140 мм. Схема резания представлена на рис.5.

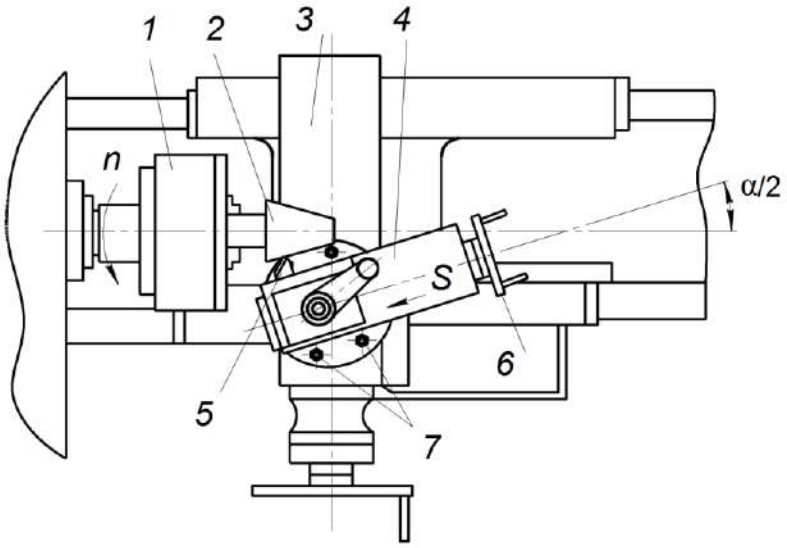



Рис. 5. Точение конуса поворотом резцовых салазок:
*1* – трехкулачковый патрон; *2* – обтачиваемая заготовка;*3* – поперечный суппорт; *4* – резцовые салазки; *5* – проходной резец; *6* – маховичок перемещения резцовых салазок;*7* – гайки крепления резцовых салазок; *n* – вращение шпинделя; *S* – подача

Данный способ требует два формообразующих движения: главное – вращение шпинделя $n$; подачи – перемещение резцедержателя с резцовыми салазками $S$.

При использовании этого способа необходимо ослабить две гайки *7*, крепящие резцовые салазки (расположены по две гайки спереди и сзади резцедержателя), развернуть резцовые салазки на угол α/2, затянуть гайки. Вращая маховичок переместить резцовые салазки с резцом вдоль образующей конуса.

Преимущества способа: простая наладка; можно точить наружные и внутренние поверхности.

Недостатки способа – длина конуса ограничена ходом резцовых салазок.

**Способом смещения корпуса задней бабки** точатся длинные конические поверхности. Схема резания представлена на рис. 6.

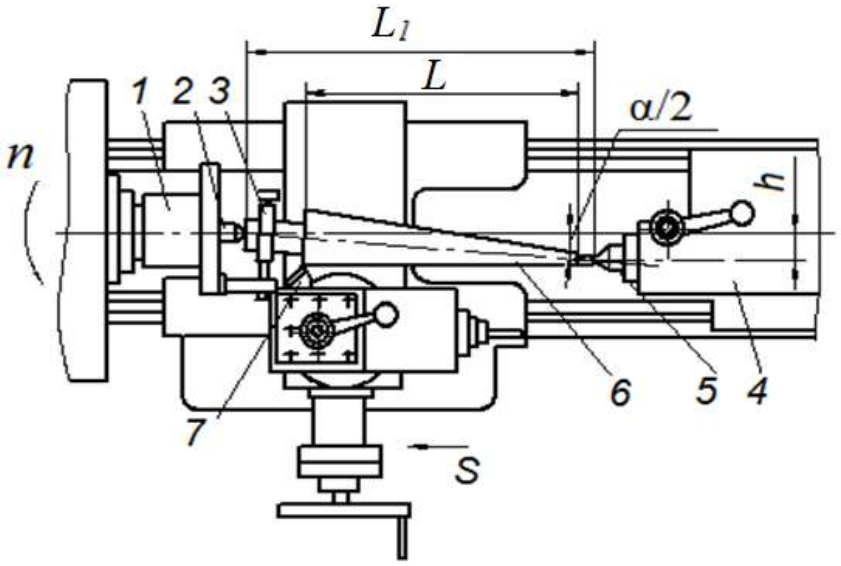



Рис. 6. Точение конуса способом перемещения задней бабки:
*1* – поводковый патрон; *2* – передний конус; *3* – хомут; *4* – задняя бабка;*5* – задний центр; *6* – заготовка; *7* – проходной резец; $n$ – вращение шпинделя; $S$ – подача

Данный способ требует два формообразующих движения: главное – вращение шпинделя $n$; подачи – перемещение салазок $S$.

При точении конуса этим способом в поводковый или трехкулачковый патрон устанавливается передний центр. В отверстие пиноли задней бабки устанавливается задний центр. Вращением винта на основании корпуса задней бабки смещают этот корпус на величину $h$. Контроль перемещения ведут по индикатору, закрепленному в индикаторной стойке.

Величина смещения $h$ определяется по формуле

$$h = \frac{L_1}{L} \cdot \frac{D - d}{2}.$$

На предварительно зацентрованную с двух сторон заготовку надевают и закрепляют хомут и устанавливают в центра.

Преимущества способа: можно точить длинные конуса.

Недостатки способа: достаточно сложная настройка, требующая приспособления; базирование заготовки в центрах при смещенной задней бабке грубое, что снижает точность обработки.

**Применение копировальной линейки** позволяет обтачивать длинные конуса в крупносерийном и массовом производствах. Схема резания представлена на рис. 7.

Данный способ требует три формообразующих движения: главное – вращение шпинделя $n$; продольной подачи $S_2$ – перемещение салазок; поперечной подачи $S_1$ – перемещение суппорта.

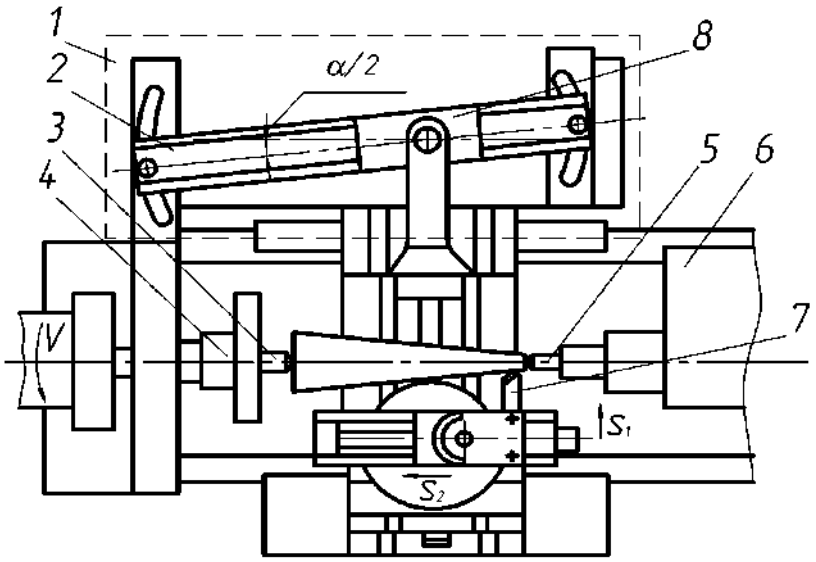



Рис. 7. Точение конусов с использованием копировальной линейки:
*1* – копировальное приспособление; *2* – копировальная линейка;
*3* – передний центр; *4* – поводковый патрон; *5* – задний центр; *6* – задняя бабка; *7* – резец проходной; *8* – ползун копировальной линейки

При использовании этого способа на станок с задней стороны к станине крепится копировальное приспособление. По направляющим копировальной линейки перемещается ползун, соединенный с суппортом станка. Заготовка устанавливается в центрах, резец крепится в резцедержателе. Копировальная линейка в корпусе приспособления поворачивается на угол α/2. При сообщении салазкам продольной подачи $S_2$ ползун копировальной линейки перемещается вдоль ее направляющих и сообщает резцедержателю с резцом поперечную подачу $S_1$. Таким образом, резец перемещается одновременно по двум координатам обтачивая коническую поверхность.

Преимущества способа: высокая точность обработки

Недостатки способа: требуется достаточно сложное приспособление.

## Ход выполнения работы

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы.
2. Визуально ознакомиться со станком. Определить местонахождение настроечных элементов, которые упоминаются в рассматриваемых ниже способах.

3. Для заданного варианта (табл. 7 и 8) рассчитать настроечные параметры для всех способов.
4. Нарисовать эскиз наладок для всех способов с указанием всех необходимых размеров.
5. Наладить станок на обработку конуса.
6. Составить отчет о проделанной работе.

## Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:
1. Описание назначения и области применения станка.
2. Рисунок общего вида с указанием основных узлов и элементов управления станком.
3. Эскизы наладок.
4. Расчет настроек станка.

**Примечание:** рисунки общего вида и наладок допускаются в виде ксерокопий.

### Контрольные вопросы

1. Назовите параметры конической поверхности.
2. Дайте определение конусности. Взаимосвязь конусности с другими параметрами конической поверхности.
3. Обозначение конусности. Типы конусов.
4. Назовите способы точения конусов и опишите суть каждого из них.
5. Назовите настроечные параметры и действия для каждого метода

## Задания к практической работе

Таблица 7

**Исходные данные для изготовления конического валика в миллиметрах**

| | *D* | *d* | *K* |
|---|---|---|---|
| 1. | 110 | 30 | 0,5 |
| 2. | 125 | 28 | 0,4 |
| 3. | 130 | 32 | 0,45 |
| 4. | 140 | 35 | 0,35 |
| 5. | 100 | 40 | 0,3 |
| 6. | 95 | 20 | 0,5 |
| 7. | 80 | 25 | 0,45 |
| 8. | 105 | 35 | 0,3 |
| 9. | 115 | 38 | 0,35 |

*Окончание табл.7*

| | | | |
|---|---|---|---|
| 10. | 135 | 40 | 0,4 |
| 11. | 145 | 50 | 0,5 |
| 12. | 85 | 40 | 0,45 |
| 13. | 90 | 35 | 0,3 |
| 14. | 70 | 20 | 0,35 |
| 15. | 75 | 25 | 0,4 |
| 16. | 120 | 33 | 0,5 |
| 17. | 135 | 36 | 0,3 |
| 18. | 130 | 42 | 0,4 |
| 19. | 140 | 53 | 0,45 |
| 20. | 115 | 32 | 0,35 |

Таблица 8

**Исходные данные для изготовления конического валика в миллиметрах**

| | $D$ | $d$ | $L_1$ | $L$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 300 | 250 | 400 | 380 |
| 2 | 315 | 265 | 450 | 420 |
| 3 | 350 | 250 | 500 | 480 |
| 4 | 280 | 235 | 550 | 300 |
| 5 | 295 | 245 | 600 | 500 |
| 6 | 275 | 250 | 350 | 320 |
| 7 | 250 | 200 | 370 | 300 |
| 8 | 260 | 215 | 430 | 400 |
| 9 | 200 | 175 | 410 | 370 |
| 10 | 210 | 190 | 380 | 340 |
| 11 | 220 | 165 | 420 | 400 |
| 12 | 230 | 200 | 510 | 500 |
| 13 | 245 | 205 | 470 | 450 |
| 14 | 255 | 190 | 370 | 300 |
| 15 | 270 | 210 | 340 | 310 |
| 16 | 280 | 235 | 280 | 260 |
| 17 | 290 | 240 | 320 | 290 |
| 18 | 265 | 235 | 410 | 380 |
| 19 | 275 | 250 | 630 | 420 |
| 20 | 240 | 200 | 660 | 620 |

# РАБОТА № 4
# НАСТРОЙКА ТОКАРНО-ВИНТОРЕЗНОГО СТАНКА МОДЕЛИ 1К62Д НА НАРЕЗАНИЕ РЕЗЬБЫ

**Цель работы**: Изучение настроек станка при нарезании различных резьб резцом. Для этого необходимо изучить:

– основные типы резьб, нарезаемых на станке;
– органы настройки, используемые при нарезании резьб;
– кинематические цепи станка, используемые при нарезании резьб.

## Назначение и область применения станка

Токарно-винторезный станок модели 1К62Д является универсальным и предназначен для различных токарных работ, обработки центральных отверстий, а также для нарезания резьб: метрической, дюймовой, модульной, питчевой и архимедовой спирали. Класс точности Н по ГОСТ 8-82.

## Основные технические данные и характеристики

| | |
|---|---|
| Наибольший диаметр обрабатываемого изделия над станиной, мм | 435 |
| Наибольший диаметр обрабатываемого изделия над суппортом, мм | 224 |
| Наибольшая длина обрабатываемого изделия, мм | 1000 |
| Наибольшая длина хода каретки, мм | 930 |
| Число ступеней частот вращения шпинделя: прямого вращения | 23 |
| Пределы частот вращения шпинделя, об/мин: | 12,5 - 2000 |
| Диапазон нарезаемых резьб: | |
| метрических, мм | 0,5 - 192 |
| модульных, мм | 0,5 - 48 |
| дюймовых, ниток на дюйм | 24 - $1^5/_8$ |
| питчевых, питч | 96 - 1 |
| архимедовой спирали, ступени | 4 |

## Устройство станка

На рис. 8 представлен общий вид станка с обозначением органов управления и основных узлов.

*Основные узлы станка (рис. 8)*

*I* – Шкаф управления; *II* – Бабка шпиндельная; *III* – Коробка подач; *IV* – Основание; *V* – Фартук; *VI* – Салазки; *VII* – Суппорт; *VIII* – Резцовый (поворотный) суппорт; *IX* – Станина; *X* – Бабка задняя.

*Органы управления станком*:

1. Рукоятка установки шага резьбы и величины подачи.
2. Рукоятка выбора типа резьбы и вида работ (резьба или подача).
3. Рукоятка установки частоты вращения шпинделя.
4. Рукоятка установки нормального или увеличенного шага резьбы и положения при делении многозаходных резьб.
5. Рукоятка установки правой и левой резьбы и подачи.
6. Рукоятка установки частоты вращения шпинделя.
7. Панель управления.
8. Вводной автоматический выключатель.
9. Сигнальная лампа.
10. Включатель насоса охлаждающей жидкости.
11. Амперметр.
12. Лимб жесткого упора.
13. Болты крепления жесткого упора.
14. Передвижной жёсткий упор.
15. Шпиндель.
16. Защитный кожух трехкулачкового патрона.
17. Рукоятка поворота и крепления резцедержателя.
18. Резцедержатель.
19. Зажим салазок
20. Рукоятка ручного перемещения резцовых салазок суппорта.
21. Трубка подвода СОЖ.
22. Кнопка ускоренного перемещения салазок и суппорта.
23. Рукоятка управления механическими перемещениями салазок и суппорта.
24. Рукоятка зажима пиноли задней бабки.
25. Рукоятка крепления задней бабки к станине.
26. Маховик перемещения пиноли задней бабки.
27. Рукоятка включения гайки ходового винта

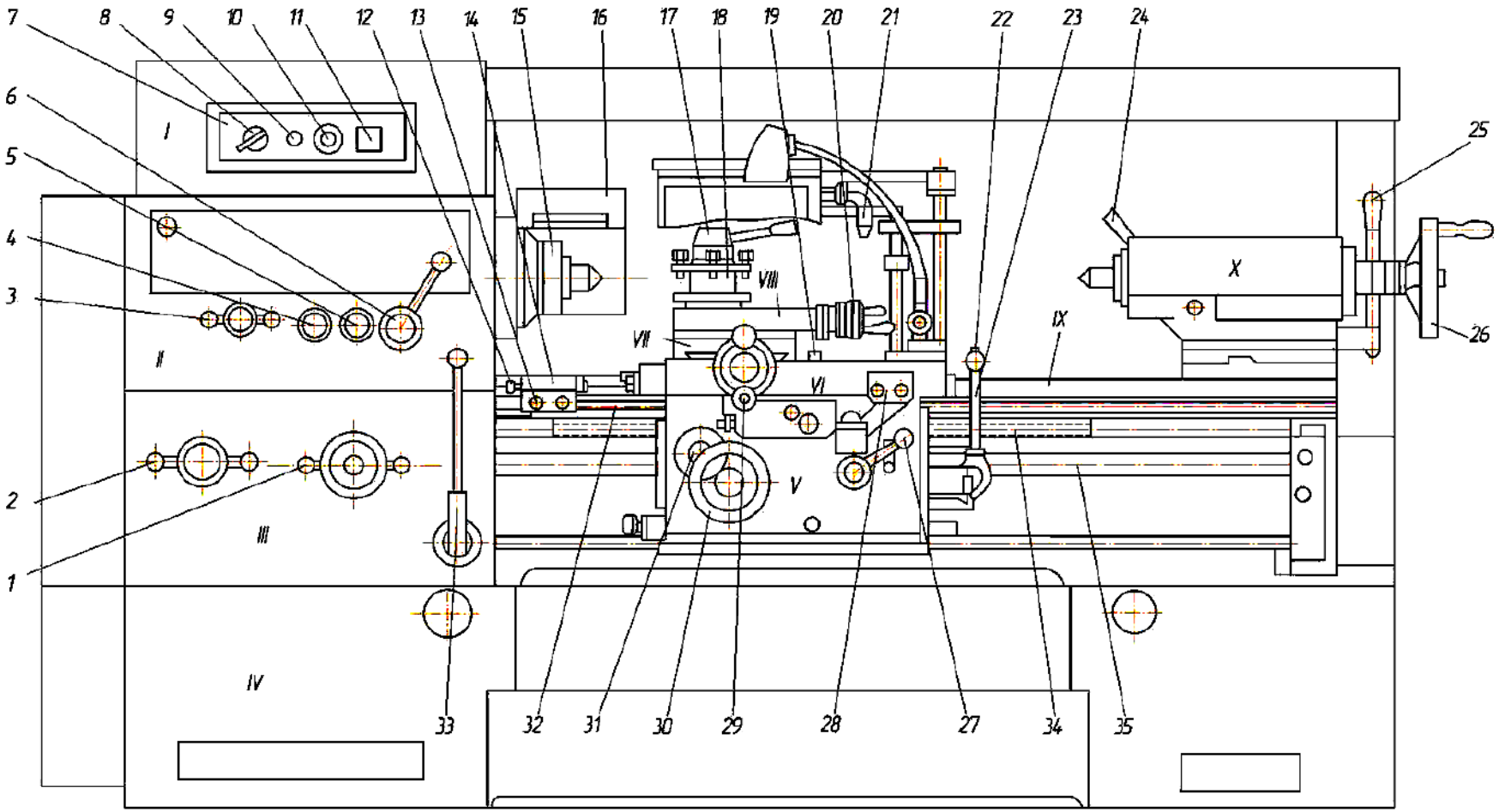



Рис. 8. Общий вид станка

28. Кнопки включения и выключения главного электродвигателя
29. Рукоятка перемещения суппорта.
30. Маховик ручного перемещения салазок.
31. Кнопка включения и выключения реечной шестерни.
32. Рейка продольной подачи.
33. Ручка включения правого или левого направления вращения шпинделя.
34. Ходовой винт.
35. Ходовой вал

## Кинематические зависимости при нарезании различных резьб

На станке могут нарезаться резьбы метрические, дюймовые, модульные, питчевые и архимедова спираль. Данные резьбы отличаются способом задания шага и профилем. Первые четыре нарезаются при продольном перемещении салазок, а архимедова спираль – при поперечном перемещении суппорта на торцевой поверхности заготовки.

Основным параметром резьбы является ее шаг – это расстояние между двумя соседними одноименными точками профиля резьбы.

Чтобы получить резьбовую поверхность резцом на круглой цилиндрической заготовке, необходимо одновременно вращать заготовку и перемещать резец вдоль ее оси. Таким образом, за один оборот заготовки резец должен переместиться на величину шага.

Уравнение настройки в резьбонарезной кинематической цепи имеет вид:

$$1 \text{ об. шп.} \cdot c \cdot i_{уш} \cdot i_{Б7} \cdot i_{г} \cdot i_{кп} \cdot i_{хв} \cdot = T, \cdot$$

где 1 об. шп. – один оборот шпинделя;

$c$ – константа резьбонарезной цепи;

$i_{уш}$ – передаточное отношение звена увеличения шага;

$i_{Б7}$ – передаточное отношение блока $Б_7$;

$i_{г}$ – передаточное отношение гитары сменных колес;

$i_{кп}$ – общее передаточное отношение коробки подач;

$t_{хв}$ – шаг ходового винта, мм;

$T$ – шаг нарезаемой резьбы, мм.

Константа "$c$" представляет собой произведение постоянных передаточных отношений между валами кинематической цепи. Передаточное отношение звена увеличения шага может быть равным 8 или 32. Передаточное отношение гитары сменных колес для стандартных резьб

метрических и дюймовых – 45 – 50, для модульных и питчевых 64 – 97. Для специальных резьб значения могут быть другие.

Шаг нарезаемой резьбы задается по-разному, в зависимости от типа резьбы. Шаг метрической резьбы задается непосредственно в миллиметрах. Шаг дюймовой резьбы задается в нитках на дюйм "$n$" и измеряется в миллиметрах по формуле

$$T = \frac{25{,}4}{n}, \text{мм.}$$

Шаг модульной резьбы задается в модулях "$m$" и измеряется в миллиметрах по формуле

$$T = \pi \cdot m, \text{ мм.}$$

Шаг питчевой резьбы задается диаметральным питчем "$P$" и измеряется в миллиметрах по формуле

$$T = \frac{25{,}4\pi}{P}, \text{мм.}$$

## Кинематика станка

Кинематическая структура станка состоит из одной сложной кинематической группы, создающей два формообразующих движения: главное и подачи.

**Главное движение** в станке – это вращение шпинделя. Кинематическая цепь главного движения (рис. 9) включает в себя электродвигатель, шпиндельную бабку с коробкой скоростей и шпинделем. Движение начинается от электродвигателя М1 и через клиноременную передачу передается на вал *I*. Прямое вращение передается на вал *II* через блок зубчатых колес Б1, а обратное через колеса 50, паразитный блок 24, 36, колесо 38. С вала *II* на вал *III* движение передается через колеса 29, 21, 38, и блок Б2. Далее движение может передаваться либо по короткой кинематической цепи сразу на вал *VI* (шпиндель) через колеса 65 или 30 и блок Б3, либо по длинной кинематической цепи через колеса 45 или 22 на блок Б4 на вал *IV*, через колеса 22–88 на вал *V*, колеса 30–60 на вал *VI* (шпиндель). Эта кинематическая цепь называется так же "Звено увеличение шага". При использовании этого звена вал *VII* может получать частоты вращения в восемь раз большие (1·4·2 = 8) при зацеплениях 45($Б_6$) – 45(вал *III*) – 45($Б_4$), 22–88, 30–60($Б_3$), либо в тридцать два раза большие (4·4·2 = 32) при зацеплениях 45($Б_6$)–45(вал *III*), 22(вал *III*)–88($Б_4$), 22–88, 30–60, чем при зацеплении колесо 60(вал *VI*–

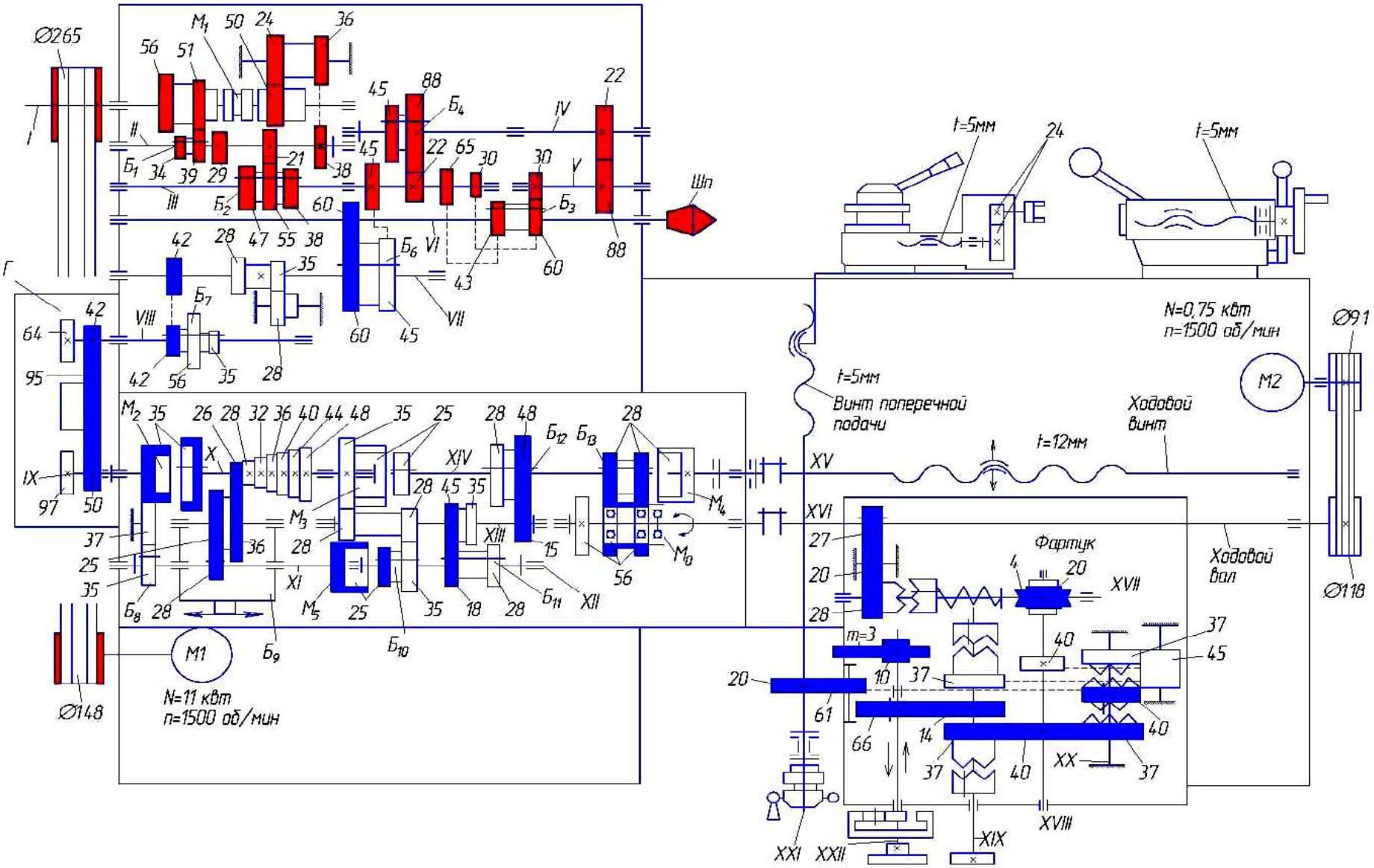



Рис. 9. Кинематическая схема станка

шпиндель) – 60($Б_6$).*Включение главного движения* осуществляется нажатием черной кнопки 28 (рис. 8). Правое вращение шпинделя включается наклоном до упора рукоятки 33 (рис. 8)вправо.

Левое вращение (реверс) включается поворотом этой же рукоятки против часовой стрелки до упора. Вертикальное положение рукоятки – останов шпинделя. Рукоятки *3* и *6* расположенные на корпусе шпиндельной бабки (рис. 8) служат для настойки главного движения на заданную частоту вращения шпинделя. Выключение главного движения осуществляется нажатием красной кнопки *28* (рис. 8). Положения рукояток, соответствующие той или иной частоте вращения шпинделя показаны в таблице, расположенной на корпусе шпиндельной бабки.

**ВНИМАНИЕ!!!** Переключение скоростей главного движения только при остановленном шпинделе, рукоятка *33* (рис. 8) находится в нейтральном положении).

**Движение резьбонарезания** в станке – это перемещение резца вдоль оси заготовки или в направлении перпендикулярном к оси заготовки (архимедова спираль). Кинематическая резьбонарезная цепь включает в себя звено увеличения шага (блок $Б_6$) для нарезания резьб с крупным шагом, механизм реверса (блок $Б_7$) для нарезания правых и левых резьб, гитару Г, коробку подач, ходовой винт, маточную гайку. Принцип передачи движения в коробке скоростей был рассмотрен выше. Тройной блок $Б_7$позволяет предавать вращение с передаточным отношением 0,5 (колеса 28 – 56) либо с отношением 1 (колеса 42–42). При помощи этого блока можно осуществить реверс движения (колеса 35–28–35). Гитара сменных колес позволяет настраиваться на тип резьбы и шаг при нарезании точных резьб. При данном резьбонарезании выходной вал гитары *IX* соединяется с ходовым винтом *XV* напрямую при включенных муфтах $М_2$, $М_3$ и $М_4$, расположенных в коробке подач. Шаг резьбы настраивается сменными колесами гитары, которые входят в комплект станка или поставляются по особому заказу.

*Коробка подач*. При помощи коробки подач настраиваются на шаг резьбы и ее тип. Метрическая резьба (кинематическая цепь рис. 10). При нарезании метрической резьбы устанавливаются колеса гитары 42–50. Включается муфта $М_2$, далее с вала *X* на вал *XI* через конус шестерен 26–48, колеса 36–25–28, включенную муфту $М_5$, на вал *XII*. С вала *XII* на вал *XIV* через блоки $Б_ц$ и $Б_{12}$ и при включенной муфте $М_4$ на ходовой винт с шагом $t$ = 12 мм.

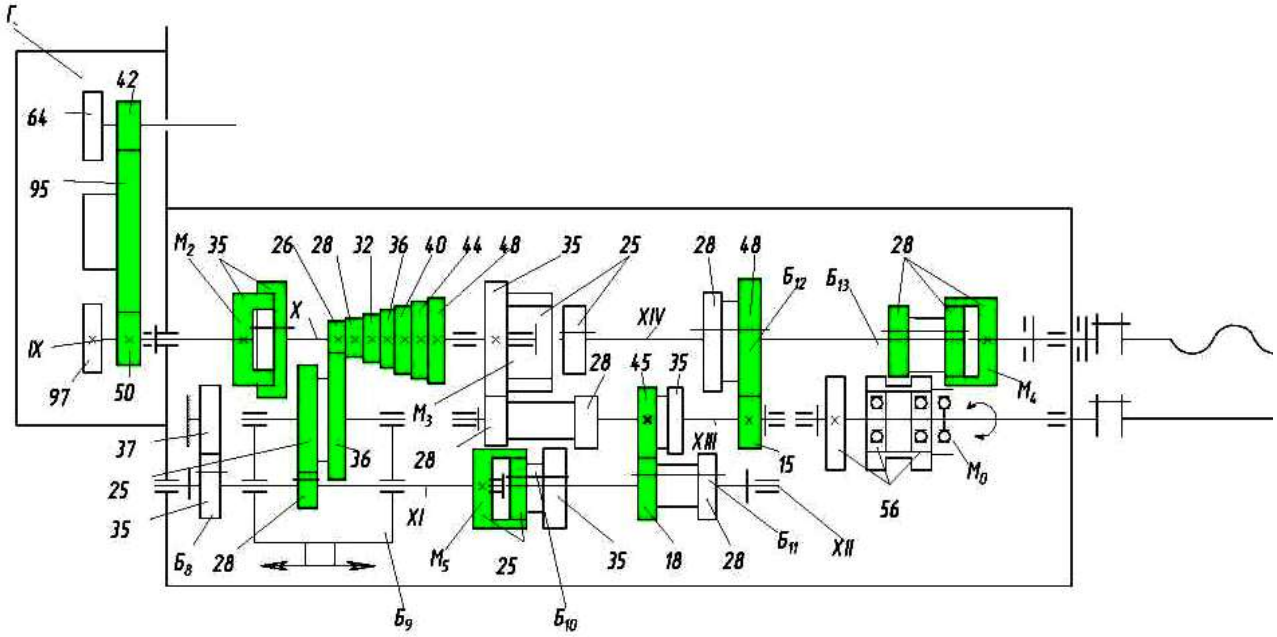



Рис. 10. Настройка для метрической резьбы

*Дюймовая резьба* (кинематическая цепь рис. 11) При нарезании дюймовой резьбы устанавливаются колеса гитары 42–50. Далее с вала *IX* при выключенной муфте $М_2$ движение передается на вал *XI* черезколеса 35–37–35, далее через колеса 28–25–36 накидного механизма конуса шестерен, конус шестерен 26–48. Далее при выключенной муфте $М_3$ с вала *X* на вал *XII* через колеса 35–28–28–35. Далее, с вала *XII* на вал *XIV* через блоки $Б_ц$ и $Б_{12}$ и при включенной муфте $М_4$ на ходовой винт с шагом $t$ = 12 мм.

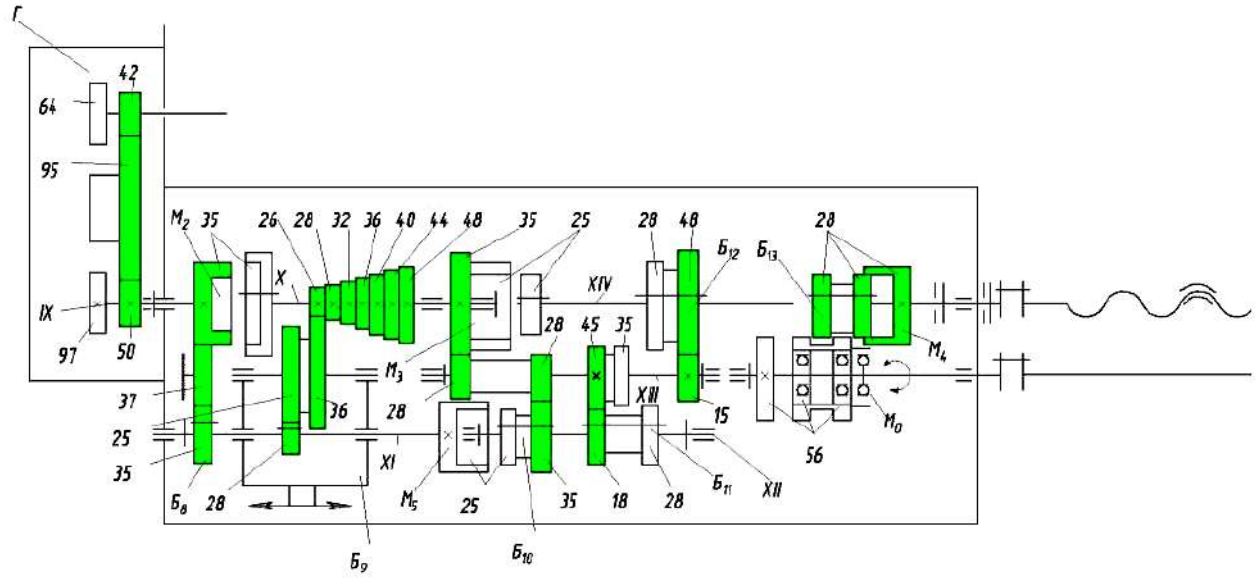



Рис. 11. Настройка для дюймовой резьбы

*Модульная и питчевая* резьбы нарезаются при настройке коробки подач соответственно метрической и дюймовой резьб, а колеса гитары настраиваются 64–97 (рисунки 12 и 13 соответственно).

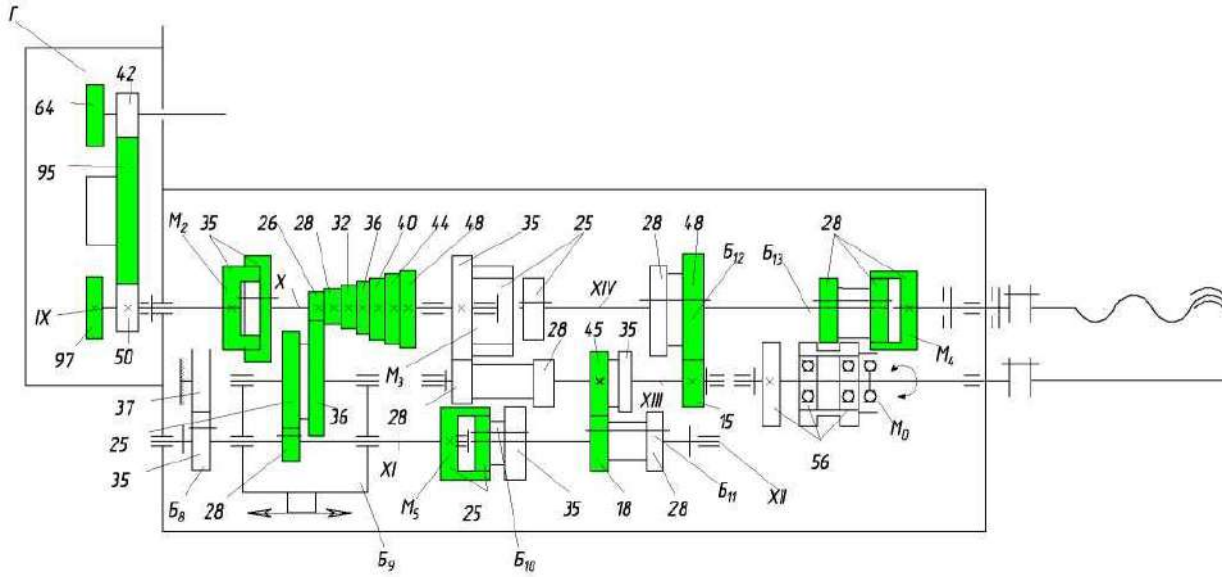



Рис. 12. Настройка для модульной резьбы

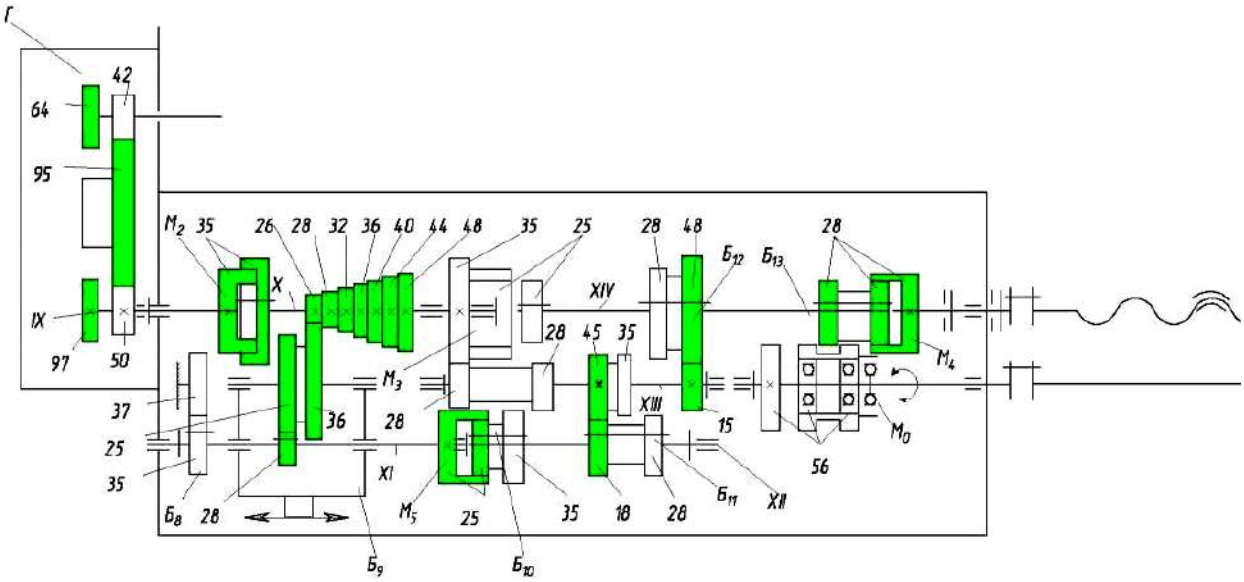



Рис. 13. Настройка для питчевой резьбы

Точные резьбы нарезаются по кинематической цепи, исключающей зубчатые передачи коробки подач, только через муфты (рис. 14). Настройка на требуемый шаг осуществляется гитарой сменных колес.

При установленных заготовке и резце нарезание резьбы осуществляется в следующей последовательности:

– в гитару устанавливаются соответствующие, нарезаемой резьбы колеса;

– рукоятка *2* (рис. 8) устанавливается в положение, соответствующее выбранному типу резьбы;

– рукояткой *1* выбирается необходимый шаг.

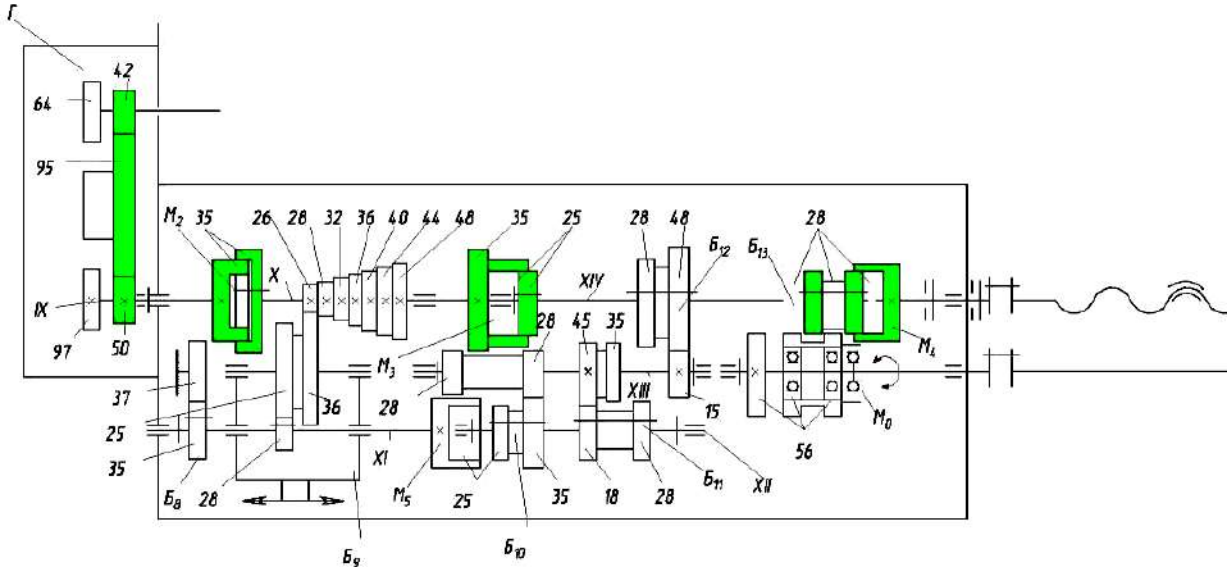



Рис. 14. Настройка для точных резьб

**ВНИМАНИЕ!!!** Вытягивать и вставлять внутренний барабан можно только при фиксированном положении барабана (раздается щелчок) наружного барабана.

– в соответствии с выбранным шагом устанавливают рукоятки 4, 5, 6;

– включают вращение шпинделя;

– включают маточную гайку поворотом рукоятки 27 (рис. 8) вниз до упора.

***Ход выполнения работы:***

– ознакомиться с описанием лабораторной работы;

– визуально на станке определить основные узлы и органы управления, упоминающиеся в описании;

– включить станок.

**ВНИМАНИЕ!!!** Включать станок в работу только в присутствие преподавателя.

– осуществить переключения в цепи главного движения и движения резьбонарезания для различных резьб и способов нарезания (по правилам, указанным выше);

– выключить станок;

– составить отчет.

## Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Описание назначения и области применения станка.
2. Рисунок общего вида с указанием основных узлов и элементов управления станком.
3. Кинематическую схему станка с выделением кинематических цепей главного движения и всех видов резьб различным цветом.
4. Расчет настроек станка для всех видов резьб.

**Примечание:** рисунки общего вида и кинематической схемы допускаются в виде ксерокопий.

## Контрольные вопросы

1. Назначение, область применения и основные технические характеристики станка.
2. Назовите органы управления станком.
3. Назовите основные узлы станка.
4. Назовите типы резьб нарезаемые на станке и зависимости для определения их шагов.
5. Покажите по кинематической схеме кинематическую цепь, используемую при нарезании дюймовой и питчевой резьб.
6. Покажите по кинематической схеме кинематическую цепь, используемую при нарезании метрической и модульной резьб.
7. Покажите по кинематической схеме кинематическую цепь, используемую при нарезании точных резьб.

# РАБОТА №5
# РАСЧЕТ НАСТРОЙКИ ТОКАРНО-ВИНТОРЕЗНОГО СТАНКА НА НАРЕЗАНИЕ РЕЗЬБЫ РЕЗЦОМ

***Задание.*** Рассчитать передаточное число $i_г$ и числа зубьев гитары сменных колес *a, b, c, d* и числа зубьев колес механизма Нортона для нарезания метрической и дюймовой резьбы на токарно-винторезном станке. Для гитары выполнить проверку по условию сцепляемости.

***Исходные данные:***

$P_{мр}$ − шаг метрической резьбы; мм; $P_{хв}$ − шаг ходового винта, мм; $n$ − число ниток на дюйм для дюймовой резьбы; $C$ − постоянная кинематической цепи; $K_{нр}$ – число заходов нарезаемой резьбы. Исходные данные приведены в табл.10. Число заходов нарезаемой резьбы для всех вариантов принимается равным 1.

***Теоретические сведения***. Одной из функций токарно-винторезного станка является нарезание резьбы резцом. Кинематическая цепь, служащая для настройки токарно-винторезного станка на нарезание резьбы резцом, является внутренней цепью и связывает вращение шпинделя и перемещение суппорта. Для нарезания резьбы нужно, чтобы при повороте шпинделя на один оборот суппорт с резцедержателем переместились на ход резьбы, равный $P_{мр}{\cdot}K_{нр}$. Ходовой винт, сообщающий резцу прямолинейное движение через разъемную гайку, получает вращение от шпинделя через гитару сменных колес (рис. 15) или механизм Нортона (рис. 16).

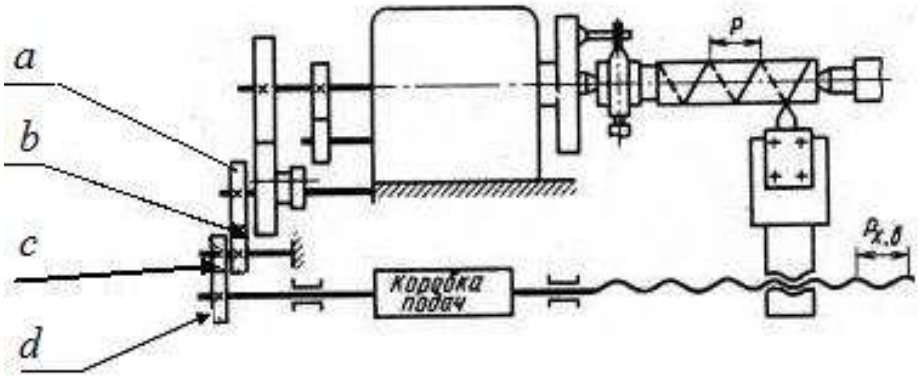



Рис. 15. Резьбонарезная цепь токарно-винторезного станка:
*a, b, c, d* − числа зубьев колес гитары

Расчет гитары сменных колес для нарезания метрической резьбы производится по формуле

$$1\text{об. шп} \times \frac{a}{b} \times \frac{c}{d} \times C_{\text{кц}} \times P_{\text{хв}} = P_{\text{нр}}.$$

Расчет гитары сменных колес для нарезания дюймовой резьбы производится по формуле

$$1\text{об. шп} \times \frac{a}{b} \times \frac{c}{d} \times C_{\text{кц}} \times P_{\text{хв}} = P_{\text{нр}} = \frac{25}{n}.$$

Шестиступенчатый механизм Нортона служит для настройки токарно-винторезного станка на нарезание резьбы резцом.

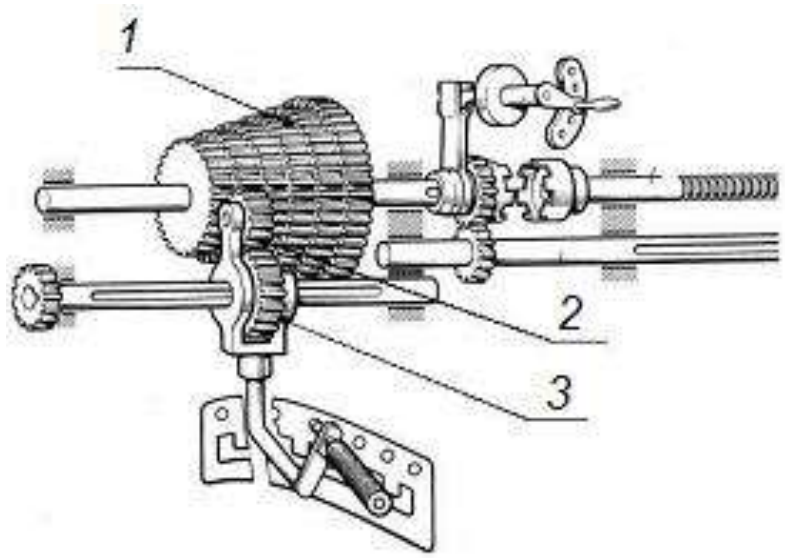



Рис. 16. Механизм Нортона:
*1*– блок зубчатых колес; *2* – паразитное колесо; *3* – передвижное колесо

Он состоит из конусного блока зубчатых колес *1*, которые могут последовательно входить в зацепление с передвижным колесом *3* через паразитное колесо *2* и множительного механизма, служащего для увеличения диапазона шагов нарезаемой резьбы. При настройке механизма Нортона на нарезание метрической и модульной резьбы ведущим является конусный блок колес, на нарезание дюймовой резьбы – подвижное колесо.

Для расчета параметров настройки механизма Нортона следует определить номер ступени механизма Нортона, передаточное число множительных передач, ведомое и ведущее звенья механизма Нортона (табл. 9).

Таблица 9

**Данные к расчету механизма Нортона**

| Номер ступени | Передаточное отношение множительных передач | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Метрическая резьба | | | Модульная резьба | | | Дюймовая резьба | | |
| | 1 : 2 | 1 : 1 | 2 : 1 | 1 : 2 | 1 : 1 | 2 : 1 | 1 : 2 | 1 : 1 | 2 : 1 |
| 1 | 1 | 2 | 4 | 1 | 2 | 4 | 16 | 8 | 4 |
| 2 | □ | □ | 4,5 | □ | 2,25 | 4.5 | 18 | 9 | □ |
| 3 | 1,25 | 2,5 | 5 | 1,25 | 2,5 | 5 | 20 | 10 | 5 |
| 4 | □ | □ | 5,5 | □ | 2,75 | 5,5 | □ | 11 | □ |
| 5 | 1,5 | 3 | 6 | 1,5 | 3 | 6 | 24 | 12 | 6 |
| 6 | 1,75 | 3,5 | 7 | 1,75 | 3,5 | 7 | 28 | 14 | 7 |

Значения шагов по вертикали можно получить переключением механизма Нортона, а по горизонтали – переключением множительного механизма. Механизм Нортона можно рассчитать по любому столбцу табл. 9 в том случае, если задана постоянная кинематической цепи $C$ по формуле

$$Z = C \cdot K_{нр} \cdot P_{нр} .$$

Пример при $C = 8$ по третьему столбцу для метрической резьбы:

$Z_1 = 8 \cdot 1 \cdot 4 = 32$ $Z_2 = 8 \cdot 1 \cdot 4{,}5 = 36$

$Z_3 = 8 \cdot 1 \cdot 5 = 40$ $Z_4 = 8 \cdot 1 \cdot 5{,}5 = 44$

$Z_5 = 8 \cdot 1 \cdot 6 = 48$ $Z_6 = 8 \cdot 1 \cdot 5{,}5 = 56$

Число зубьев подвижного колеса принимается равным числу зубьев первого колеса конического блока колес.

Шаги нарезаемой резьбы:

1) для модульной резьбы $P_{нр} = m \cdot \pi$;

2) для дюймовой резьбы $P_{нр} = 1 / n \cdot K_{нр}$.

Таблица 10

**Исходные данные для расчета настройки токарно-винторезного станка на нарезание резьбы резцом**

| Вариант | $P_{нр}$ | $P_{хв}$ | $C$ | $n$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 4 | 6 | 4 |
| 2 | 2 | 2 | 8 | 5 |
| 3 | 3 | 5 | 10 | 6 |
| 4 | 4 | 6 | 12 | 7 |
| 5 | 5 | 8 | 14 | 8 |
| 6 | 1,5 | 2 | 16 | 9 |
| 7 | 2,5 | 5 | 20 | 10 |
| 8 | 3.5 | 4 | 26 | 11 |
| 9 | 4,5 | 6 | 30 | 12 |
| 10 | 5,5 | 8 | 34 | 14 |
| 11 | 6 | 4 | 36 | 16 |
| 12 | 7 | 5 | 40 | 18 |
| 13 | 1,25 | 4 | 6 | 20 |
| 14 | 1,75 | 6 | 8 | 6 |
| 15 | 2,25 | 8 | 10 | 7 |
| 16 | 2,75 | 4 | 12 | 8 |
| 17 | 1,5 | 2 | 14 | 9 |
| 18 | 1,25 | 2 | 16 | 10 |
| 19 | 1 | 5 | 20 | 11 |
| 20 | 2 | 6 | 26 | 12 |
| 21 | 3 | 8 | 30 | 14 |
| 22 | 3,5 | 4 | 34 | 16 |
| 23 | 4,5 | 2 | 36 | 18 |
| 24 | 6 | 6 | 40 | 20 |

# РАБОТА №6
# РАСЧЕТ ПЕРЕДАТОЧНОГО ОТНОШЕНИЯ И ЧИСЕЛ ЗУБЬЕВ ГИТАРЫ СМЕННЫХ КОЛЕС

**Задание**. Для заданных в виде десятичной дроби передаточных отношений рассчитать числа зубьев двухпарной гитары сменных колес методом подбора, методом непрерывных дробей и методом Кнаппе. Определить относительную погрешность расчетного передаточного отношения.

***Исходные данные:***

$i_1$ – передаточное отношение для расчета методом подбора, $i_2$ – для расчета методом непрерывных дробей, $i_3$ – для расчета методом Кнаппе. Исходные данные приведены в табл. 11.

***Теоретические сведения***. Наборы сменных зубчатых колес, прилагаемые к металлорежущим станкам, содержат колеса с различными числами зубьев, в том числе колеса с простыми числами зубьев и колеса с числами зубьев, кратными простым.

Число зубьев сменных колес гитары равняется 20, 23, 24, 25, 30, 34, 40, 41, 43, 45, 47, 50, 55, 58, 59, 60, 61, 62, 65, 67, 70, 71, 73, 74, 79, 80, 83, 85, 89, 92, 95, 97, 98, 100.

При подборе сменных зубчатых колес полученное передаточное отношение гитары сменных колес преобразуется таким образом, чтобы числитель и знаменатель дроби представляли собой числа, соответствующие набору чисел зубьев сменных колес гитары. Используют три метода подбора чисел зубьев сменных колес: метод непосредственного подбора, метод непрерывных дробей, метод Кнаппе.

### *1) Метод непосредственного подбора чисел зубьев.*

Передаточное отношение представляет собой дробь, числитель и знаменатель которой есть целые числа. В этом случае числитель и знаменатель раскладываются на множители и полученные множители заменяются кратными им числами зубьев. Пример для $i = 48 : 75$:

$$\frac{48}{75} = \frac{24 \cdot 2}{15 \cdot 5}.$$

Введем дополнительные множители:

$$\frac{48}{75} = \frac{24 \cdot 2 \cdot 30}{15 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 10} = \frac{24 \cdot 46}{45 \cdot 40}.$$

Таким образом, получаем следующие числа зубьев гитары сменных колес: $a = 24$; $b = 60$; $c = 45$; $d = 50$.

Таблица 11

**Исходные данные для расчета чисел зубьев сменных колес методом подбора, непрерывных дробей и методом Кнаппе**

| Вариант | $i_1$ | $i_2$ | $i_3$ |
|---|---|---|---|
| 1 | 45 : 36 | 47 : 37 | 211 : 435 |
| 2 | 36 : 45 | 37 : 47 | 125 :633 |
| 3 | 24 : 48 | 23 : 51 | 127 : 525 |
| 4 | 25 : 54 | 29 : 53 | 231 : 459 |
| 5 | 20 : 44 | 19 : 47 | 321 : 787 |
| 6 | 18 : 28 | 19 : 29 | 121 : 239 |
| 7 | 56 : 80 | 57 : 83 | 239 : 891 |
| 8 | 58 : 60 | 51 : 61 | 159 : 677 |
| 9 | 60 : 58 | 61 : 59 | 143 : 581 |
| 10 | 68 : 100 | 67 : 101 | 137 : 435 |
| 11 | 75 : 55 | 73 : 59 | 155 : 837 |
| 12 | 54 : 62 | 51 : 67 | 211 : 493 |
| 13 | 24 : 52 | 23 : 57 | 115 :633 |
| 14 | 24 : 44 | 17 : 37 | 127 : 523 |
| 15 | 25 : 54 | 11 : 17 | 241 : 459 |
| 16 | 20 : 48 | 11 : 19 | 321 : 789 |
| 17 | 18 : 28 | 19 : 87 | 121 : 233 |
| 18 | 56 : 82 | 37 : 79 | 239 : 891 |
| 19 | 58 : 64 | 59 : 111 | 159 : 677 |
| 20 | 38 : 48 | 37 : 93 | 143 : 571 |
| 21 | 22 : 46 | 13 : 29 | 137 : 435 |
| 22 | 46 : 80 | 59 : 87 | 157 : 837 |
| 23 | 42 : 50 | 17 : 51 | 163 : 459 |
| 24 | 16 : 28 | 19 : 107 | 187 : 671 |

### *2) Метод непрерывных дробей.*

Применяется в том случае, если непосредственный подбор невозможен. Метод непрерывных дробей заключается в последова-

тельном разложении заданного простой дробью передаточного отношения и последовательного отбрасывания второго слагаемого знаменателя.

***Пример*** для $i = 37 : 47$.

$$\frac{37}{47} = \frac{1}{1+\frac{10}{37}} = \frac{1}{1+\frac{1}{3+\frac{7}{10}}} = \frac{1}{1+\frac{1}{3+\frac{1}{1+\frac{3}{7}}}} = \frac{1}{1+\frac{1}{3+\frac{1}{1+\frac{1}{2+\frac{1}{3}}}}}.$$

Отбрасывая последовательно второе слагаемое, в знаменателе можно получить ряд дробей, близких к передаточному отношению. Чем меньше отброшено слагаемых, тем меньше погрешность передаточного отношения. Отбросив $\frac{1}{3}$, получим дробь $\frac{11}{14}$, отбросив $\frac{1}{2+\frac{1}{3}}$, получим дробь $\frac{4}{5}$ и т. д.

Полученная дробь позволяет подобрать сменные колеса из набора способом непосредственного подбора.

3) ***Метод Кнаппе***.

Дробь, выражающая передаточное отношение, превращается в произведение двух дробей, из которых первая – близкая к заданной, с небольшими числами в числителе и знаменателе, а вторая – близкая к единице. Тогда вторую дробь можно изменять, прибавляя или вычитая из числителя и знаменателя одинаковые числа до тех пор, пока числитель и знаменатель не будут разлагаться на первоначальные множители. Пример для передаточного отношения 211 : 635:

$$\frac{211}{635} = \frac{1 \cdot 633}{3 \cdot 635} = \frac{1 \cdot 630}{3 \cdot 632} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7}{3 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 79} = \frac{3 \cdot 35}{4 \cdot 79}.$$

Метод непрерывных дробей и метод Кнаппе являются приближенными методами подбора чисел зубьев сменных колес. Погрешность подбора можно оценить по фактическому $I_{\text{Факт}}$и расчетному $I_{\text{расч}}$ передаточным отношениям по формуле

$$\delta = |(I_{\text{Факт}} - I_{\text{расч}}) / I_{\text{Факт}}| \cdot 100\% \le [\delta] = 0{,}1\ \%\ ,$$

где $[\delta]$ – допускаемая погрешность передаточного отношения.

Подобранные числа зубьев сменных зубчатых колес должны удовлетворять условию зацепляемости:

$$a + b \ge c + (15 \ldots 20);\ \ c + d \ge b + (15 \ldots 20).$$

Если условие зацепляемости не выполняется, производится повторный расчет чисел зубьев сменных колес.

# ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №7
# РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ РЕЗЬБОФРЕЗЕРНОГО СТАНКА НА ФРЕЗЕРОВАНИЕ РЕЗЬБЫ ДИСКОВОЙ ФРЕЗОЙ

***Теоретические сведения***. Резьбофрезерные станки предназначены для обработки наружной резьбы различных видов и параметров. Фрезерование резьбы ведется дисковыми и групповыми фрезами (рис. 17). Резьбофрезерная кинематическая цепь резьбофрезерных станков обеспечивает согласованное вращение заготовки и продольное перемещение дисковой фрезы.

*а* *б*

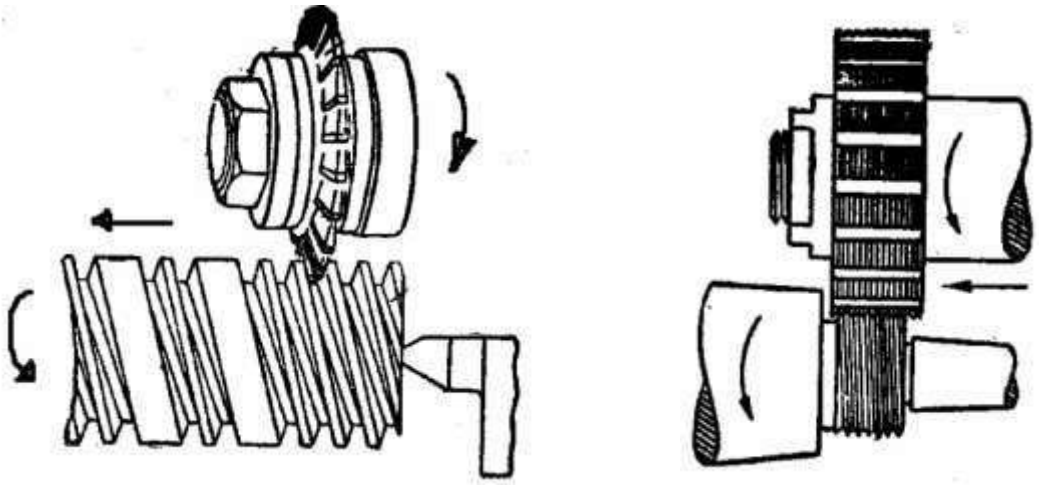


Рис. 17. Обработка резьбы на резьбофрезерных станках:
*а* – фрезерование дисковой фрезой; *б* – фрезерование групповой фрезой

При групповом фрезеровании резьбофрезерная цепь обеспечивает согласованное вращение фрезы и вращение заготовки.

По кинематической схеме резьбофрезерного станка нужно составить уравнения кинематического баланса и формулы его настройки на нарезание:

- резьбы метрической со стандартным шагом;
- резьбы метрической с нестандартным шагом.

Кинематическая схема резьбофрезерного станка приведена на рис. 18.

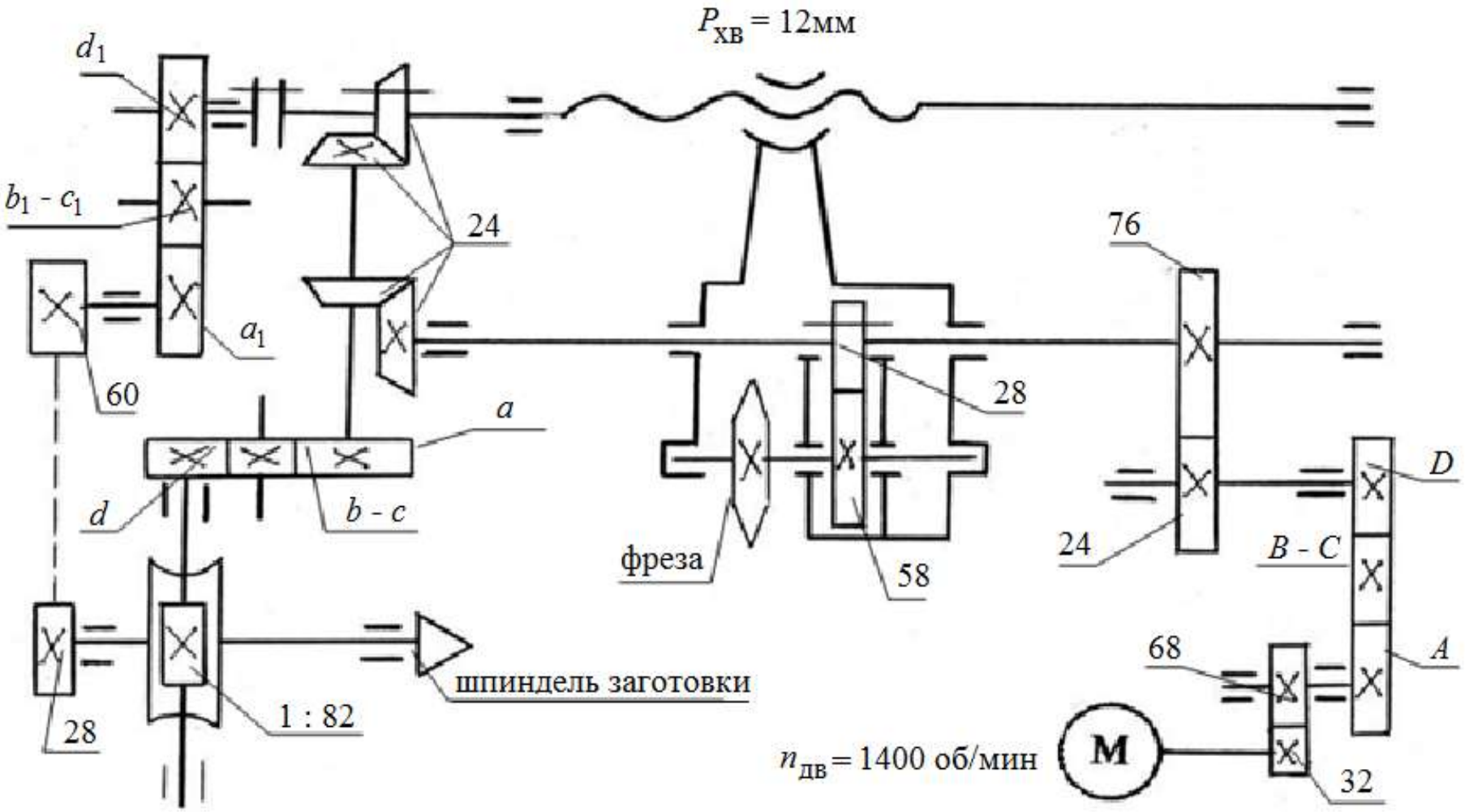



Рис. 18. Кинематическая схема резьбофрезерного станка:
*A, B, C, D* – сменные колеса гитары главного движения; *a, b, c, d* – сменные колеса гитары круговой подачи заготовки;
$a_1$, $b_1$, $c_1$, $d_1$ – сменные колеса гитары продольной подачи суппорта.

## Основные кинематические цепи резьбофрезерного станка

1. Кинематическая цепь главного движения, которая служит для передачи движения от электродвигателя через коробку скоростей на фрезу:

$$n_{дв} \cdot \ldots = n_{фр},$$

где $n_{фр}$ – число оборотов фрезы, об/мин.

2.Кинематическая цепь круговой подачи заготовки $S_{кр.}$, которая служит для передачи движения от фрезы к заготовке через механизм конического реверса, коробку подач или гитару сменных колес. Последняя используется при настройке станка на нарезание резьбы со стандартным шагом:

$$1 \text{ об/фр} \cdot \ldots = S_{кр.},$$

где $S_{кр}$– круговая подача заготовки, мм/об.

3.Кинематическая цепь продольной подачи фрезерного суппорта $S_{пр}$ при нарезании резьбы с нестандартным шагом, которая служит для передачи движения от заготовки через двупарную гитару сменных зубчатых колес $a_1$: $d_1$ на ходовой винт подачи фрезерного суппорта:

$$1 \text{ об/заг} \cdot \ldots \cdot P_{хв} = S_{пр} = t_{нр},$$

где $P_{хв}$ – шаг ходового винта продольной подачи фрезерного суппорта, мм; $t_{нр}$ – шаг нарезаемой резьбы, мм; $S_{пр}$– продольная подача фрезерного суппорта, мм.

***Задание.*** Рассчитать параметры настройки резьбофрезерного станка на фрезерование резьбы со стандартным шагом (передаточное число гитары главного движения $A$ :$D$, гитары подач $a$ : $d$ и нестандартным шагом (передаточное число гитары резьбонарезной цепи $a_1$: $d_1$).

***Исходные данные:***

$S_{кр}$ – величина круговой подачи заготовки, мм/об; $t_{нр.ст}$ – стандартный шаг резьбы, мм; $t_{нр.нст}$– нестандартный шаг резьбы, мм; $n_{фр}$ – число оборотов фрезы, об/мин. Исходные данные приведены в табл. 12.

Таблица 12

**Исходные данные для расчета параметров настройки резьбофрезерного станка**

| Вариант | $t_{нр.ст.}$, мм | $t_{нр.нст.}$, мм | $S_{кр}$, об/мин | $n_{фр}$, об/мин |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1,5 | 3,4 | 0,5 | 55 |
| 2 | 2 | 2,6 | 0,6 | 80 |
| 3 | 2,5 | 3,6 | 0,8 | 115 |
| 4 | 3 | 2,8 | 0,9 | 165 |
| 5 | 3,5 | 4,7 | 1 | 240 |
| 6 | 4 | 4,8 | 1,2 | 55 |
| 7 | 4,5 | 3,9 | 1,4 | 80 |
| 8 | 5 | 5,1 | 1,5 | 115 |
| 9 | 6 | 5,3 | 1,6 | 165 |
| 10 | 8 | 5,6 | 1,7 | 240 |
| 11 | 10 | 6,3 | 1,8 | 55 |
| 12 | 1,5 | 6,7 | 1,9 | 80 |
| 13 | 2 | 6,8 | 2,0 | 115 |
| 14 | 2,5 | 8,1 | 1,2 | 165 |
| 15 | 3 | 8,2 | 1,4 | 240 |
| 16 | 3,5 | 8,4 | 1,5 | 55 |
| 17 | 4 | 8,6 | 1,6 | 80 |
| 18 | 4,5 | 4,8 | 1,7 | 115 |
| 19 | 5 | 5,9 | 1,8 | 165 |
| 20 | 6 | 6,9 | 1,9 | 240 |
| 21 | 8 | 7,2 | 2,0 | 80 |
| 22 | 10 | 8,3 | 1,8 | 115 |
| 23 | 8 | 2,7 | 2,1 | 55 |
| 24 | 6 | 4,3 | 1,7 | 165 |

# ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №8
# РАСЧЕТ КУЛИСНОГО МЕХАНИЗМА

***Задание.*** Определить частоту вращения кривошипа однокулисного привода поперечно-строгального станка.

***Исходные данные:***

$V_р$ − горизонтальная скорость ползуна, м/мин; $О_1П_1$ − радиус кривошипа, мм; *a, b* − размеры кулисного привода, мм.

Исходные данные приведены в табл. 13.

***Теоретические сведения.*** В поперечно-строгальных станках применяется вариант кулисного механизма, представленный на рис. 19.

Механизм качающейся кулисы ОВ (рис. 19.) имеет кривошипный диск (кулисное колесо $Z = 107$), снабжённый пальцем П, который можно перемещать в радиальном направлении по торцу колеса для изменения длины хода ползуна *l*. То есть изменение длины кривошипа $О_1П_1$ приводит к пропорциональному изменению величины *l*. На пальце П свободно сидит кулисный камень $К_К$. При вращении кривошипного диска камень $К_К$ перемещается вдоль прорези кулисы ОВ, которая качается на неподвижной оси О. Верхним концом кулиса шарнирно соединена с ползуном. Совершая качательное движение, кулиса ОВ сообщает ползуну возвратно-поступательное движение. Это движение передаётся ползуну через гайку на винте; вращением винта можно изменять зону строгания.

Механизм качающейся кулисы сообщает ползуну движение вперёд (рабочий ход $V_Р$) и более быстрое движение в обратном направлении (холостой ход $V_х$). Палец П, равномерно вращаясь, описывает при рабочем ходе ползуна дугу, соответствующую углу α, а при холостом ходе ползуна – дугу, соответствующую углу β, причём всегда α> β.

Как видно из диаграммы скоростей (рис. 20), ползун непрерывно изменяет свою скорость движения от нуля до максимума и вновь до нуля. Так как угол α больше угла β, а путь, пройденный ползуном вперёд и назад одинаков, то при равномерной скорости вращения кривошипа *V* значения мгновенных скоростей рабочего и холостого хода существенно различаются.

Следует отметить, что неравномерность рабочего хода ползуна приводит к снижению производительности обработки, переменности-

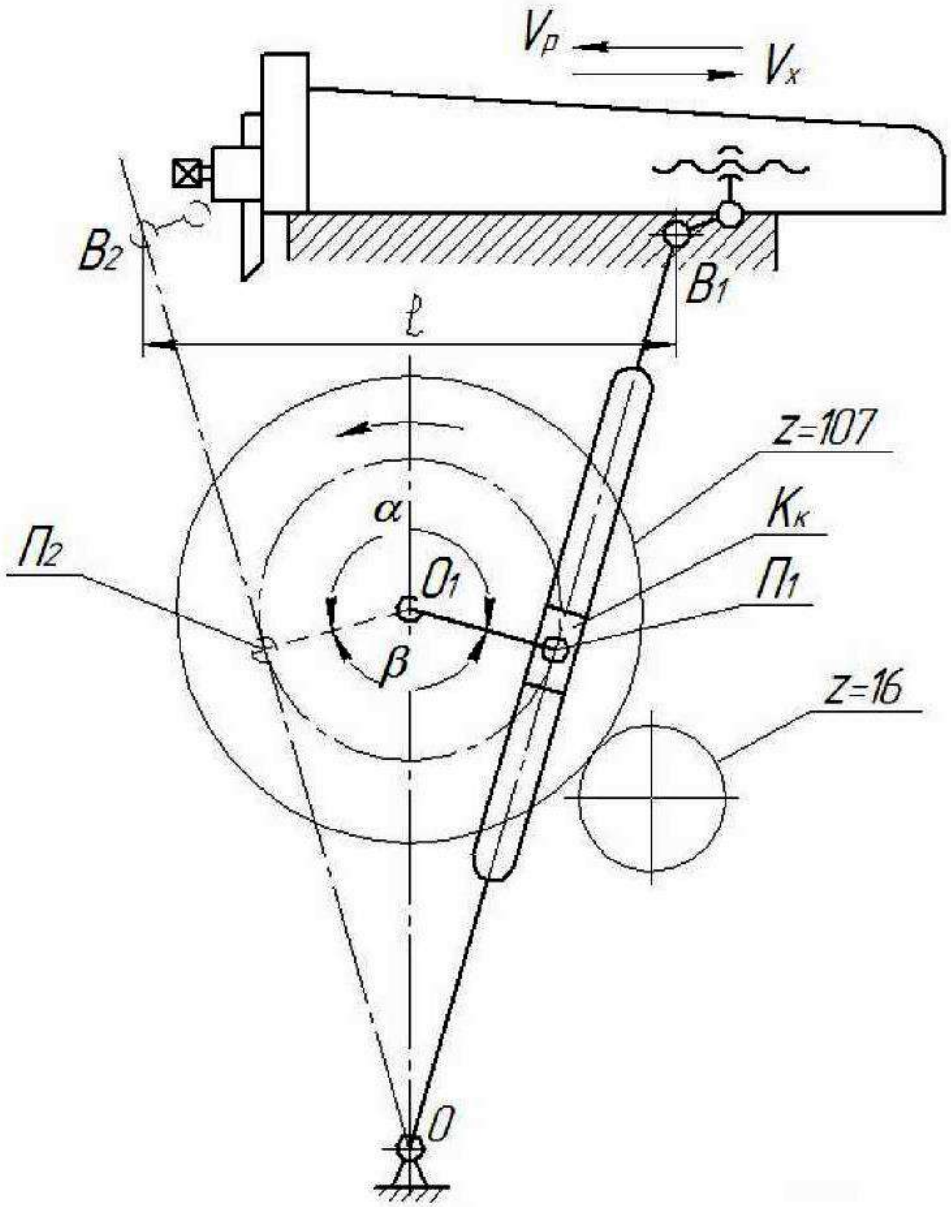



Рис. 19. Схема кривошипно-кулисного привода ползуна

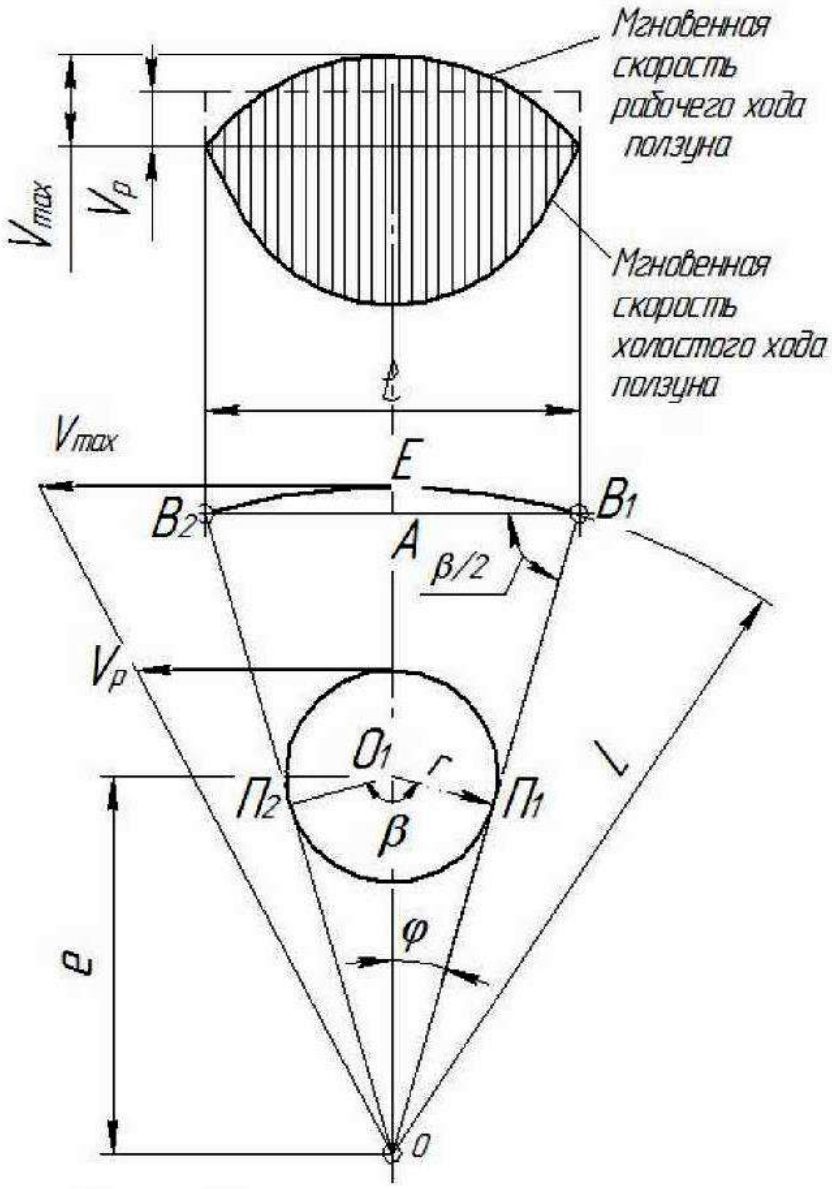



Рис. 20 . Диаграмма скорости ползуна

сил резания, упругим отжатиями, как следствие, снижению точности обрабатываемой заготовки.

Принцип действия кулисного механизма известен из курса теории машин и механизмов.

Для определения частоты вращения кривошипа привода можно применить следующую методику:

1. Определить скорость шарнира $B(V_B)$ используя терему о проекциях скоростей 2-х точек твердого тела

$$V_B \cdot \cos\alpha = V_\text{р} \Rightarrow \quad V_B = \frac{V_\text{р}}{\cos\alpha},$$

где α найти из $\triangle O_1П_1O$, используя теорему косинусов и синусов.

2. Определить угловую скорость($\omega_2$) кулисы ОВ

$$\omega_2 = \frac{V_\text{П}}{\text{ОВ}}.$$

3. Определить линейную скорость кулисного камня К($V_\text{К}$).

$$V_\text{К} = \omega_2 \cdot \text{ОП}_1,$$

где $\text{ОП}_1$ –расстояние от кулисного камня до оси вращения камня, определяемое исходя из положения механизма согласно исходным данным.

4. Определить угловую скорость кривошипа ($\omega_1$).

$$\omega_1 = \frac{V_{\text{П}1}}{\text{O}_1\text{П}_1}.$$

5. Для ответа на вопрос задачи представить угловую скорость кривошипа $O_1П_1$из рад/с в об/мин.

Для этого воспользоваться следующей формулой

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30},$$

где $n$ – частота вращения кривошипа ОП.

**Пример.** Для кулисного механизма поперечно-строгального станка (рис. 21) длиной кривошипа$O_1П(R)$ = 0,1 м, $a$= 0,2 м и ОП= 0,4 м определить частоту вращения кривошипа $\omega_1$ для заданного положения механизма, если β = 120°, скорость резца (ползуна) 50 м/мин.

1. Изобразим механизм в заданном положении (Рис. 21) согласно исходных данных (табл. 13) (в масштабе).

2. Определим величину $\text{ОП}_1$ используя теорему косинусов.

$$\text{ОП}_1 = \sqrt{R^2 + a^2 - 2aR\cos 60°} \quad \text{ОП}_1 = 0{,}113 \text{ м}.$$

3. По теореме синусов определим неизвестный угол α

$$\frac{R}{\sin\alpha} = \frac{\text{ОП}_1}{\sin\beta}$$

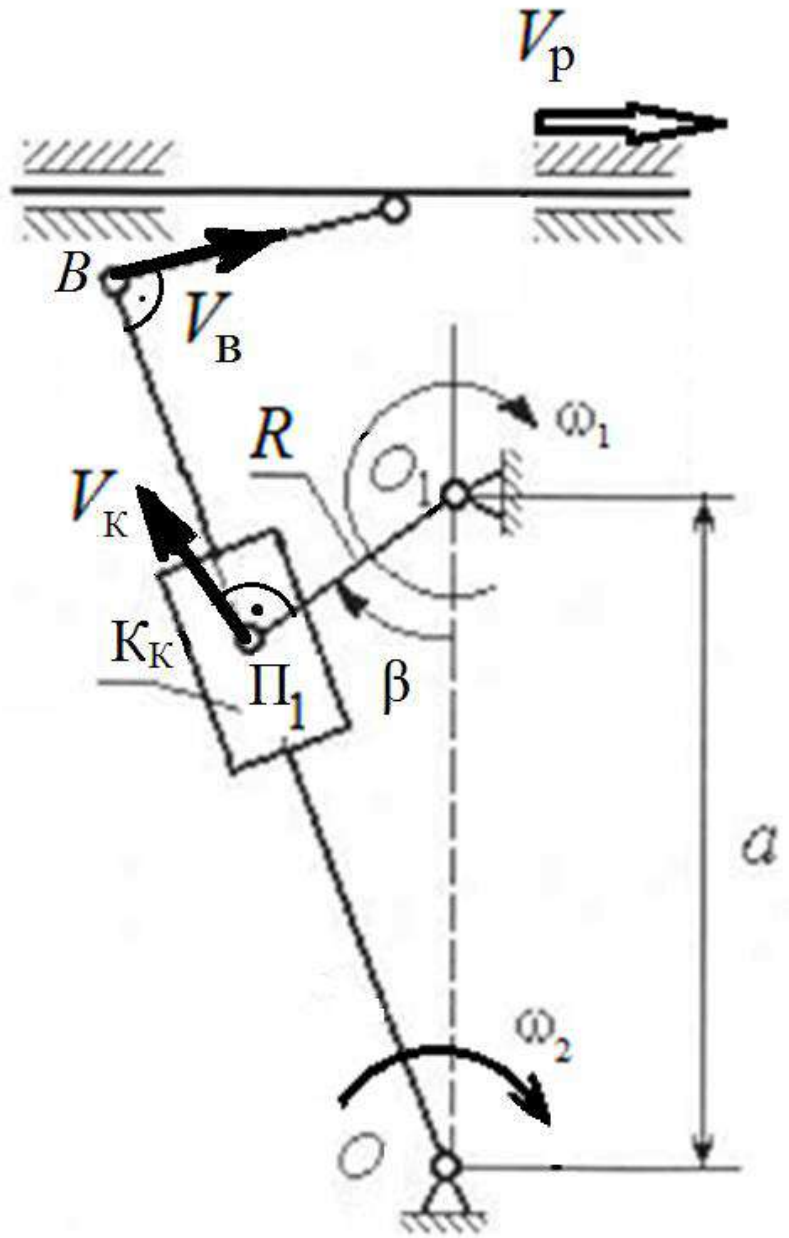



Рис. 21.Кулисныймеханизм поперечно-строгального станка

$$\sin\alpha = \frac{\sin\beta \cdot R}{OA_1} = \frac{\sin 60° \cdot 0{,}1}{0{,}113} = 0{,}501 \Rightarrow \alpha = \arcsin 0{,}501 = 30°.$$

4. Определим скорость шарнира *B* в м/с

$$V_B = \frac{V_р}{\cos\alpha} = \frac{0{,}83}{\cos 19{,}14°} = 0{,}96 \text{ м/с}.$$

5. Далее определим угловую скорость кулисы ОВ.

$$\omega_2 = \frac{V_р}{OB} = \frac{0{,}88}{0{,}4} = 2{,}4 \text{ м/с}.$$

6. Определим линейную скорость кулисного камня $К_К$

$$V_К = \omega_2 \cdot ОП_1 = 2{,}2 \cdot 0{,}264 = 0{,}42 \text{ м/с},$$

7. Определить угловую скорость кривошипа ($\omega_1$) 1.

$$\omega_1 = \frac{V_К}{R} = \frac{0{,}42}{0{,}1} = 4{,}2 \text{ рад/с}.$$

8. Определим частоту вращения кривошипа $n$. Переводим рад/с в об/мин

$$\omega_1 = \frac{\pi n}{30} \Rightarrow n = \frac{30\omega_1}{\pi} = 40{,}1 \text{об/мин}$$

Ответ: частота вращения кривошипа $n$ = 40,1 об/мин.

Таблица13

**Размеры кулисного привода и скорость движения ползуна**

| Вариант | $V_р$, м/мин | $O_1П(R)$, мм | $a$, мм | ОВ, мм | β, град |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 50 | 150 | 200 | 400 | 120 |
| 2 | 50 | 100 | 150 | 200 | 150 |
| 3 | 50 | 90 | 150 | 200 | 135 |
| 4 | 10 | 80 | 150 | 200 | 140 |
| 5 | 10 | 60 | 120 | 180 | 90 |
| 6 | 10 | 200 | 150 | 300 | 120 |
| 7 | 20 | 180 | 180 | 300 | 150 |
| 8 | 20 | 160 | 100 | 240 | 135 |
| 9 | 20 | 300 | 150 | 200 | 140 |
| 10 | 20 | 200 | 120 | 240 | 90 |
| 11 | 40 | 100 | 100 | 300 | 120 |
| 12 | 40 | 90 | 150 | 200 | 150 |
| 13 | 40 | 60 | 150 | 200 | 135 |
| 14 | 50 | 100 | 180 | 360 | 140 |
| 15 | 50 | 90 | 150 | 300 | 90 |
| 16 | 50 | 80 | 150 | 200 | 120 |
| 17 | 10 | 150 | 180 | 260 | 150 |
| 18 | 10 | 150 | 150 | 200 | 135 |
| 19 | 10 | 200 | 120 | 200 | 140 |
| 20 | 20 | 190 | 100 | 200 | 90 |

## ЗАДАЧИ И УПРАЖНЕНИЯ

**Задача 1.** На рис. 22 дана схема простейшей передачи вращения от электродвигателя к шпинделю токарного станка. На схеме указаны диаметры всех шкивов и число оборотов в минуту электродвигателя.

Подсчитать число оборотов шпинделя при всех четырех положениях ремня на ступенчатом шкиве.

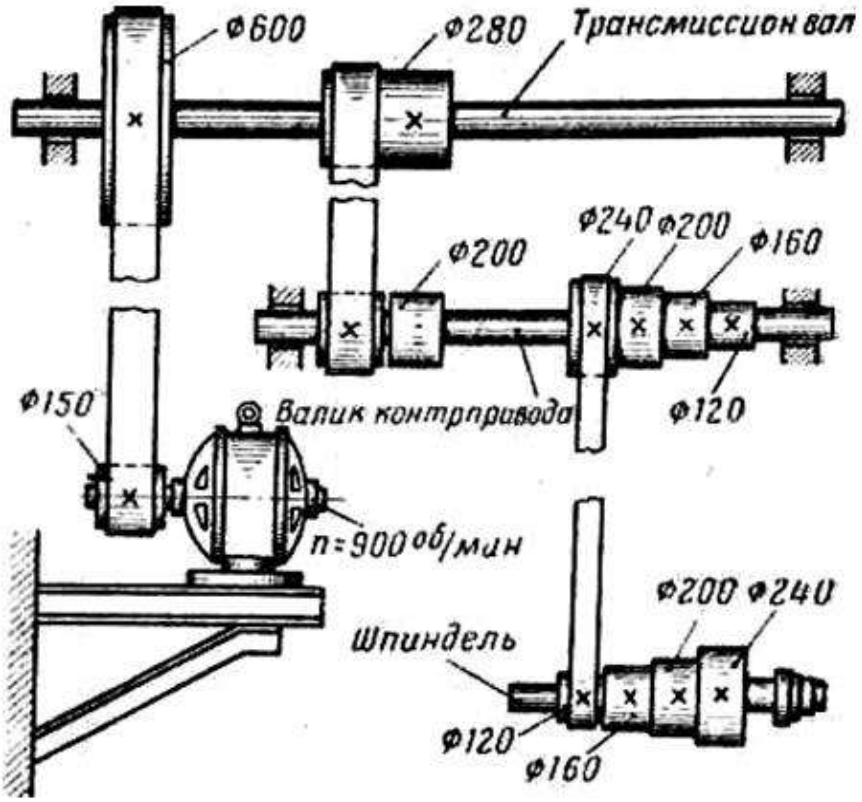



Рис. 22. Схема передачи вращения от электродвигателя к шпинделю токарного станка

**Задача 2**. На рис. 23 дана схема двойного перебора. При включении первого перебора передача идет через зубчатые колеса$z_4 - z_1 - z_3 - z_6$, а при включении второго перебора – через зубчатые колеса $z_5 - z_2 - z_3 - z_6$. Без перебора шпиндель имеет $n_1$ = 315 об/мин, $n_2$ = 210 об/мин,$n_3$ = 140 об/мин.

Определить:

1) числа оборотов шпинделя $n_4$, $n_5$, $n_6$ при включенном первом переборе;
2) числа оборотов шпинделя $n_7$, $n_8$, $n_9$ при включенном втором переборе.

Числа зубьев колес $z_1$, $z_2$, $z_3$, $z_4$, $z_5$ и $z_6$ указаны на рис. 23.

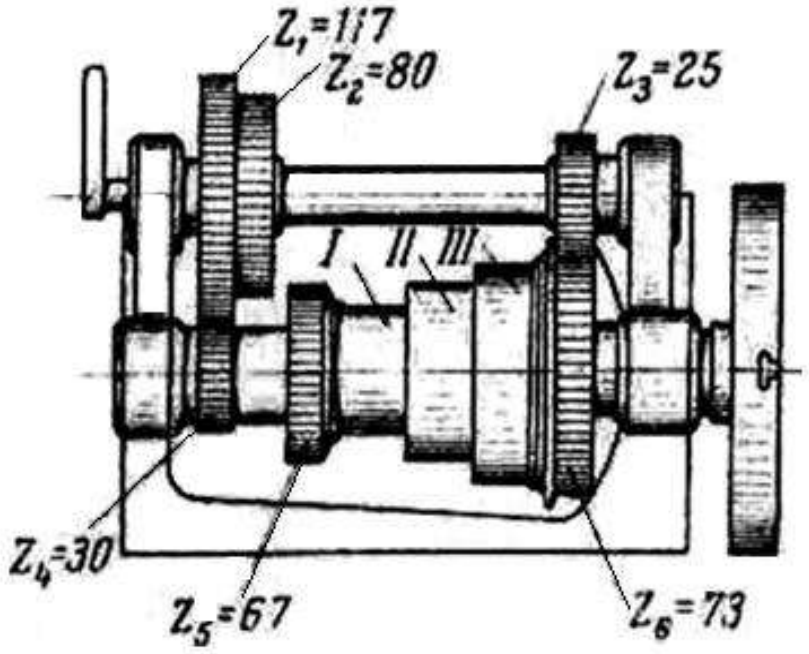



Рис. 23. Схема двойного перебора токарного станка

**Задача 3**. На рис. 24 дана схема тройного перебора, устройство которого позволяет сообщить шпинделю станка 15 различных скоростей:

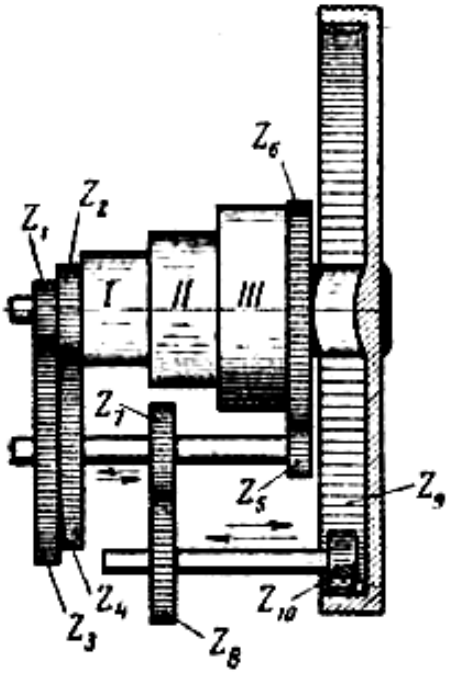



Рис. 24. Схема тройного перебора токарного станка

1) три скорости с выключенным перебором от ступенчатого шкива;
2) три скорости при включенных колесах $z_1 - z_3 - z_5 - z_6$;
3) три скорости при включенных колесах $z_2 - z_4 - z_5 - z_6$;
4) три скорости при включенных колесах $z_1 - z_3 - z_7 - z_8 - z_{10} - z_9$;
5) три скорости при включенных колесах $z_2 - z_4 - z_7 - z_8 - z_{10} - z_9$.

Подсчитать все получающиеся числа оборотов шпинделя, если дано:
1) $z_1 = 40$; $z_2 = 50$; $z_3 = 90$; $z_4 = 80$; $z_5 = 30$; $z_6 = 100$; $z_7 = 25$; $z_8 = 30$; $z_9 = 20$; $z_{10} = 100$;
2) число оборотов шпинделя при выключенном переборе:
$n_1 = 600$ об/мин, $n_2 = 320$ об/мин, $n_3 = 170$ об/мин.

**Задача 4**. На рис. 25 показан механизм с переключением скоростей при помощи кулачковой муфты *a*, перемещающейся по валику *I*, с которым она связана шпонкой. Колеса $z_1$ и $z_2$ вращаются на валике *I* свободно и получают вращение при сцеплении муфты *a* с муфтой *B* или же с муфтой *C*. Таким образом при перемещении муфты *a* влево вращение валика *I* передается валику *II* через колеса $z_1$ и $z_3$, а при перемещении муфты *a* вправо – через колеса $z_2$ и $z_4$.

Подобрать числа зубьев колес $z_1$, $z_2$, $z_3$ и $z_4$ так, чтобы при перемещении муфты *a* влево валик *II* вращался в три раза быстрее валика *I*, а при перемещении ее вправо – в два раза медленнее валика *I*.

Необходимо помнить, что сумма зубьев $z_1 + z_3$ должна равняться сумме зубьев $z_2 + z_4$.

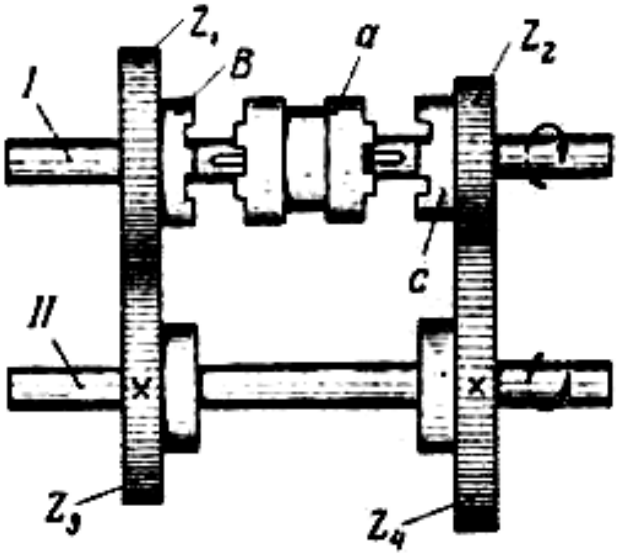



Рис. 25. Механизм переключения скоростей с помощью кулачковой муфты

**Задача 5**. На рис. 26 дана схема механизма для изменения (переключения) скоростей при помощи передвижной (скользящей) шпонки. На ведущем валике*I* заклинены колеса $z_1$, $z_2$, $z_3$ и $z_4$, сцепленные соответственно с колесами $z_5$, $z_6$, $z_7$ и $z_8$, которые сидят свободно на ведомом валике *II*. Каждое из последних четырех колес может быть соединено

с валиком *II* при помощи скользящей шпонки, перемещаемой рукояткой или маховиком.

Дано: $n_1 = 100$ об/мин, $z_1 = 51$, $z_2 = 43$, $z_3 = 32$, $z_4 = 22$, $z_5 = 25$, $z_6 = 33$, $z_7 = 44$, $z_8 = 54$.

Подсчитать числа оборотов ведомого валика *II* при всех четырех включениях скользящей шпонки.

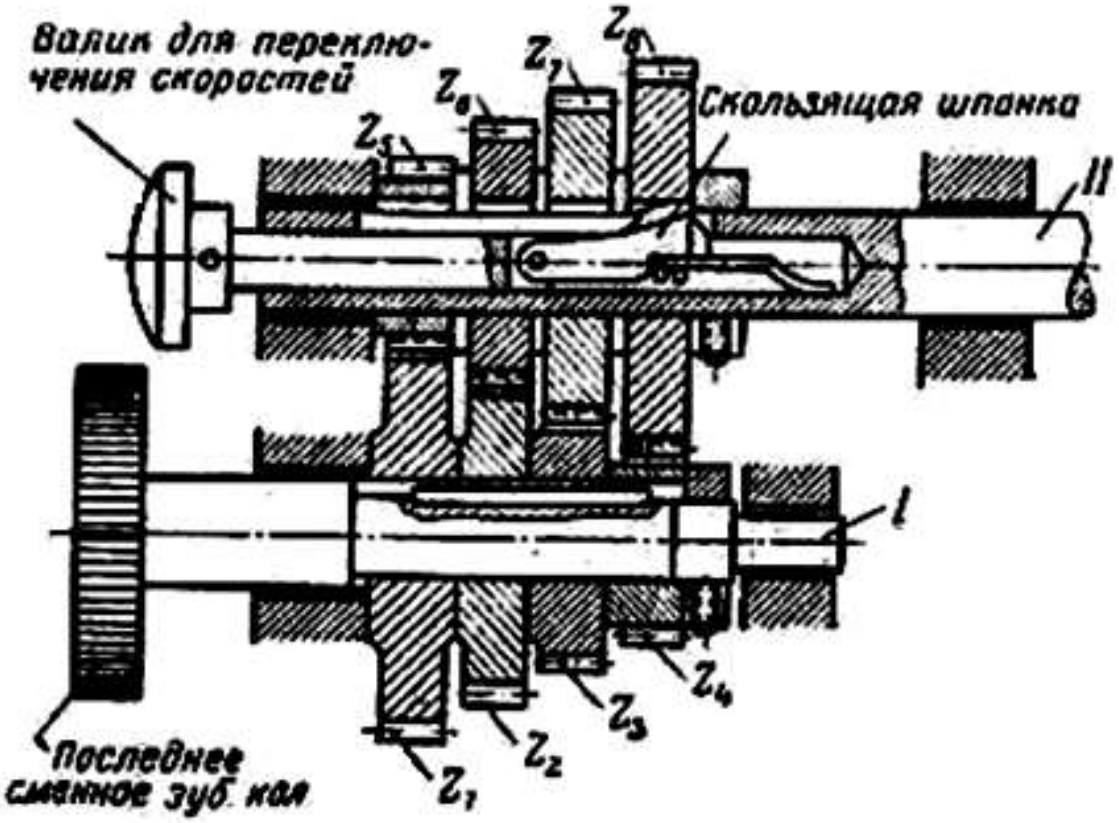



Рис. 26. Механизм переключения скоростей с помощью передвижной шпонки

**Задача 6**. На рис. 27, *а* дана схема сочетания двух механизмов – механизма с фрикционной муфтой и механизма с кулачковой муфтой. На рис. 27, *б* показан наружный вид этого механизма. Левая рукоятка служит для переключения фрикционной муфты *A*, а правая – для переключения кулачковой муфты *B*. При повороте рукояток влево обе муфты также перемещаются влево.

Числа зубьев колес, указанных на схеме, следующие (табл. 14):

Требуется:

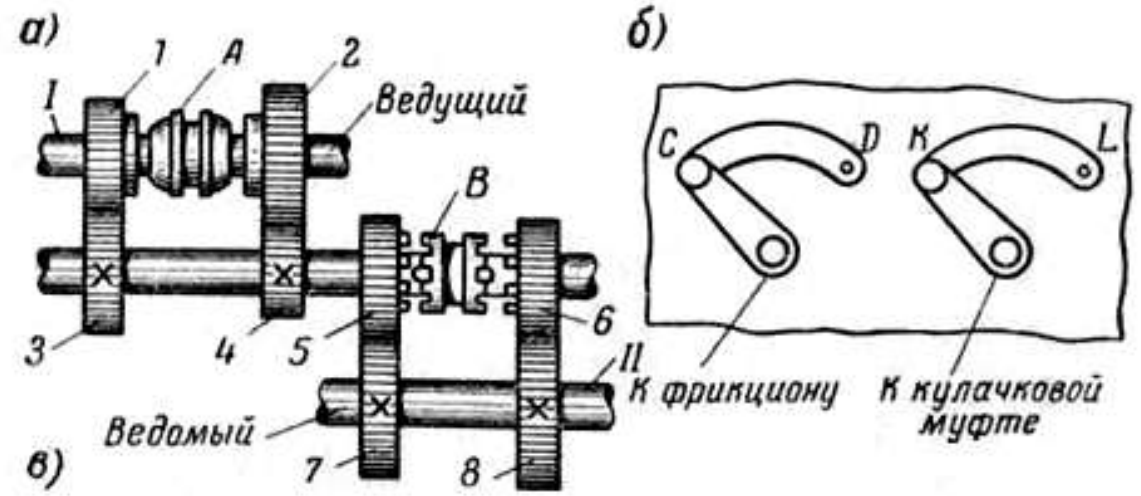
1) определить, через какие колеса идет передача при всех четырех включениях;

2) подсчитать передаточные числа, получающиеся при всех включениях;
3) определить числа оборотов ведомого валика *II* при числе оборотов валика *I* $n_1 = 200$ об/мин.

Ответы написать в форме трафаретки (рис. 27, *в*).

Таблица 14

| № колеса | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Число зубьев колеса | 24 | 32 | 24 | 16 | 20 | 25 | 40 | 35 |

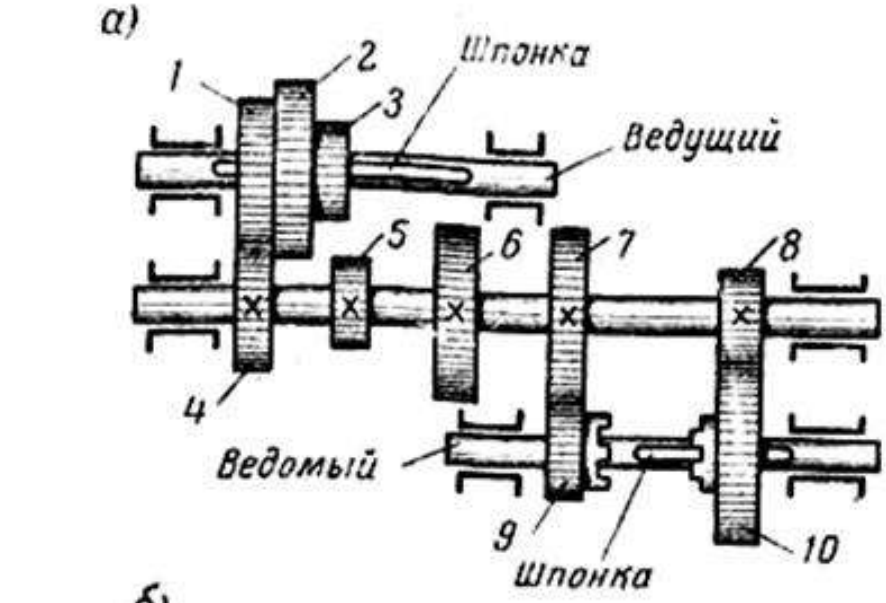


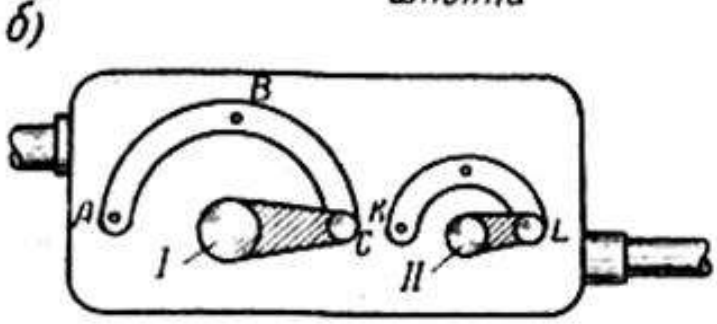

| № | Положение рукояток I вариант | | Передача идет через зуб. кол. | Передат. числа i | Положение рукояток II вариант | | $n_{II}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | 1-3-5-7 | $\frac{1}{2}$ | С | К | 50 об/мин |
| 2 | | | найти | найти | С | L | найти |
| 3 | | | | | D | L | |
| 4 | | | | | D | К | |

Рис. 27. Схема сочетания действия механизмов фрикционной и кулачковой муфты

*Примечание.* На левой стороне трафаретки положения рукояток показаны графически, а на правой – положения рукояток указаны при помощи буквенных обозначений.

**Задача 7**. На рис. 28, *а* дана схема коробки подач, а на рис. 66, *б* – ее наружный вид. Рукоятка *I* перемещает по ведущему валику колеса *1, 2, 3*, соединенные вместе. Рукоятка *II* перемещает по ведомому валику колесо 10 и составляющую с ней одно целое половину кулачковой муфты. Направление вращения рукояток и связанные с ними перемещения колес по валикам совпадают.




в)

| Номера скоростей | Положение рукояток | | Передача идет через зуб. кол. | Положение рукояток | |
|---|---|---|---|---|---|
| | I | II | | I | II |
| 1 | | | 3-6-8-10 | C | L |

Ответ на 1-й вопрос — Ответ на 3-й вопрос — Ответ на 2-й вопрос — Ответ на 4-й вопрос

Рис. 28. Схема коробки подач токарного станка

Требуется:

1) найти число возможных скоростей ведомого валика;

2) определить, через какие колеса идет передача при всех возможных включениях;
3) составить трафаретку с обозначением графически положений рукояток;
4) составить трафаретку с обозначением положений рукояток буквами по образцу, показанному на рис. 28, *в*.

**Задача 8**. На рис. 29, *а* дана схема коробки скоростей, а на рис. 29, *б* – наружный вид.

Рукоятка *I* перемещает колесо и по ведущему валику по шпонке. Рукоятка *II* перемещает колеса *5, 6, 7* по промежуточному валику по шпонке. Рукоятка *III* перемещает муфту М, сидящую на шпинделе на шпонке. Направление вращения рукояток и направление перемещения колес по валикам совпадают.

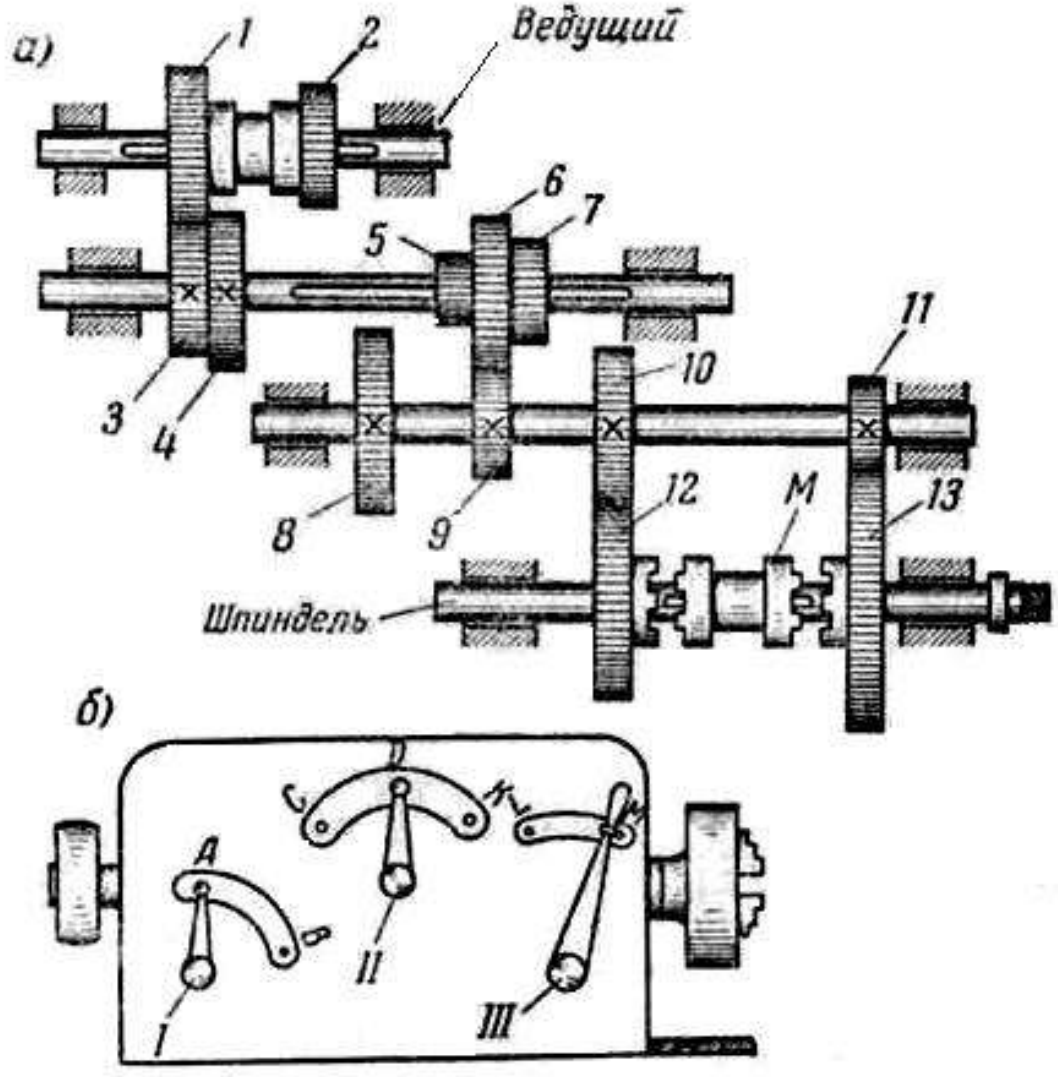



Рис. 29. Схема коробки скоростей токарного станка

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Колесо | 1 | входит | в зацепление | с | колесом 3 |
| | 2 | « | « | « | « 4 |
| | 5 | « | « | « | « 8 |
| | 6 | « | « | « | « 9 |
| | 7 | « | « | « | « 10 |
| Муфта *М* | « | | « | с | муфтой колеса 12 |
| « | « | | « | « | « 13 |

Требуется:

1) найти число возможных скоростей шпинделя;
2) составить трафаретку с указанием положений рукояток графически и с буквенными обозначениями;
3) определить, через какие колеса идет передача.

Трафаретку составить по образцу, показанному на рис. 27, *в.*

**Задача 9**. На рис. 30, *а* дана схема коробки подач, а на рис. 30, *б* – ее наружный вид.

Рукоятка *II* служит для соединения через накидное колесо *2* зубчатого колеса *1* с колесами конуса подач *3, 4, 5, 6, 7, 8, 9* и *10*. Колесо *10* находится в постоянном зацеплении с колесом *11*. Рукоятка перемещает блок колес *16, 17, 18* и муфту *М* по ходовому валику по шпонке. Муфта *М* входит в зацепление с муфтой, соединенной с колесом *15*.Колесо *16* входит в зацепление с колесом *13*, колесо *17*– с колесом *12*, а колесо *18* – с колесом *11*.

Найти, через какие колеса идет передача при всех *32* возможных включениях коробки подач.

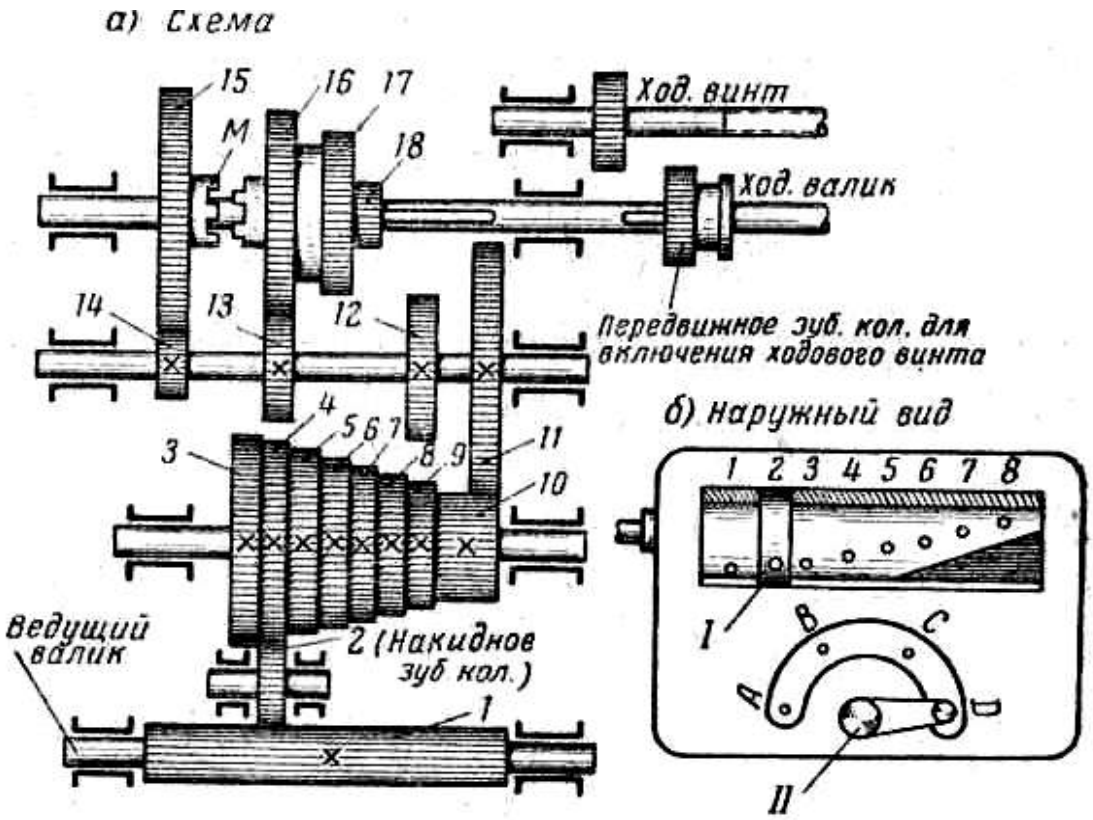
Ответ представить в виде трафаретки, показанной на рис. 27, *в*, заполнив графу: «Передача идет через колеса».

**Задача 10.** На рис. 31, *а* дана схема коробки скоростей токарного станка, а на рис. 31, *б* – наружный вид этой коробки.

Разобрав схему коробки, найти:

1) число возможных скоростей шпинделя;
2) составить трафаретку, показав графически положение рукояток.

При составлении трафаретки учесть, что направления вращения рукояток и направления перемещений связанных с ними муфт и колес не совпадают.




в)

| № № | Положение рукояток I | Положение рукояток II | Передача идет через зубчатое колесо |
|---|---|---|---|
| 1 | 1 | A | 1-2-3-10-11-14-15-M ход. валик |
| 2 | 2 | | и т. д. |
| 3 | 3 | | |
| 4 | 4 | | |
| 5 | 5 | | |
| 6 | 6 | | |
| 7 | 7 | | |
| 8 | 8 | | |
| 9 | 1 | B | |
| 10 | 2 | | |
| 11 | 3 | | |
| 12 | 4 | | |
| 13 | 5 | | |
| 14 | 6 | | |
| 15 | 7 | | |
| 16 | 8 | | |

| № № | Положение рукояток I | Положение рукояток II | Передача идет через зубчатое колесо |
|---|---|---|---|
| 17 | 1 | C | |
| 18 | 2 | | |
| 19 | 3 | | |
| 20 | 4 | | |
| 21 | 5 | | |
| 22 | 6 | | |
| 23 | 7 | | |
| 24 | 8 | | |
| 25 | 1 | D | |
| 26 | 2 | | |
| 27 | 3 | | |
| 28 | 4 | | |
| 29 | 5 | | |
| 30 | 6 | | |
| 31 | 7 | | |
| 32 | 8 | | |

Рис. 30. Схема коробки подач и ее наружного вида

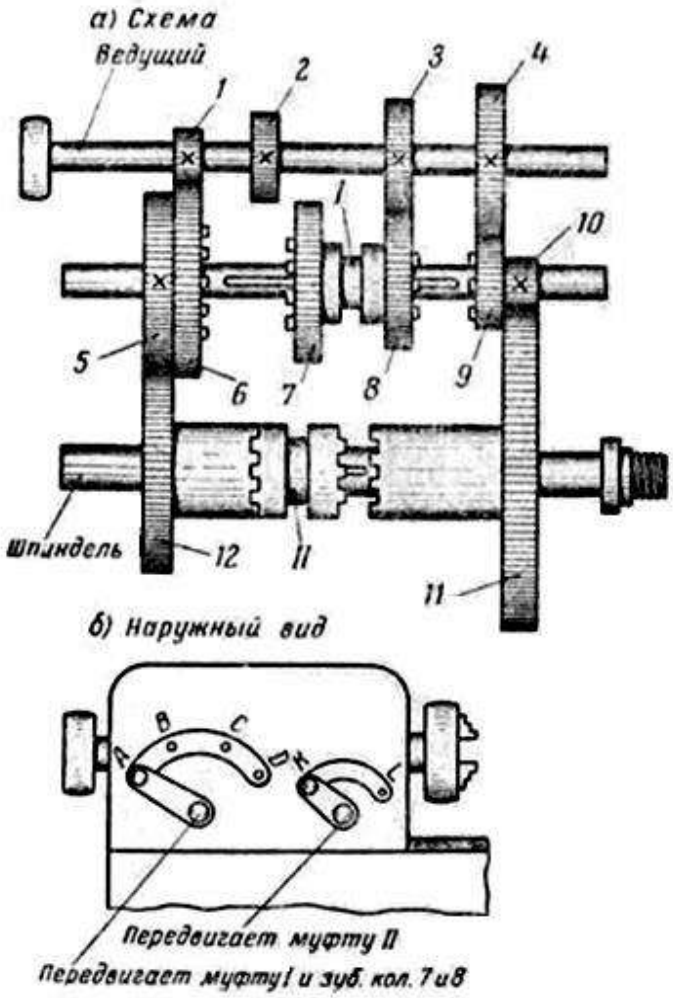



Рис. 31. Схема коробки скоростей и ее наружного вида

**Задача 11**. Разобрать схему коробки скоростей, показанную на рис. 32, *а*. На рис. 32, *б* дан наружный вид этой коробки

Найти:

1) число возможных скоростей вращения шпинделя;

2) составить трафаретку, показав графически положения рукояток коробки и указав, через какие колеса идет передача при каждом отдельном включении.

Направление перемещения муфт и направление колес совпадает с направлением вращений перемещающих их рукояток.

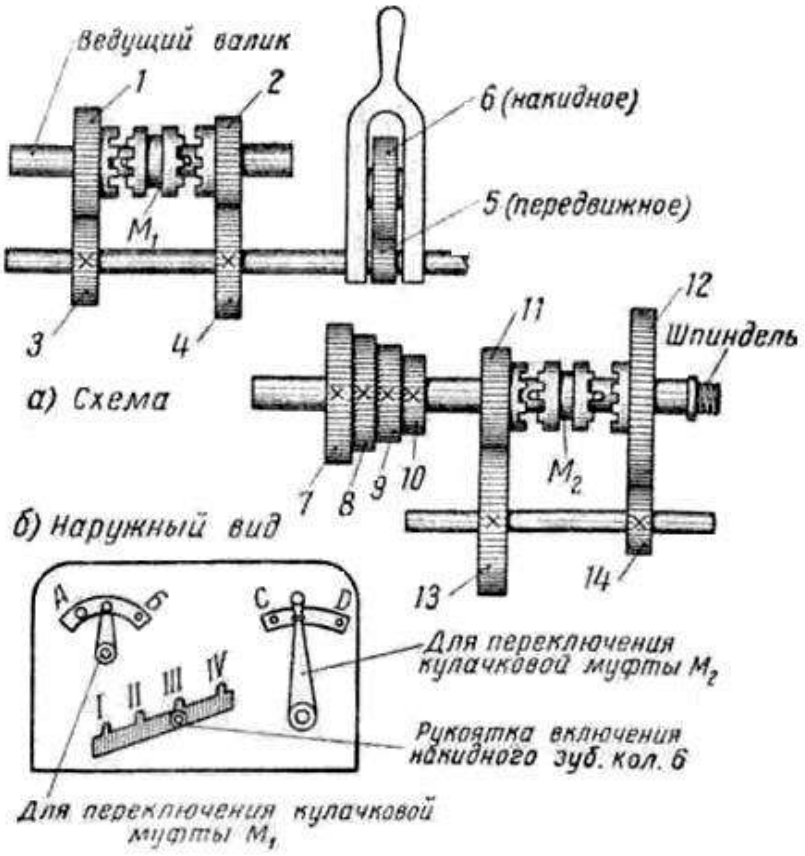



Рис. 32. Схема коробки скоростей с переключением с помощью кулачковой муфты

**Задача 12**. На рис. 33 дана развернутая кинематическая схема коробки скоростей токарного станка ДИП-200.

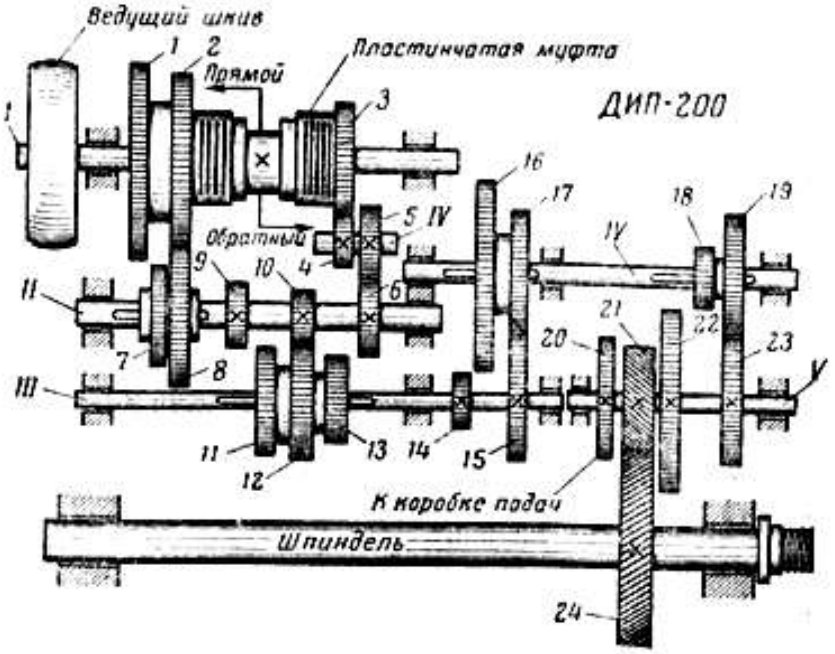



Рис. 33. Кинематическая схема коробки скоростей токарного станка ДИП-200

Числа зубьев колес, показанных на схеме, следующие (табл. 15):

Таблица 15

| № колеса | 9 | 10 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Число зубьев | 28 | 20 | 56 | 51 | 50 | 24 | 36 | 36 | 34 | 39 | 44 | 62 |
| № колеса | 21 | 2 2 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 23 | 24 |
| Число зубьев | 32 | 80 | 36 | 20 | 50 | 80 | 50 | 20 | 50 | 50 | 50 | 64 |

На валик *I* посажены две фрикционные пластинчатые муфты, включение которых производится при помощи особого рычага, не показанного на рисунке. При включении левой муфты шпинделю сообщается рабочее вращение, а при включении правой муфты – ускоренное вращение в обратную сторону. При установке рычага в среднее положение муфта выключается, валик *I* вращается вхолостую, вращение шпинделя прекращается.

По валику *II* передвигаются колеса *7* и*8,* по валику *III* – колеса *11*, *12* и *13.*

Это позволяет при прямом вращении шпинделя сообщить валику *III* шесть скоростей.

Передвижные колеса *16* и *17* могут быть соединены с колесами *14* и *15*, а передвижные колеса *18* и *19* – с колесами *22* и *23.*

В данном узле могут иметь место четыре случая передачи вращения от валика *I* к валику *V* через промежуточный валик *IV* при следующих соединениях колес:

1. 14 – 16, 19 – 23
2. 14 – 16, 18 – 22
3. 15 – 17, 19 – 23
4. 15 – 17, 18 –22

Из указанных четырех возможных передач первая (*14 – 16, 19 – 23*) не применяется. Как видно, шпиндель имеет 18 скоростей прямого хода и 9 обратного.

Требуется:

1) определить все возможные случаи сцепления колес;
2) подсчитать передаточные числа для всех 18 случаев передачи вращения шпинделя;
3) объяснить, почему вариант передачи через колеса *14 – 16* и *19 – 23* не применяется.

**Задача 13**. На рис. 34 схематически показаны четыре (*а, б, в, г*) различных коробки подач. Все положения рукояток – рабочие.

Составить схемы коробок, используя для этого сочетания ранее разобранных механизмов (см. задачи 4 – 6), и зарисовать трафаретки для них.

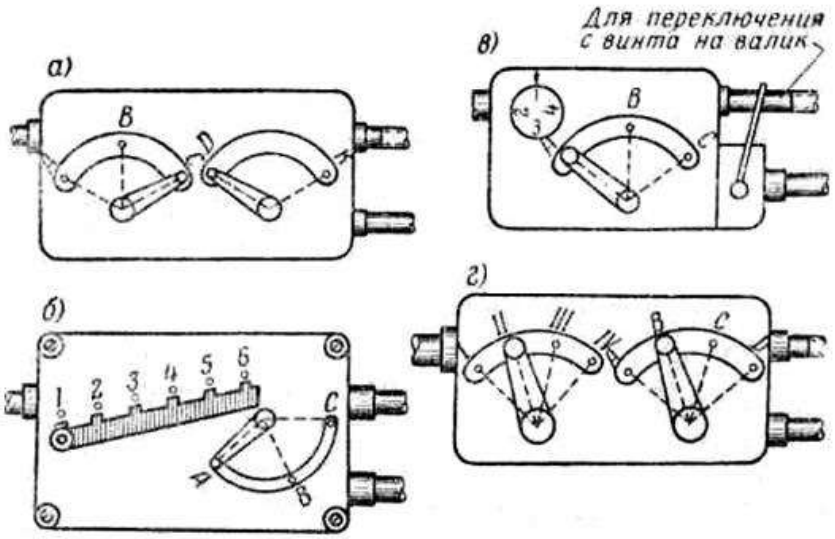



Рис. 34. Схематический чертеж четырех коробок подач различных токарных станков

**Задача 14**. На рис. 35*, а, б, в* схематически показаны три вида коробки скоростей. Все положения рукояток – рабочие. Составить схемы коробок скоростей, используя для этого сочетания разобранных ранее механизмов (см. задачи 4 – 6) и зарисовать соответствующие трафаретки.

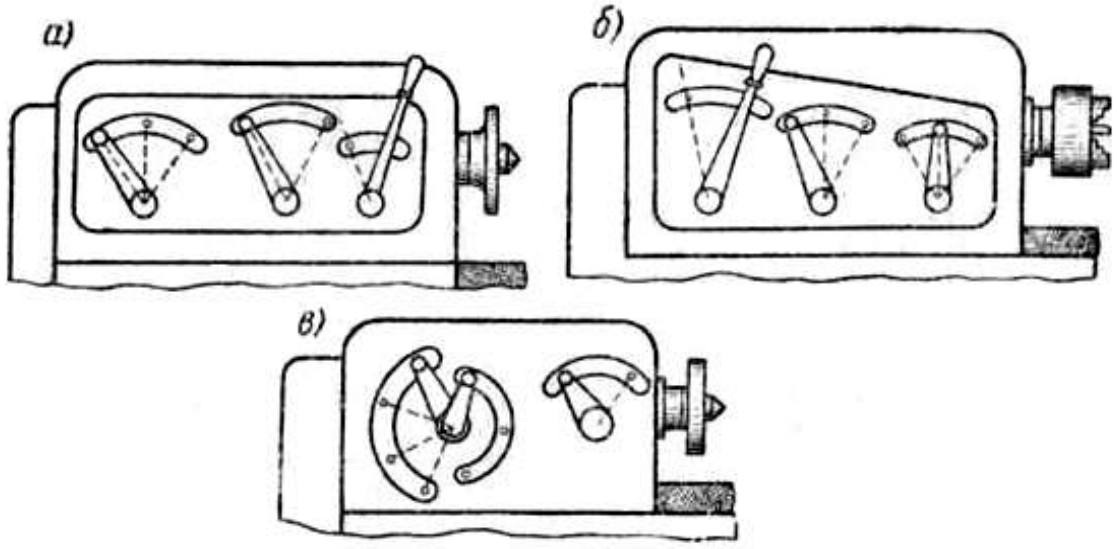



Рис. 35. Схематический чертеж трех коробок подач различных токарных станков

**Задача 15**. На рис. 36*, а, б,* в показаны три реверсивных механизма различных конструкций.

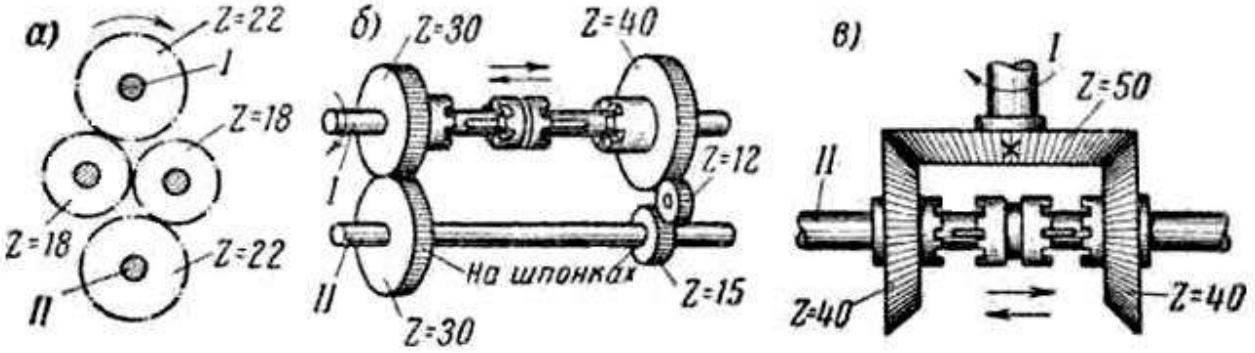



Рис. 36. Схемы трех реверсивных механизмов различных конструкций

Определить:

1) направление вращения ведомого валика *II* при вращении ведущего валика *I* в направлении, указанном стрелками;

2) передаточные числа для всех трех механизмов при прямом и обратном вращении валика *I*;

3) какие колеса необходимо поставить на трензель рис. 36, *б*, чтобы при одном из включений вращение ведомого валика *II* было в два раза быстрее?

**Задача 16**. На рис. 37, *а* дана кинематическая схема фартука суппорта токарного станка, а его наружный вид на рис. 37, *б*. Ходовой винт и маточная гайка на схеме не показаны.

Продольная автоматическая подача получается следующим образом. Ходовой валик вращает перемещающееся по нему на шпонке коническое колесо $z = 18$, которое, в свою очередь, вращает большое коническое колесо $z = 56$ и сидящее с ним на одном валике колесо $z = 14$. Далее подача идет через колеса: $z = 74$, $z = 18$, $z = 88$ и $z = 12$. Колесо $z = 12$ сцеплено с зубчатой рейкой. Включение и выключение продольной автоматической подачи производится при помощи фрикциона.

Продольная ручная подача осуществляется вращением маховика (через колеса $z = 14$, $z = 88$, $z = 12$ и зубчатую рейку).

Поперечная автоматическая подача осуществляется так: вращение колеса $z = 14$ через колеса $z = 74$ и $z = 20$ передается колесу $z = 18$, связанному шпонкой с винтом поперечной подачи. Поперечный само-

ход выключается передвижением колеса $z = 20$, которое при включенном самоходе соединяет колесо$z = 74$ с колесом $z = 18$.

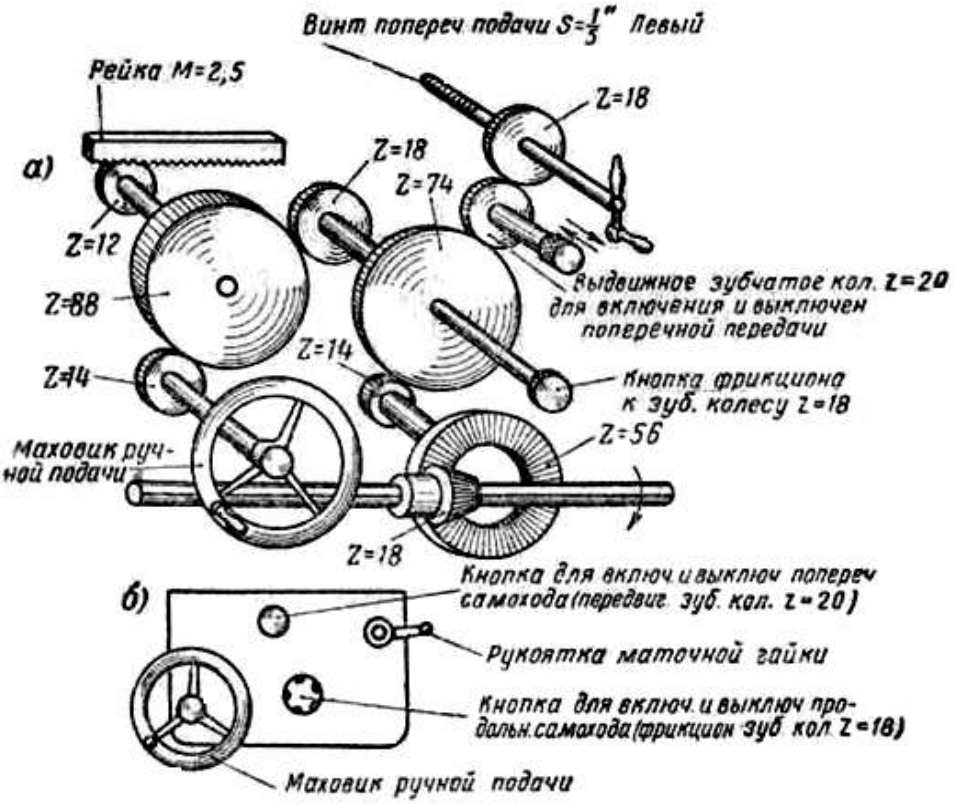



Рис. 37. Кинематическая схема фартука суппорта токарного станка

Определить:

1) в каком направлении будет перемещаться суппорт при включении продольного самохода, если ходовой валик вращается в направлении, указанном стрелкой (см. схему);
2) то же для поперечного суппорта; передаточное число от ходового валика к винту поперечной подачи (от конического колеса $z = 18$ к цилиндрическому колесу $z = 18$);
3) на сколько миллиметров переместятся верхние салазки суппорта за 100 оборотов ходового валика (при включении автоматической подачи).

**Задача 17.** На рис. 38, *а* дана схема, 38, *б* – наружный вид фартука суппорта с самостоятельными механизмами для осуществления продольной и поперечной автоматических подач.

Определить:

1) в каком направлении будет перемещаться суппорт при включении продольного самохода, если ходовой валик вращается в направ-

лении, указанном стрелкой (см. схему);

2) то же для поперечного суппорта;

3) передаточное число *i* механизма поперечной подачи (от валика к винту);

4) величину подачи (продольной) в миллиметрах на 10 оборотов ходового валика.

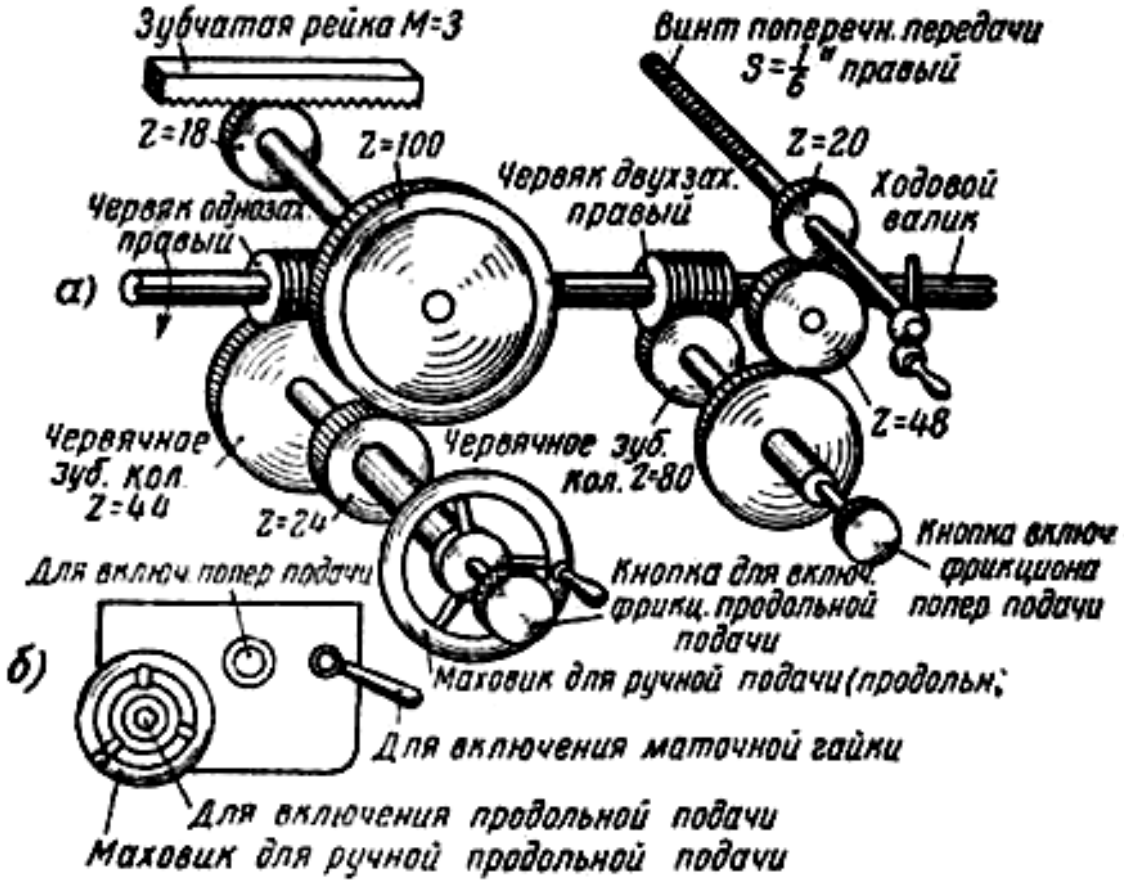



Рис. 38. Фартук суппорта с самостоятельным механизмом для автоматических подач

**Задача 18**. На рис. 39 показано несколько вариантов, передающих вращение токарным станкам. Условия передачи указаны на рисунке. Так, в варианте *а* требуется определить передаточное число колес коробки скоростей, если вал электродвигателя делает $n = 1000$ об/мин., а шпиндель станка – $n = 16$ об/мин.

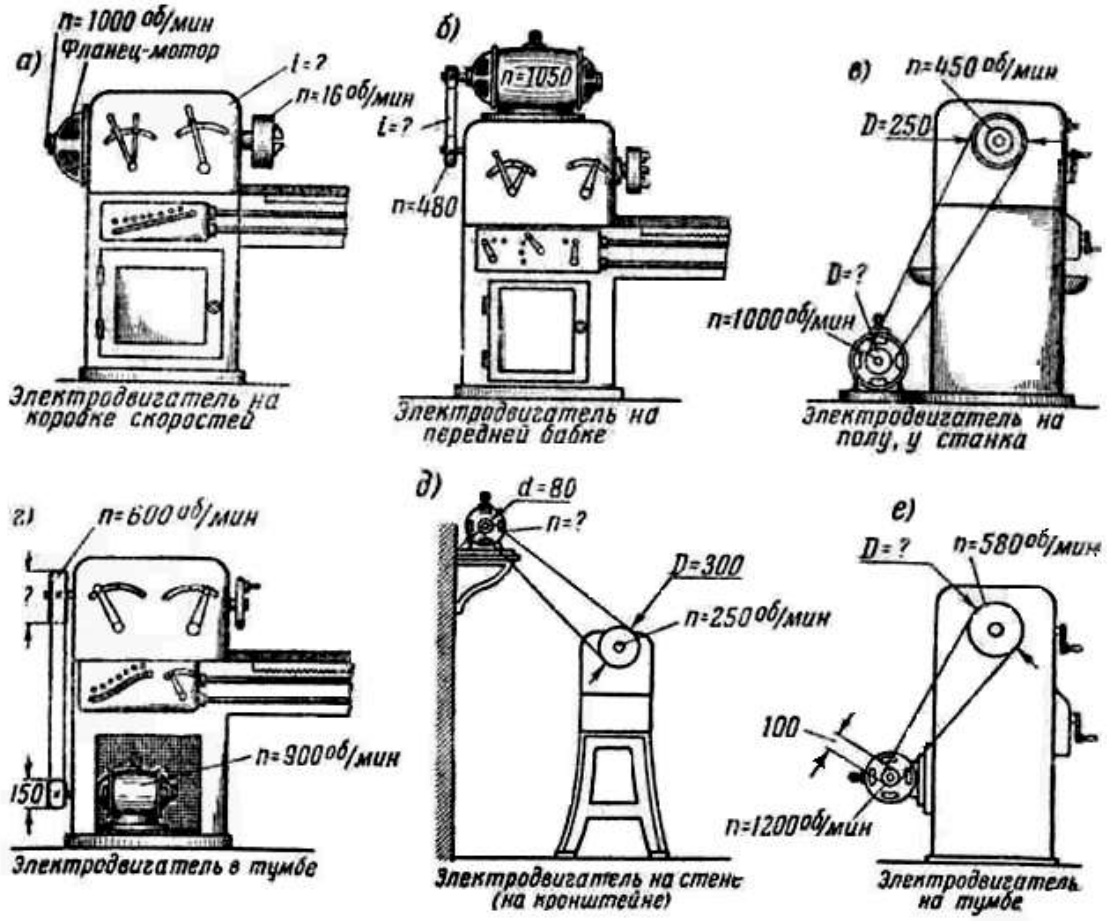



Рис. 39. Места установки электродвигателей

**Задача 19.** На рис. 40 дана схема привода с бесступенчатым вариатором механического типа системы Светозарова, применяемого на скоростном токарно-винторезном станке модели 1620

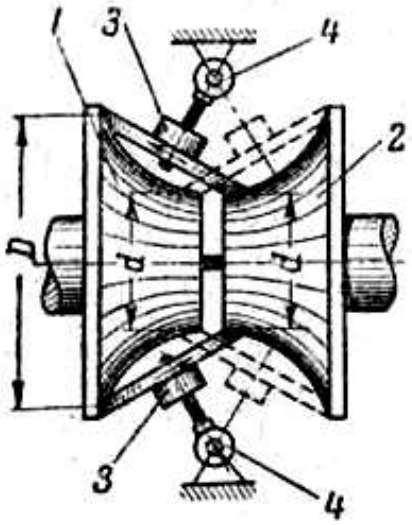



Рис. 40. Схема бесступенчатого вариатора механического типа системы Светозарова

Цифрами 1 и 2 обозначены сферические шкивы. Вращение от ведущего шкива *1* ведомому шкиву *2* передается через конические диски *3*, сидящие на валиках, перемещающихся относительно осей *4*.

Определить:

1) совпадает ли направление вращения шкивов *1* и *2*.
2) какой шкив вращается (в данном положении) с большим числом оборотов;
3) когда число оборотов ведомого шкива *2* будет равно числу оборотов ведущего шкива *1*;
4) влияет ли на передаточные числа между шкивами *1* и *2* диаметры конических дисков.

**Задача 20**. На рис. 41 показан редуктор привода главного движения скоростного токарно-винторезного станка модели 1616.

От редуктора при помощи клиновидных ремней передача идет через коробку к передней бабке станка: определить, сколько скоростей дает редуктор; подсчитать все возможные числа оборотов валика, передающего вращение через шкив и клиновидные ремни коробке скоростей.

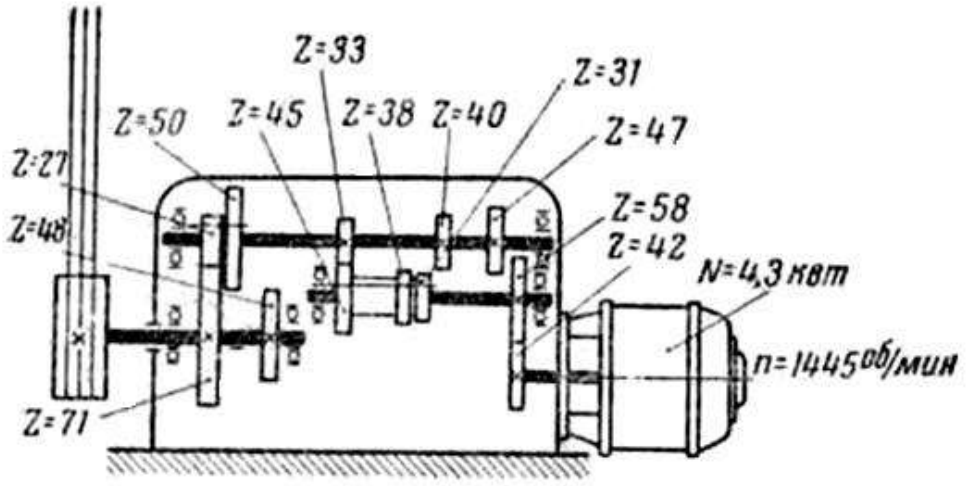



Рис. 41. Редуктор токарно-винторезного станка модели 1616

## ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ

1. На какие типы делятся токарные станки?
2. Какими способами осуществляется вращение шпинделя в обратную сторону?
3. В чем преимущества станка с коробкой скоростей по сравнению со станком со ступенчатым шкивом?
4. Какие марки токарных станков, выпускаемых нашей промышленностью, вы знаете?
5. Из каких основных механизмов состоят коробки скоростей и подач?
6. В чем сходство и разница механизмов кулачковой и фрикционной муфты?
7. Как, не открывая коробки скоростей, узнать рукоятку, включающую фрикционную муфту?
8. Как определить число скоростей шпинделя по числу рабочих включений различных рукояток коробки скоростей?
9. Имеются ли сменные шестерни у станков с коробками подач?
10. Какие разновидности механизмов существуют для изменения направления вращения ходового винта и ходового валика?
11. При помощи каких устройств и механизмов осуществляется автоматическая подача суппорта?
12. При помощи каких механизмов производится включение и выключение автоматических подач?
13. Как устроен механизм, не допускающий одновременного включения продольной подачи от винта и валика?
14. Какой формы получится изделие, если его обтачивать с автоматическими продольной и поперечной подачами?
15. Как устроены приспособления, автоматически выключающие подачу?
16. Как устроены предохранительные муфты, устанавливаемые на ходовом винте и валике?
17. Сколько скоростей прямого и обратного хода имеет станок ДИП 200?
18. В чем особенность устройства и назначения станков револьверного, расточного, карусельного, лобового?
19. В каких случаях применяются токарные автоматы?
20. Какими основными размерами характеризуется токарный станок?
21. Какие максимальные скорости вращения шпинделя достигнуты в настоящее время?
22. Расскажите историю развития токарных станков и роль русских изобретателей в этом вопросе.
23. Какое значение имело изобретение Андреем Нартовым суппорта и как это повлияло на дальнейшее усовершенствование металлообрабатывающих станков?

# Оглавление

РАБОТА №1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКАХ ..... 3
РАБОТА №2. РАСЧЕТ МОДУЛЯ РЕЙКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАДАННОЙ ВЕЛИЧИНЫ ПОДАЧИ..... 5
РАБОТА №3. РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ СМЕЩЕНИЯ ЗАДНЕЙ БАБКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОНУСА НА ТОКАРНОМ СТАНКЕ ..... 7
РАБОТА № 4. НАСТРОЙКА ТОКАРНО-ВИНТОРЕЗНОГО СТАНКАМОДЕЛИ 1К62Д НА НАРЕЗАНИЕ РЕЗЬБЫ ..... 16
РАБОТА №5. РАСЧЕТ НАСТРОЙКИ ТОКАРНО-ВИНТОРЕЗНОГО СТАНКА НА НАРЕЗАНИЕ РЕЗЬБЫ РЕЗЦОМ..... 27
ЗАНЯТИЕ 6. РАСЧЕТ ПЕРЕДАТОЧНОГО ОТНОШЕНИЯ И ЧИСЕЛ ЗУБЬЕВ ГИТАРЫ СМЕННЫХ КОЛЕС..... 31
ЗАНЯТИЕ 7. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ РЕЗЬБОФРЕЗЕРНОГО СТАНКА НА ФРЕЗЕРОВАНИЕ РЕЗЬБЫ ДИСКОВОЙ ФРЕЗОЙ..... 34
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 8. РАСЧЕТ КУЛИСНОГО МЕХАНИЗМА..... 38
ЗАДАЧИ И УПРАЖНЕНИЯ..... 43

Учебное издание

Сергей Александрович Волегов
Татьяна Петровна Глинникова

# ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ И ПРИСПОСОБЛЕНИЯ. МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

*практикум*
по выполнению практических работ
для студентов направления бакалавриата:
15.03.01 «Машиностроение» и СПО
специальности 15.02.01 «Монтаж и техническая эксплуатация промышленного оборудования (по отраслям)»
*очного и заочного обучения*

Редактор

Подписано в печать 12.**.2017 г.
Бумага писчая. Формат 60 × 84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. *,0. Уч.-изд. л. *. Тираж 100. Заказ №

Издательство УГГУ
620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

**Министерство образования и науки**
**Российской Федерации**
**ФГБОУ ВО «Уральский государственный**
**горный университет»**

**С. А. Волегов**

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА

***Лабораторный практикум***
**по дисциплине « технологическая оснастка»**
**для студентов направления подготовки**
**15.03.01 «Машиностроение» специализации**
**«Оборудование и технология повышения**
**износостойкости и восстановления деталей**
**машин и аппаратов»**

**Екатеринбург**
**2019**

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**ОДОБРЕНО**
Методической комиссией
горно-механического
факультета УГГУ
Председатель комиссии
_____ проф. В. П. Барановский

Сергей Александрович Волегов

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА

*Лабораторный практикум*
по дисциплине « Технологическое оборудование
машиностроительного производства»
для студентов направления подготовки
15.03.01 «Машиностроение» специализации
«Оборудование и технология повышения износостойкости
и восстановления деталей машин и аппаратов»

Издание УГГУ Екатеринбург, 2019

Волегов С. А. Лабораторный практикум. Руководство по выполнению лабораторных работ
по дисциплине «по дисциплине « Технологическое оборудование машиностроительного

производства» » для для студентов направления подготовки 15.03.01 «Машиностроение» специализации «Оборудование и технология повышения износостойкости и восстановления деталей машин и аппаратов» Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2017. 83 с.

В руководстве приведены методические указания и приведены краткие теоретические положения, на основе которых решаются отдельные задачи, указывается конкретная справочная и техническая литература, которая должна быть использована при этом. Руководство содержит необходимый объем справочной информации в виде таблиц, для выполнения практических работ.

Руководство по выполнению лабораторных работ рассмотрено на заседании кафедры эксплуатации горного оборудования 2017 г. (протокол № 6 ) и рекомендовано для издания в УГГУ.

Рецензент: А. И. Мамедов канд. техн. наук

© Волегов С. А., 2019
© Уральский государственный
горный университет, 2019

# РАБОТА № 1. ИЗУЧЕНИЕ УСТРОЙСТВ, РАСШИРЯЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СТАНКОВ

После того, как получено производственное задание, необходимо решить: с использованием какого оборудования и инструмента можно вести обработку; каким образом закрепить деталь и инструмент на станке; какие средства контроля использовать, чтобы размеры и формы детали соответствовали требованиям чертежа (эскиза).

Могут быть случаи, когда станок не обладает оборудованием, которое необходимо для выполнения задания. Поэтому необходимы устройства, расширяющие технологические возможности имеющихся станков. Так, при отсутствии фрезерного станка несложные фрезерные работы могут быть выполнены на токарном или вертикально-сверлильном станках. На ***специально оборудованном*** вертикально-сверлильном станке может выполняться свыше 50 операций, включающую токарную обработку и фрезерование плоскостей.

***Пример. Приспособления, расширяющие технологические возможности фрезерных станков*** подразделяются на две группы. Приспособления одной группы, такие как дополнительные одно- и многошпиндельные фрезерные головки, головки для фрезерования реек, копировальные приспособления и т.п., не изменяют основного назначения станка, а приспособления другой группы – долбежные, сверлильные и шлифовальные головки – в корне меняют характер выполняемых на станке технологических операций.

*Дополнительная вертикально-фрезерная головка* (рис. 1, *а*), устанавливаемая на горизонтально-фрезерном станке, делает его более универсальным. Головку *2* крепят на вертикальных направляющих *1* станины. Шпиндель *3* головки приводится во вращение от шпинделя станка через зубчатые колеса.

*Приспособление для фрезерования реек* (рис. 1, *б*), закрепляемое на хоботе *4* горизонтально-фрезерного станка, приводится в действие от шпинделя *5* станка. Впадину рейки прорезают фрезой *6* при поперечной подаче стола, а смещение рейки на один шаг выполняется вместе со столом в продольном направлении.

*Двухшпиндельная фрезерная головка* (рис. 1, *в*), может быть использована при обработке заготовки сразу с двух сторон или при фрезеровании ступенчатых поверхностей. В последнем случае один из шпинделей имеет осевое установочное перемещение. В некоторых конструкциях двухшпиндельных фрезерных головок можно регулировать расстояние между осями шпинделей.

*Сверлильная головка* (рис. 1, *г*), установленная на станке, имеет привод шпинделя от электродвигателя *7* через коробку скоростей *8*. Сверлильную головку используют при сверлении малых отверстий, когда необходима большая частота вращения инструмента.

*Шлифовальную головку,* показанную на рис.1, *д*, устанавливают на станине консольно-фрезерного станка, ее шпиндель *11* приводится во вращение шпинделем станка через две ременные передачи, что повышает частоту его вращения.

*Долбежную головку* (рис. 1, *е*) используют на фрезерном станке при отсутствии на производстве долбежного станка. Головку устанавливают на станине горизонтально-фрезерного станка. Ползун *9* с резцом *10* получает возвратно-поступательное движение от шпинделя станка через кривошипно-шатунный механизм.

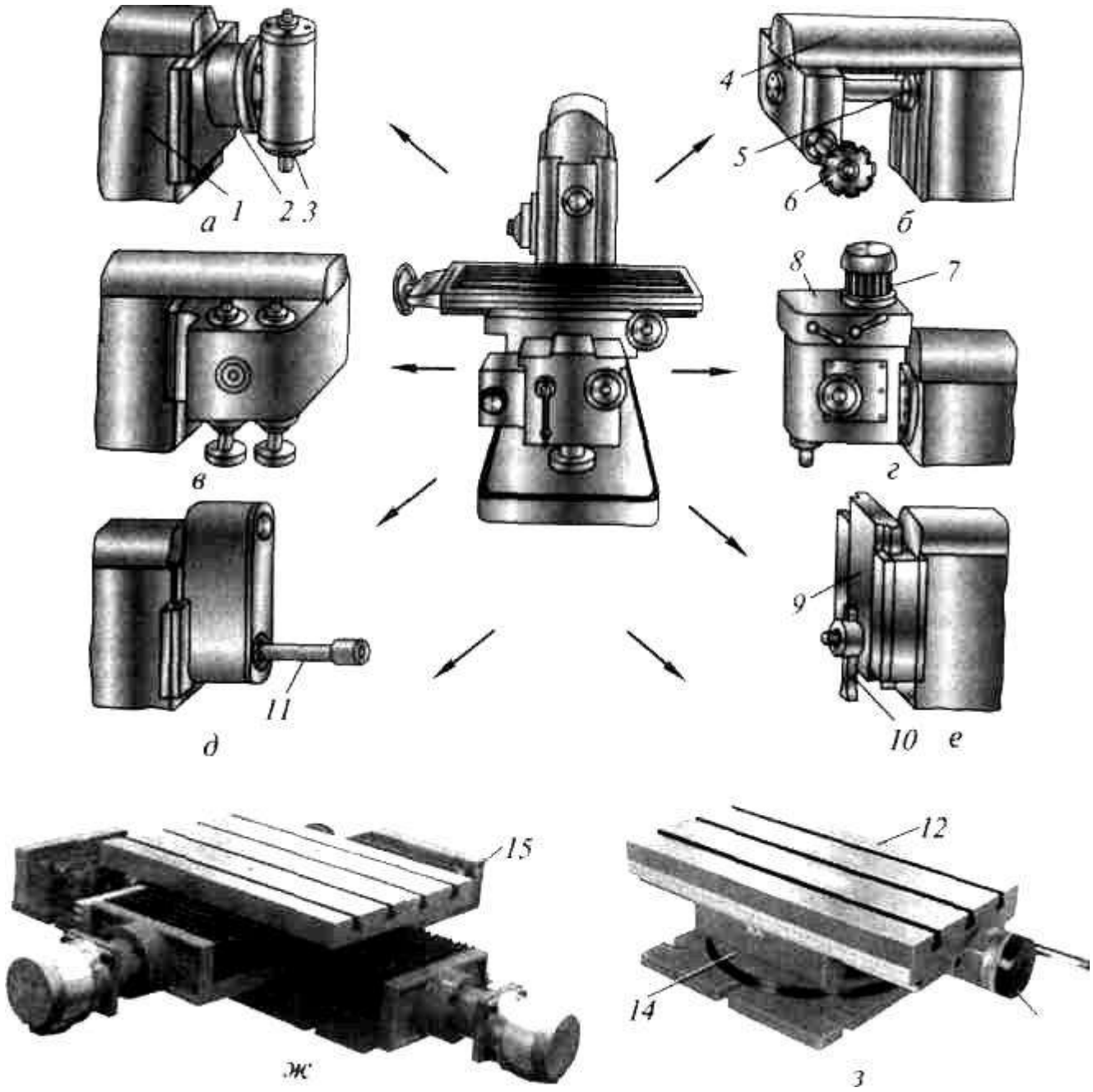



Рис.1. Приспособления, расширяющие технологические возможности фрезерных станков:

*1* – направляющая станины; *2* – вертикально-фрезерная головка; *3,5* – шпиндель;*4* – хобот станка;*5* – шпиндель станка; *6* – фреза; *7* – электродвигатель; *8* – коробка скоростей; *9* – ползун; *10* – резец; *11* – шпиндель шлифовальной головки; *12* – стол для продольных перемещений с пазами;*13* – рукоятка; *14* – поворотный стол;*15* – крестовый стол

Для выполнения работ повышенной точности на универсальных станках нормального класса на стол станка (рис. 1, *ж*) устанавливают

*дополнительный крестовый стол 15*.

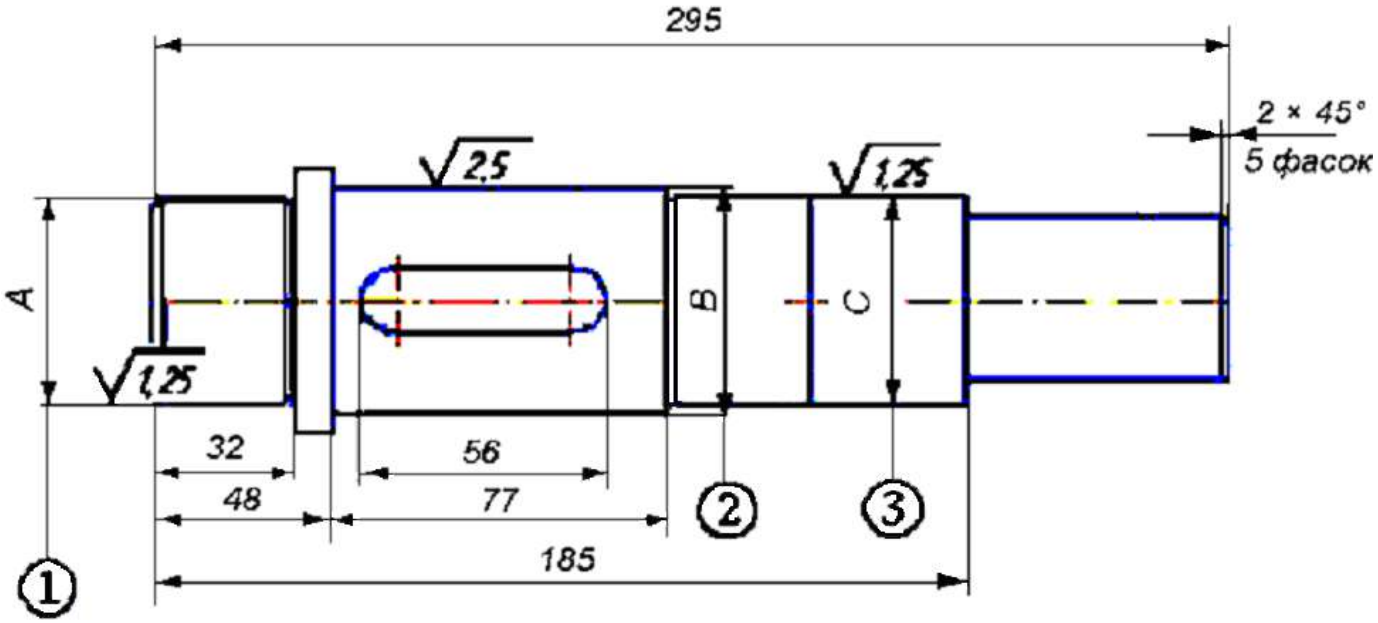
Дальнейшее расширение технологических возможностей горизонтальных и вертикальных фрезерных станков обеспечивает установка на поворотном столе *14* (рис. 1, *з*) *дополнительного стола 12* с пазами для продольных перемещений.

Помощь в выборе и рациональном применении систем станочных приспособлений могут оказать методические указания [2].

## ХОД РАБОТЫ

1. Ознакомиться визуально с конструкциями предлагаемых устройств.
2. Скомпоновать и дать схему устройства, предназначенного для шлифования наружных цилиндрических поверхностей на токарном станке.
3. Подобрать круг (выбрать полную характеристику) и определить режим резания для обработки деталей из заданного материала (по литературе [1]).
4. Скомпоновать и дать схему устройства, предназначенного для обработки (фрезерования) многогранника на токарном станке.
5. Подобрать инструмент и рассчитать режим резания для обработки детали (многогранника) из заданного материала.

6. Данные для расчетов режимов резания брать из табл.1. Для расчета режима резания при обработке детали (многогранника)




принять размеры детали и материал по заданному варианту.

Рис. 2. Эскиз детали

Таблица 1

**Варианты заданий**

| Вариант | поверхность | Диаметр | материал |
|---|---|---|---|
| 1 | 1 | A = 30 | Ст 40 не закаленная |
| 2 | 2 | B = 40 | Ст 35 не закаленная |
| 3 | 3 | C = 50 | Ст 45 не закаленная |
| 4 | 1 | A = 60 | Сталь 40ХНМА закаленная |
| 5 | 2 | B = 70 | Сталь 30ХГС, закаленная |
| 6 | 3 | C = 80 | Ст 40 закаленная |
| 7 | 1 | A = 90 | Ст 40Х закаленная |
| 8 | 2 | B = 100 | Ст 40 Х закаленная |
| 9 | 3 | C = 90 | Ст 45Х закаленная |
| 10 | 1 | A = 80 | Ст 45Х закаленная |
| 11 | 2 | B = 70 | Ст 40Х не закаленная |
| 12 | 3 | C = 60 | Ст 5 не закаленная |

(Форма отчета для лабораторной работы № 1)

Студент _____ Группа _____

Отчет по лабораторной работе № 1
Изучение устройств, расширяющих технологические возможности станков

*Схемы приспособлений*

*Эскиз инструмента с обозначением по ГОСТу*

*Режим резания (расчет)*

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Глинникова Т. П., Волегов С. А.* Пособие по выполнению самостоятельных работ по дисциплине «ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ» ИЗУЧЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И ВЫБОР РЕЖИМА РЕЗАНИЯ (Часть 1) для студентов профилизации «Горные машины и оборудование» направления 150400 – «Технологические машины и оборудование» для студентов очного и заочного обучения Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. 112 с.
2. Методические указания ЕСТТП. Выбор и рациональное применение систем станочных приспособлений. М.: Изд-во стандартов, 1979. – 87 с.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2
# ИЗУЧЕНИЕ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

**Цель работы**: анализ конструкций некоторых рабочих приспособлений.

**Краткие теоретические сведения**

Для правильной работы каждой машины необходимо обеспечить определенное взаимное расположение ее деталей и узлов. При обработке деталей на станках заготовки также должны быть правильно ориентированы относительно механизмов и узлов станков. Погрешности формы и размеров обработанных заготовок определяются отклонениями положений режущих кромок и заготовок от траектории заданного формообразующего движения. Задачи взаимной ориентировки деталей и сборочных единиц в машинах при их сборке и заготовок на станках при изготовлении деталей решаются их базированием.

Под базированием понимается придание заготовке или изделию требуемого положения относительно выбранной системы координат. При механической обработке заготовок на станках базирование осуществляется относительно элементов станка или инструмента. Для обеспечения обработки заготовки необходимо решить две задачи: сориентировать заготовку на станке (обеспечить ее правильное базирование) и закрепить ее в данном положении. Обе эти задачи решаются посредством наложения определенных ограничений (связей) на возможные перемещения заготовки в пространстве. Известно, что для полного исключения подвижности твердого тела в пространстве

необходимо лишить его шести степеней свободы − трех поступательных перемещений вдоль осей координат и трех вращений вокруг указанных осей.

На рис. 3 представлена заготовка призматической формы с наложенными на нее связями в шести опорных точках (т. е. лишенная всех шести степеней свободы). Под опорной точкой понимают идеальную точку контакта заготовки и приспособления, лишающая заготовку одной степени свободы. Поверхности заготовок, используемые для базирования, называются базами. Различают:

- установочную базу − находящуюся в контакте с тремя опорными точками (точки 1, 2 и 3 на рис. 3);
- направляющую базу − находящуюся в контакте с двумя точками (точки 4 и 5);
- упорную базу − находящуюся в контакте с одной точкой (точка 6).

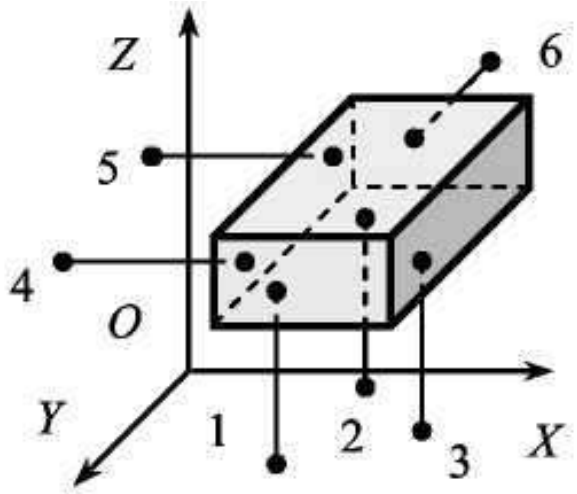



Рис. 3. Схема базирования призматической заготовки

Для повышения точности и надежности ориентировки в качестве установочной базы принимают поверхность с наибольшими раз-

мерами, позволяющими разнести три опорные точки как можно дальше друг от друга. В качестве направляющей базы принимается поверхность, наиболее протяженная по длине.

Для ориентирования тела в пространстве иногда не требуется лишение его всех 6 степеней свободы. Так, например, цилиндрическое тело, в большинстве случаев, допускает вращение вокруг своей оси. Тогда достаточно точно его положение в пространстве определится 5 опорными точками (рис. 4, 5).

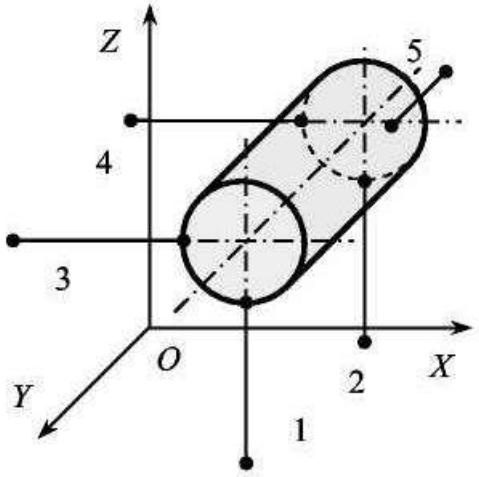



Рис. 4. Схема базирования длинной цилиндрической заготовки

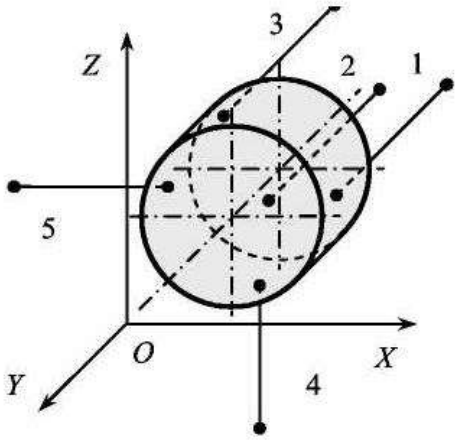



Рис. 5. Схема базирования диска

Для базирования заготовок и изделий в процессе их механической обработки и сборки используются приспособления − вспомогательные устройства, предназначенные для выполнения операций механической обработки, сборки и контроля.

По целевому назначению приспособления делятся:

- на станочные приспособления для установки и закрепления обрабатываемых заготовок на станках. В зависимости от вида обработки различают токарные, фрезерные, сверлильные, расточные, шлифовальные и другие приспособления;

- приспособления для крепления режущего инструмента. Они характеризуются большим числом нормализованных деталей и конструкций, что объясняется нормализацией и стандартизацией самих режущих инструментов; сборочные приспособления используют при выполнении сборочных операций, требующих большой точности сборки и приложения больших усилий; контрольно-измерительные приспособления применяют для контроля заготовок, промежуточного и окончательного контроля, а также для проверки собранных узлов и машин. Контрольные приспособления служат для установки мерительного инструмента;
- приспособления для захвата, перемещения и перевертывания обрабатываемых заготовок, а также отдельных деталей и узлов при сборке.

В зависимости от вида производства, технологических требований станочные приспособления подразделяют:

- на универсальные приспособления (УП) – применяют для оснащения станков, работающих в условиях единичного производства, допускают установку заготовок различной формы и размеров. УП не обеспечивают высокой точности установки заготовок. К ним относятся универсальные, поворотные, делительные столы; самоцентрирующие патроны, тиски, кондукторы;
- универсально-сборные (УСП) − предназначены для оснащения станков, работающих в условиях единичного и мелкосерийного производства, их собирают из взаимозаменяемых узлов состоит из нескольких групп элементов и узлов: 1) базовые элементы, в том числе, плиты, угольники и др.; 2) опорные и корпусные элементы, опоры,

планки, угольники и др.; 3) направляющие и установочные элементы - втулки, шпонки, штыри, колонки и др.; 4) прижимные элементы - прихваты, кулачки и др.; 5) крепежные элементы - болты, гайки, шайбы, штифты и др.; 6) неразборные узлы - зажимные, установочные, силовые и др.;

- сборно-разборные (СРП) − применяют в условиях мелкосерийного и серийного производства, их собирают из нормализованных и стандартизованных узлов и деталей, которые возможно дорабатывать в процессе сборки приспособления, предназначены для крепления однотипных заготовок;
- универсально-переналаживаемые (УПП) – применяются в мелкосерийном и серийном производствах, состоят из корпусных деталей, снабженных сменными наладками, при этом корпусные детали и их приводы сохраняются постоянными, являясь неразборной частью. В состав УПП входят кулачковые и цанговые патроны, тиски, делительные устройства, скальчатые кондукторы, столы и др.;
- специальные (СП) − предназначены для выполнения налаженных операций, закрепленных за определенными станками, разрабатываются на конкретные заготовки для выполнения конкретных операций, обеспечивают высокую точность и быстрое закрепление, используются в условиях массового производства.

Приспособления для токарных и круглошлифовальных станков.

К ним относятся центры, поводковые приспособления, оправки, цанги, люнеты, патроны различных типов.

Центры устанавливают в шпинделе передней бабки токарного или шлифовального станка.

Они подразделяются на следующие типы:

- неподвижные;
- вращающиеся (рис. 6);
- плавающие;
- рифленые

Конусная поверхность центра предназначена для установки детали и имеет угол при вершине 60°, 90°, 120°; хвостовик центра изготавливают с конусом Морзе определенного номера (№ 2, 3, 4, 5, 6).

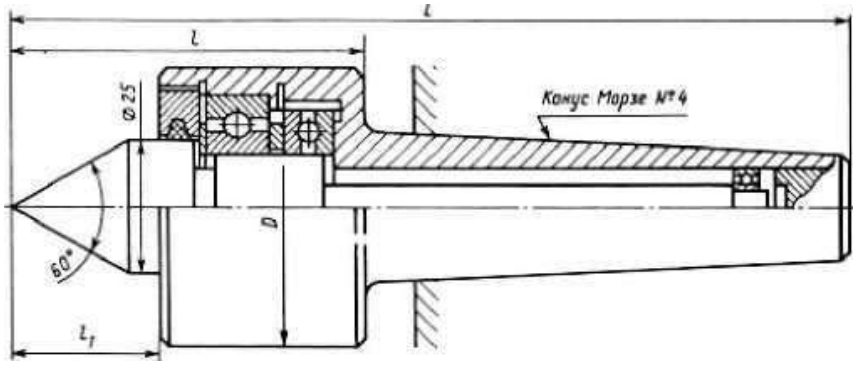



Рис. 6. Задний вращающийся центр для установки детали с центровыми отверстиями

Поводковые приспособления применяют для передачи вращательного движения (крутящего момента) от шпинделя станка к обрабатываемой детали, установленной в центрах, на оправке или в патроне. К поводковым приспособлениям относятся хомутики, поводковые планшайбы, поводковые патроны. Схема точения заготовки *2*, закрепленной в центрах и поводковом патроне *3* с хомутиком *1*, представлена на рис. 7.

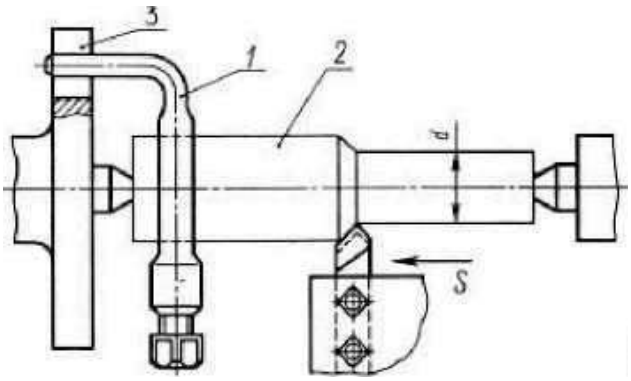



Рис.7. Схема обработки заготовки на токарном станке

Поводковые патроны имеют два или три эксцентриковых кулачка с насечкой, которые в начале обработки под действием сил резания зажимают обрабатываемую деталь, установленную в центрах станка, и передают ей крутящий момент от шпинделя станка; с увеличением крутящего момента резания автоматически увеличивается крутящий момент патрона. Для удобства установки деталей на центры применяют конструкции с автоматически раскрывающимися кулачками.

Кулачковые патроны применяют для установки и зажима различных деталей, обрабатываемых на токарных и шлифовальных станках. В зависимости от количества кулачков патроны разделяют на двух-, трех- и четырехкулачковые.

Наибольшее применение имеют универсальные трехкулачковые спирально-реечные патроны с плоской спиралью и ручным ключевым зажимом (рис. 8). В корпусе 1 патрона расположен диск 2, имеющий на одном конце коническое зубчатое колесо, на другом − спиральные реечные пазы, находящиеся в зацеплении с рейками 3. В крестообразном пазу реек 3 устанавливают и закрепляют винтами 4 прямые или обратные накладные кулачки. При вращении

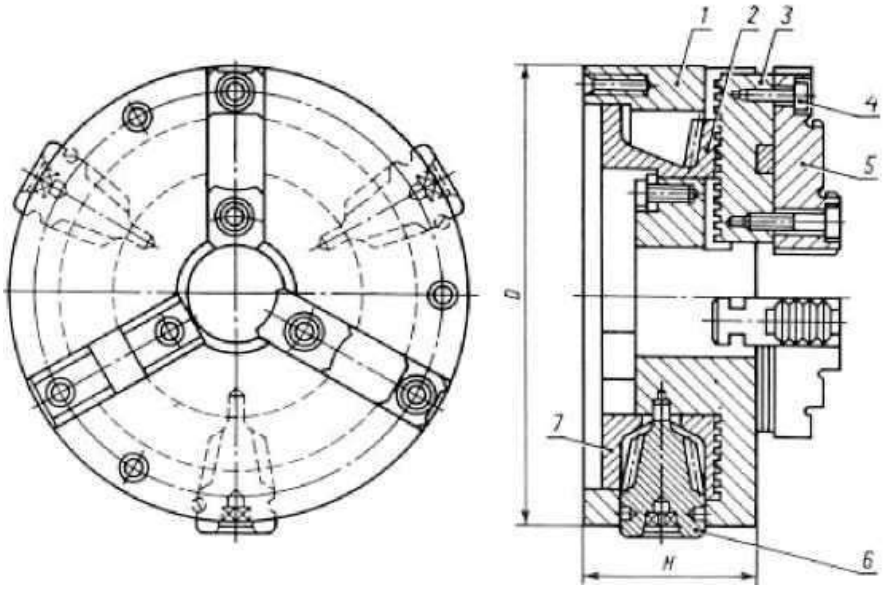



Рис. 8. Трехкулачковый спирально-реечный самоцентрирующий патрон

торцовым ключом одного из трех конических зубчатых колес 6, находящихся в зацеплении с коническим зубчатым венцом диска 2, последний поворачивается и перемещает рейки 3 с кулачками 5 к оси патрона при зажиме детали и от оси − при ее освобождении. Крышка 7 удерживает диск 2 в корпусе патрона от продольного смещения и препятствует попаданию в патрон стружки и грязи.

Цанговые патроны используются для закрепления заготовок из сортового проката простой геометрической формы. Основным элементом такого патрона является цанга -разрезная пружинящая втулка. Конструкция цангового патрона с центрированием по наружному диаметру заготовки с выдвижной цангой представлена на рис. 7 (N - осевая сила; Q - радиальная сила, действующая на деталь; Q1 - сила

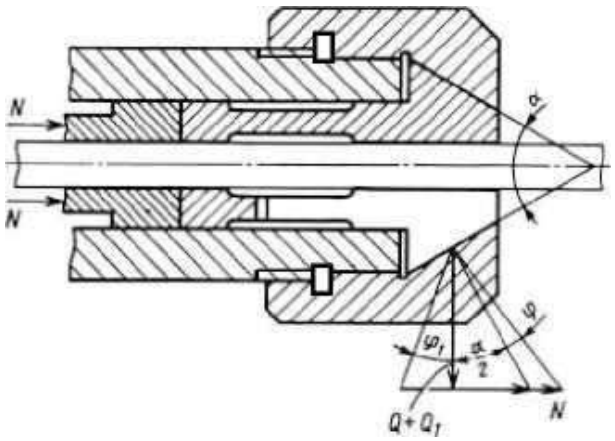



Рис. 9. Цанговый патрон с выдвижной цангой

предварительного сжатия лепестков цанги; α = 30 ... 40° – угол при вершине конуса цанги; φ = 6...8° – угол трения).

Оправки применяют для установки деталей по центральному отверстию. К таким деталям относятся втулки, гильзы, кольца, зубчатые колеса, обрабатываемые на многорезцовых, шлифовальных и других станках. Зажим и разжим детали на оправке производится механизированным приводом. В зависимости от способа закрепления оправки на станке различаются центровые, шпиндельные и фланцевые оправки.

Центровые оправки имеют центровые отверстия, которыми они устанавливаются на центры токарных, шлифовальных и других металлорежущих станков. Они могут иметь коническую рабочую поверхность для обеспечения высокой точности центрирования (рис. 10, *а*). Для установки деталей с зазором (рис.10, *б*) или натягом используется гладкая оправка, на цилиндрической части которой устанавливают обрабатываемую деталь.

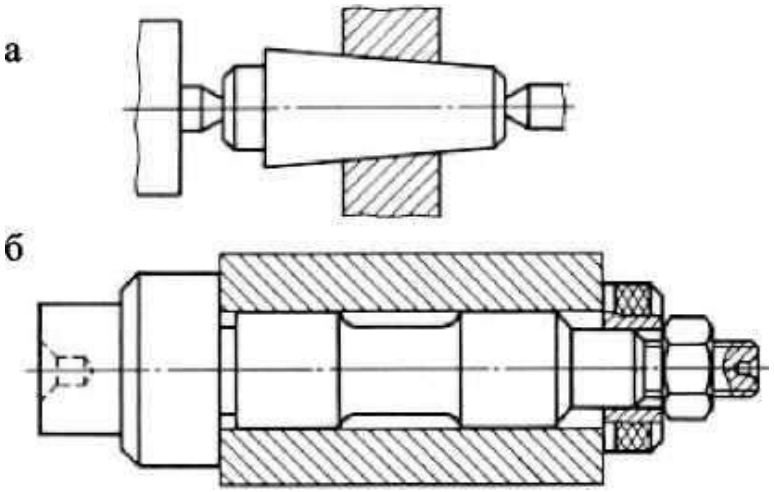



Рис. 10. Центровые оправки для установки цилиндрических заготовок в центрах на токарном станке

Шпиндельные оправки конической частью вставляются в корпус шпинделя станка. Для обеспечения высокой концентричности наружных и внутренних поверхностей применяется оправка с разрезной втулкой, на которой устанавливают и зажимают обрабатываемую деталь (рис.11).

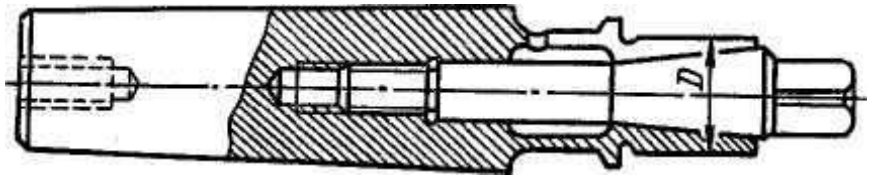


Рис. 11. Шпиндельная разжимная оправка

Люнеты (рис. 12) применяют в качества дополнительных опор при обработке нежестких валов. Используются универсальные неподвижные или подвижные люнеты с раздвижными кулачками и специальные, предназначенные для обработки определенных деталей или для поддержания приспособления, установленного на шпинделе станка и имеющего большой вылет.

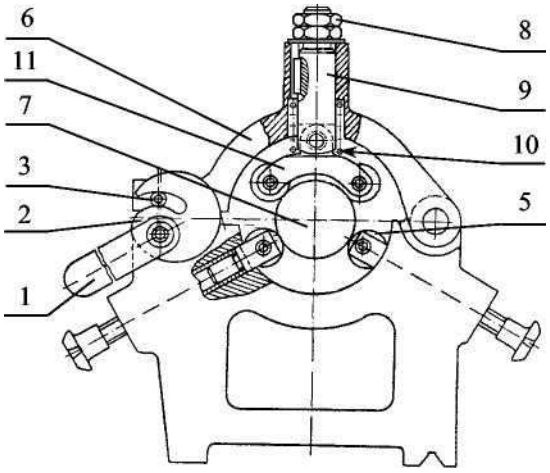



Рис. 12. Неподвижный универсальный люнет

В корпус 4 люнета установлены два шарикоподшипника 5. В отверстие крышки 6 вставлен валик 9 с пружиной, на конце валика подвижно закреплена серьга 11с двумя шарикоподшипниками 5. При закреплении обрабатываемого вала 7 опускают крышку 6 люнета и верхней гайкой 8 регулируют положения валика 9. Рукояткой 1 поворачивают эксцентрик 2, в спиральный паз которого входит штифт 3, установленный в крышке 6, и крышка перемещается к центру люнета. При этом пружина 10 прижимает серьгу 11с верхними подшипниками к валу и он зажимается между верхними и нижними подшипниками.

Приспособления для сверлильных станков

Кондукторы предназначены для установки деталей, обрабатываемых на сверлильных станках, имеют кондукторные втулки для направления режущего инструмента.

Кондукторные втулки (рис. 13) служат для направления режущего инструмента при обработке отверстий в деталях на сверлильных, агрегатных и расточных станках. Кондукторные втулки классифицируются на постоянные без буртика и с буртиком (рис. 11, а) и

сменные с буртиком (рис. 11, б, в). При обработке деталей с направлением режущего инструмента кондукторными втулками необходимо применять охлаждение для предупреждения большого нагревания инструмента и возможности его заедания во втулке. Кондукторные плиты служат для установки в их отверстиях кондукторных втулок.

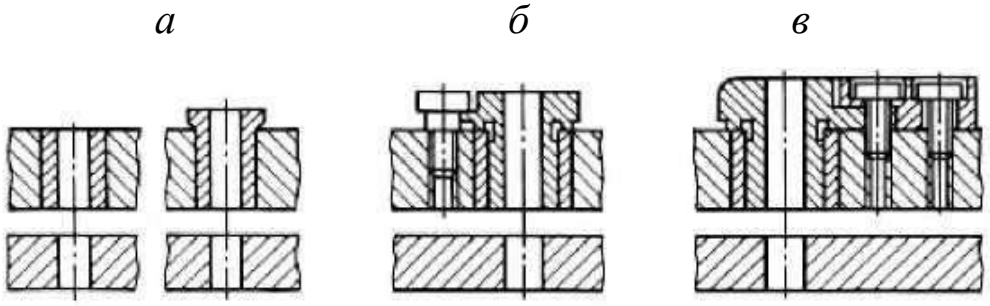



Рис. 13. Кондукторные втулки

Различают кондукторы накладные, стационарные, передвижные, поворотные. Наиболее широко применяются скальчатые кондукторы консольного и портального типов, с ручным или пневматическим зажимом (рис. 14).

В конструкции любого скальчатого кондуктора входят постоянные и сменные узлы (наладки). Постоянная часть кондуктора состоит из двух или трех расположенных в корпусе скалок, несущих кондукторную плиту, механизма для перемещения скалок и зажима обрабатываемых деталей. Сменные наладки проектируются в соответствия с конфигурацией обрабатываемых деталей и состоят из установочно-зажимных узлов и сменной кондукторной плиты с комплектом кондукторных втулок.

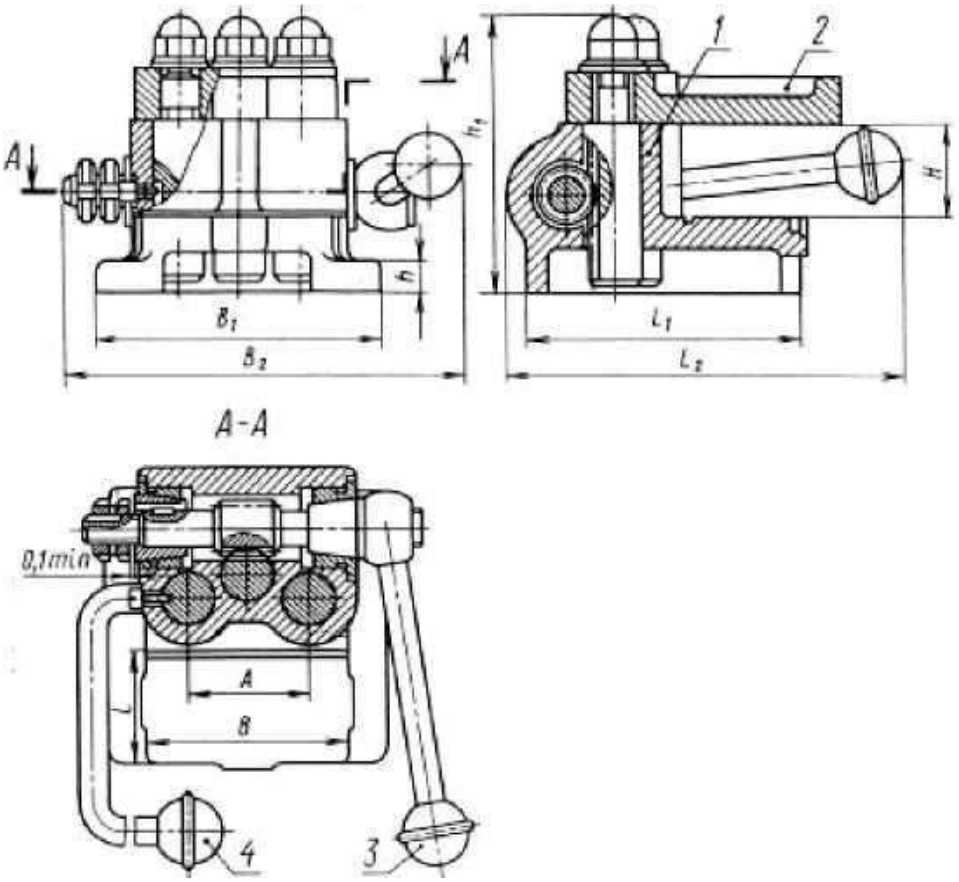



Рис. 14. Кондуктор скальчатый с конусным зажимом

В отверстиях корпуса 1 скользят три скалки, на которых гайками закреплена кондукторная плита 2. Средняя скалка-рейка с косыми зубами связана с зубчатым валиком. Правый конец этого валика имеет конический участок, а на левом конце его на шпонке смонтирована конусная втулка. Оба конуса притерты в конических отверстиях крышек. Опускание плиты 2 осуществляется рукояткой 3.

В момент контакта плиты с обрабатываемой деталью скалка-рейка останавливается. При дальнейшем нажиме на рукоятку горизонтальная составляющая реакции со стороны скалки-рейки на зубчатый валик смещает его влево, затягивает первый конусный замок и стопорный механизм. Для освобождения детали и подъема плиты ру-

коятку вращают в обратную сторону. Горизонтальная составляющая реакции зубца скалки на зубец валика изменяет свое направление и выжимает конический участок валика из конического гнезда крышки, что дает возможность поднять плиту. В ее крайнем верхнем положении скалка-рейка, действуя на зубчатый валик, смещает его вправо, при этом коническая втулка затягивается в гнездо крышки и срабатывает левый самотормозящийся конусный замок, удерживая плиту в верхнем положении.

Приспособления для фрезерных станков

Приспособления, применяемые во фрезерных станках можно разделить на приспособления для закрепления заготовок, приспособления для закрепления фрез и приспособления, расширяющие технологические возможности фрезерных станков.

Станочные тиски являются универсальным приспособлением, их применяют для базирования различных по форме и размерам деталей. Тиски имеют постоянные детали (корпус, салазки, механизм зажима) и сменные губки, которые используют при обработке деталей различных типоразмеров. По конструкции механизма зажима тиски различаются на винтовые и эксцентриковые. По типу силового привода - с ручным приводом, с механическим приводом, пневматические, пневмогидравлические, гидравлические. Кроме того, тиски бывают поворотные и неповоротные.

Тиски станочные с эксцентриковым зажимом и одной подвижной губкой (рис. 15) имеют корпус 1, по направляющим которого перемещается подвижная губка 2 с помощью ходового

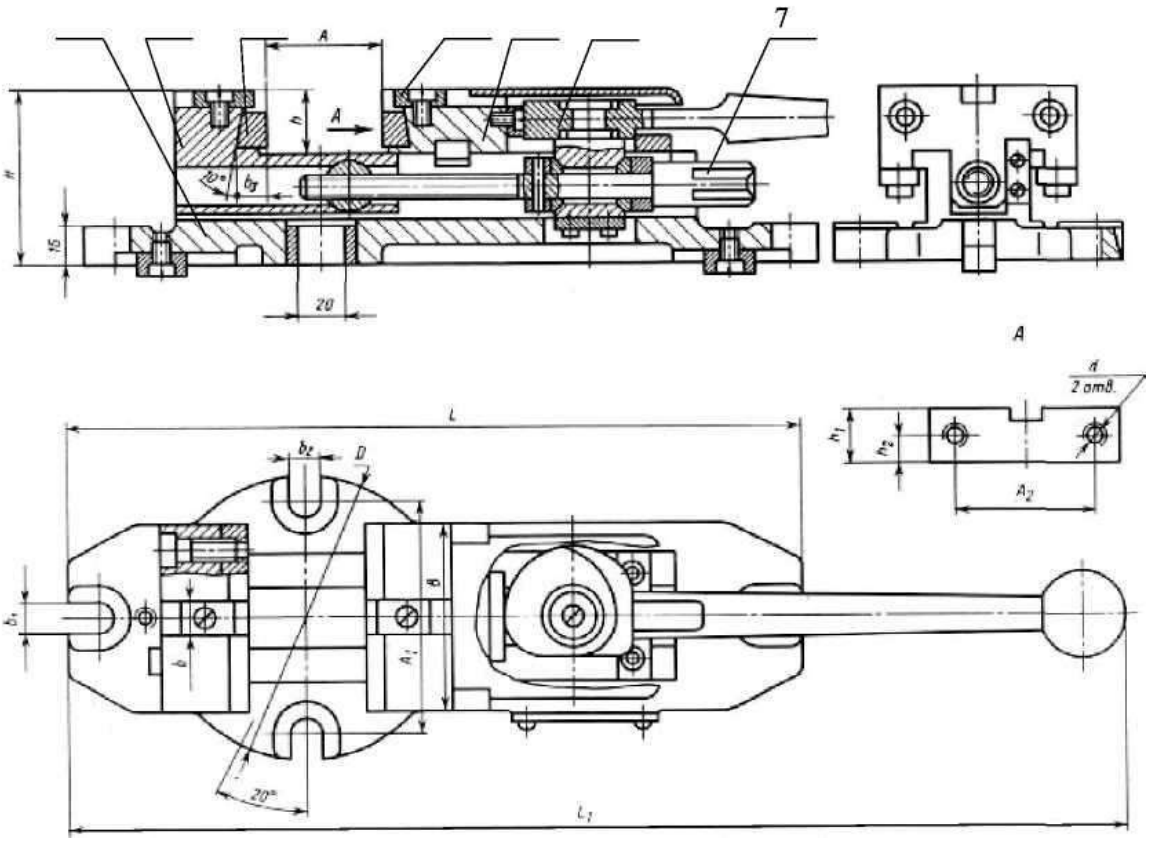
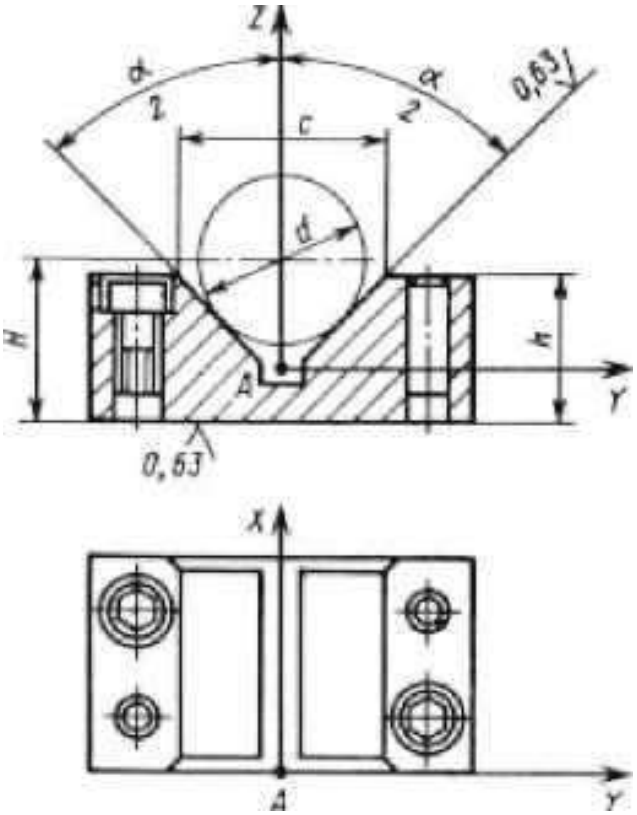



Рис. 15. Тиски станочные с эксцентриковым зажимом и одной подвижной губкой

винта 7 (при наладке тисков) и эксцентрика 6 с рукояткой (в процессе эксплуатации тисков). Деталь закрепляется между опорными поверхностями подвижной губки 2 и неподвижной губки 5. Накладные губки 3 выполняются в соответствии с формой зажимаемой детали и фиксируются с помощью накладных шпонок 4. Тиски могут устанавливаться непосредственно на стол станка или крепиться с помощью подставок.

Для базирования деталей, имеющих цилиндрические поверхности, используют опорные призмы различных конструкций. Призмы (рис. 16) применяются для базирования коротких заготовок или как элемент опорной сборной призмы, предназначенной для базирования

длинных заготовок. При установке деталей по черновой базе, а также при установке ступенчатых валов рабочие поверхности призм делают узкими




.Рис. 16. Призма для установки цилиндрических заготовок по обработанным поверхностям

Для расширения технологических возможностей фрезерных станков используют различные приспособления, позволяющие сообщить детали дополнительные рабочие или вспомогательные движения. К ним относятся круглые поворотные столы, делительные головки с прерывистым и непрерывным поворотом и др.

Делительные головки применяют для установки, зажима и периодического поворота заготовок на требуемый угол или для их непрерывного вращения при фрезеровании винтовых канавок.

Конструкции делительных головок весьма разнообразны, хотя

состоят из одних и тех же частей: корпуса, поворотной части, делительного механизма (фиксатора) и механизма зажима поворотной части.

Наиболее распространена универсальная лимбовая делительная головка (рис. 17, *а, б*). Она состоит из корпуса 1, делительного лимба5, поворотного барабана 2 и шпинделя 4 с центром. В корпусе на шпинделе жестко закреплено червячное зубчатое колесо (обычно с числом зубьев $z$ = 40), находящееся в зацеплении с однозаходным червяком ($k$ = 1). Вращение шпинделю сообщают рукояткой 6. Поворот рукоятки и соответственно заготовки на требуемый угол осуществляется с помощью лимба 5. Для удобства отсчета используют раздвижной сектор 7. На шпинделе 4 закреплен лимб 3 для непосредственного деления заготовки на части.

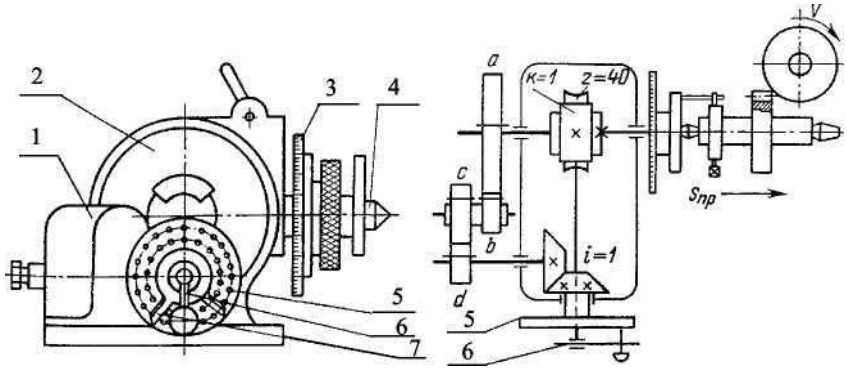



Рис. 17. Универсальная делительная головка

Винтовые канавки фрезеруют при непрерывном вращении шпинделя делительной головки, которое он получает от винта продольной подачи стола универсально-фрезерного станка через сменные зубчатые колеса *a, b, c* и *d.*

Установка и зажим обрабатываемых деталей в делительных головках обычно производятся с помощью центров (при наличии зад-

ней бабки), трехкулачковых патронов, цанг и других центрирующих устройств, монтируемых на шпинделе головки.

Необходимое оборудование, приспособление, инструмент, материалы

Задний центр.

Хомутики.

Оправки.

- Люнет.

Трехкулачковый патрон.

Кондуктор.

Машинные тиски.

Делительные головки.

**Правила техники безопасности**

Выполнять только порученное задание.

Бережно относиться к приборам и оборудованию.

По окончании работы убрать за собой рабочее место.

Порядок выполнения работы

1. Подобрать станочное приспособление для закрепления детали в соответствии с вариантом (табл. 1).

Таблица 1

| Номер варианта | Эскиз детали | Номер варианта | Эскиз детали | Номер варианта | Эскиз детали |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Рис. 16 * | 6 | Рис. 21 * | 11 | Рис. 26 * |
| 2 | Рис. 17 * | 7 | Рис. 22 * | 12 | Рис. 27 * |
| 3 | Рис. 18 * | 8 | Рис. 23 * | 13 | Рис. 28 * |
| 4 | Рис. 19 * | 9 | Рис. 24 * | 14 | Рис. 29 * |
| 5 | Рис. 20 * | 10 | Рис. 25 * | 15 | Рис. 30 * |

* Неуказанные предельные отклонения размеров: H14, h14, ±IT14/2.

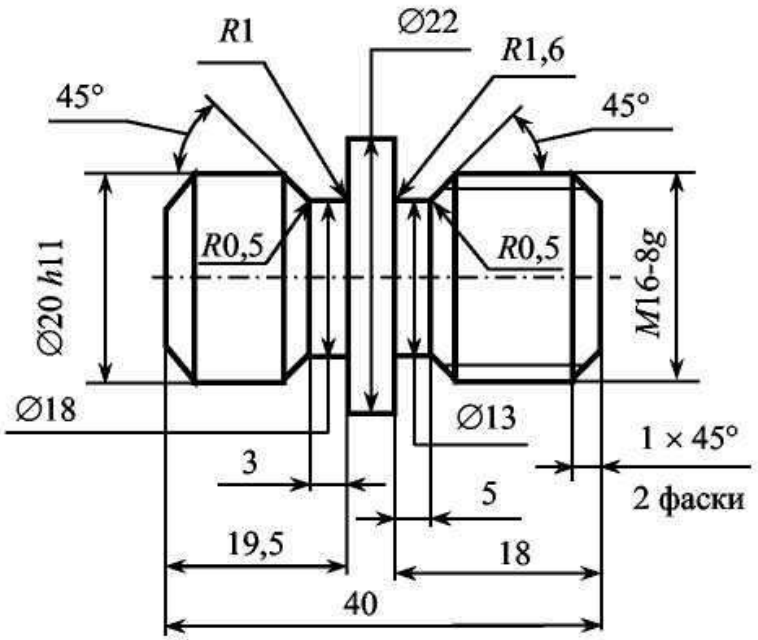
Указать наименование приспособления, охарактеризовать его назначение и область применения.

Вычертить схематический эскиз рабочих элементов приспособления.

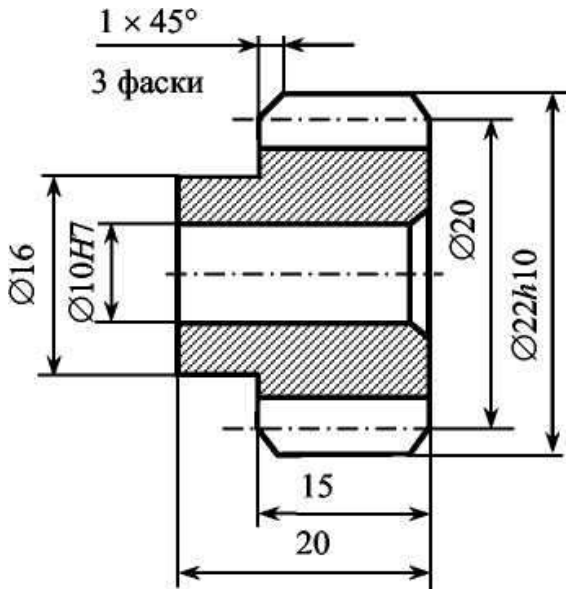
Описать устройство и работу приспособления с указанием применяемого станка, режущего инструмента.

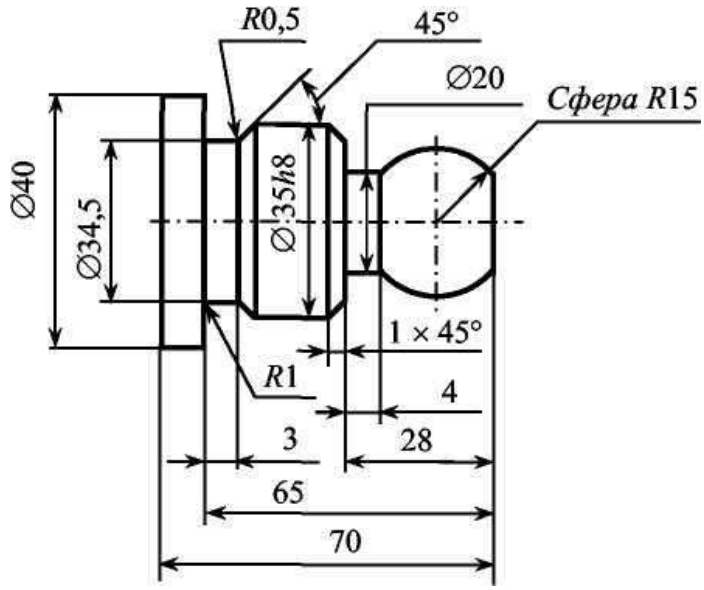
Содержание отчета

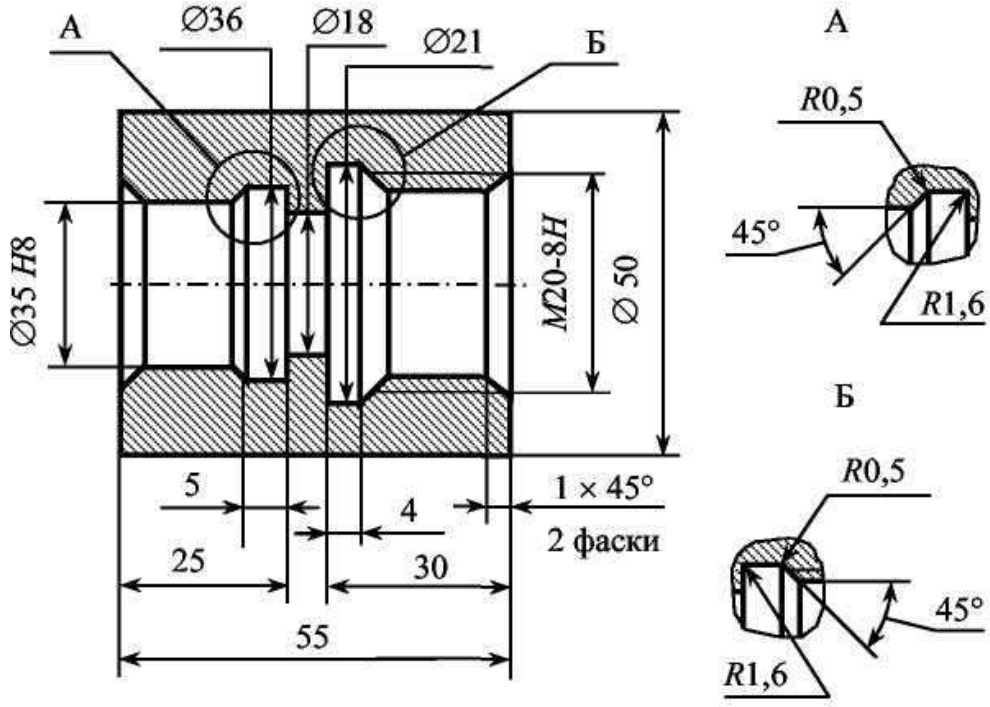
1. Отчет должен быть оформлен на листах формата А4.
2. В отчете должны быть приведены: цель работы, эскиз детали и приспособления, наименование, назначение и область применения приспособления, описание его устройства и работы. и деталей. Комплекты УСП стандартизованы, каждый комплект
3. Эскизы детали и приспособления должны быть выполнены в соответствии с правилами оформления технологического документа - карты эскизов КЭ **[13].**




| | |
|---|---|
| Модуль, мм | 1 |
| Число зубьев | 20 |




R0,5
45°
∅20
Сфера R15
∅40
∅34,5
∅35h8
1 × 45°
R1
4
3
28
65
70


А
∅36
∅18
∅21
Б
∅35 H8
M20-8H
∅ 50
5
4
1 × 45°
2 фаски
25
30
55


А
R0,5
45°
R1,6
Б
R0,5
45°
R1,6

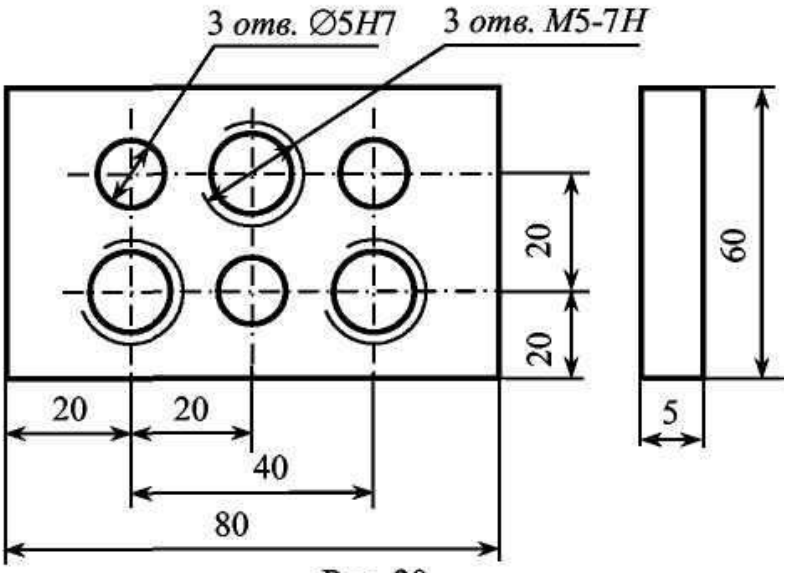
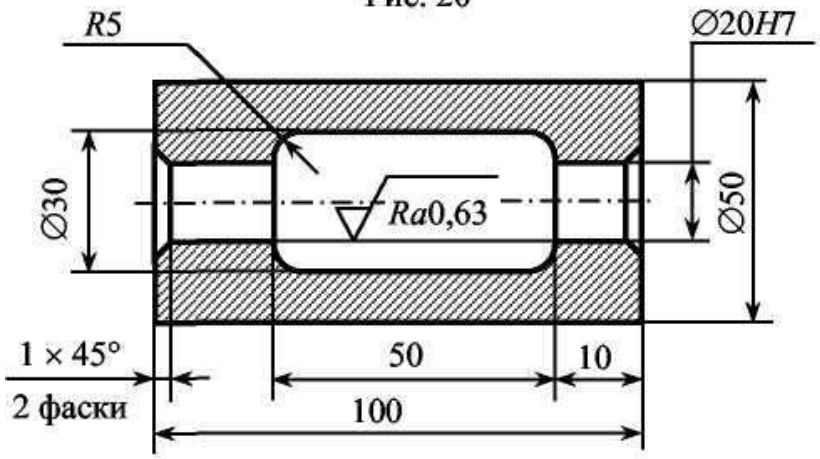
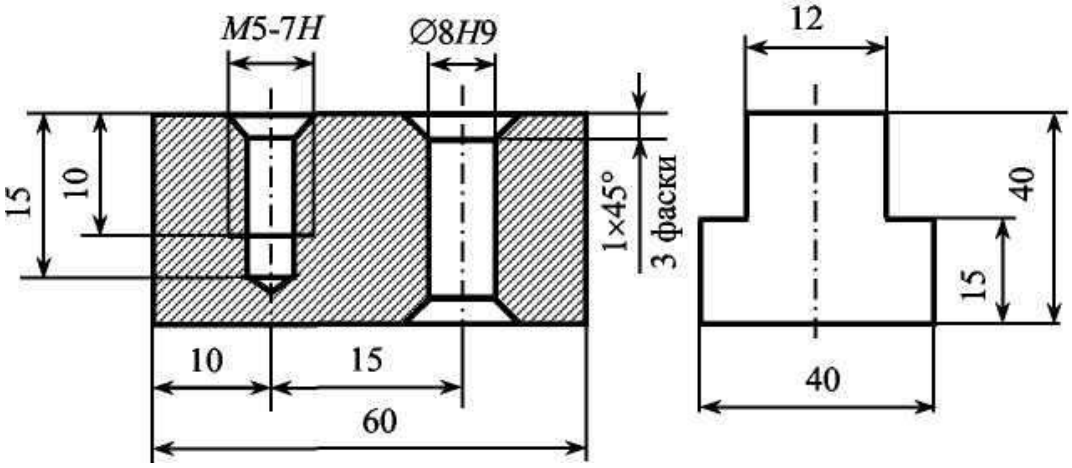
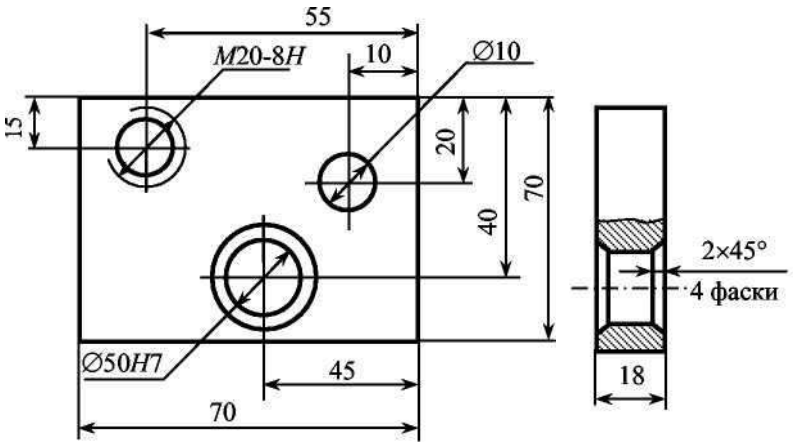
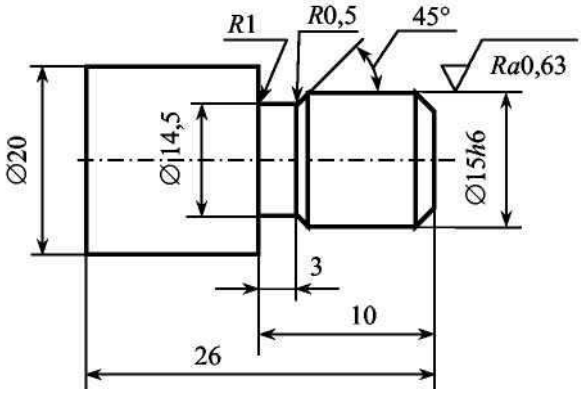

3 отв. ∅5H7
3 отв. M5-7H
20
20
60
20
20
40
80
5

Рис. 20


R5
∅20H7
∅30
Ra0,63
∅50
1 × 45°
2 фаски
50
10
100


M5-7H
∅8H9
12
15
10
1×45°
3 фаски
40
15
10
15
40
60


55
M20-8H
10
∅10
15
20
40
70
2×45°
4 фаски
∅50H7
45
70
18


R1
R0,5
45°
Ra0,63
∅20
∅14,5
∅15h6
3
10
26

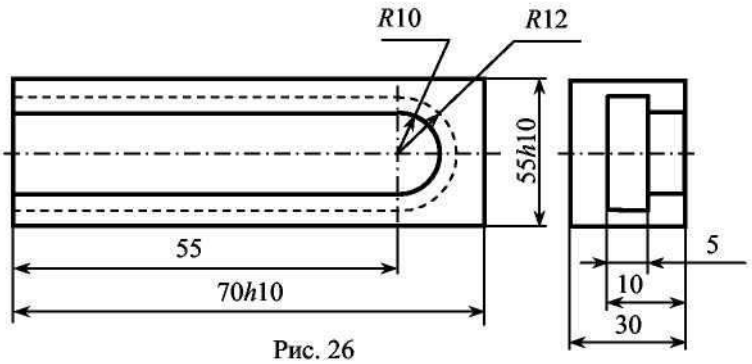

R10
R12
55h10
55
70h10
5
10
30

Рис. 26

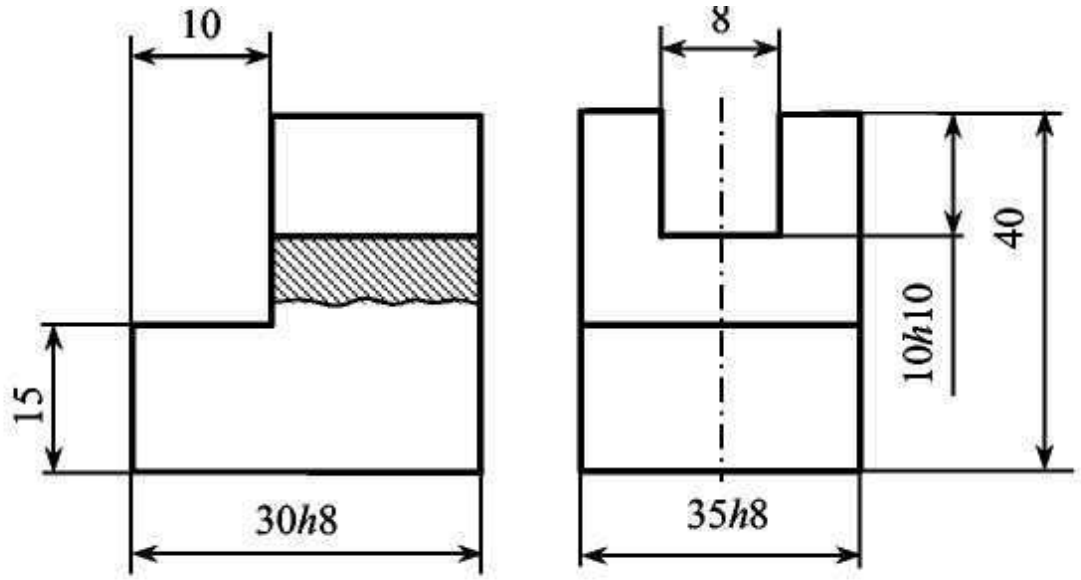

10
8
40
10h10
15
30h8
35h8

Рис. 27

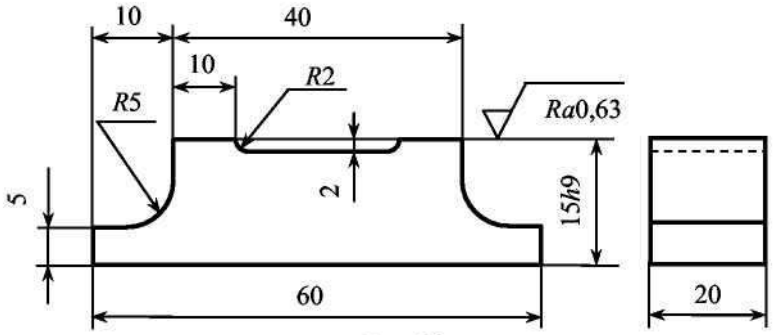
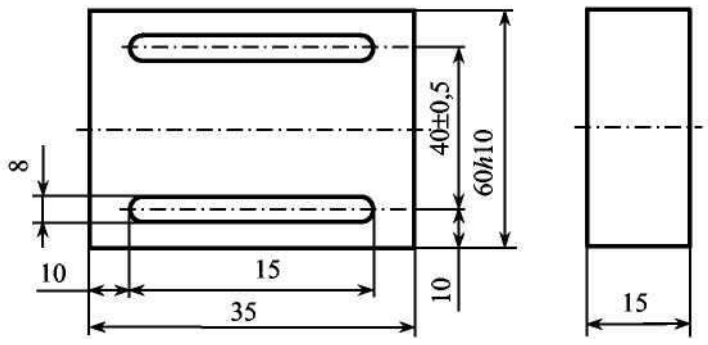
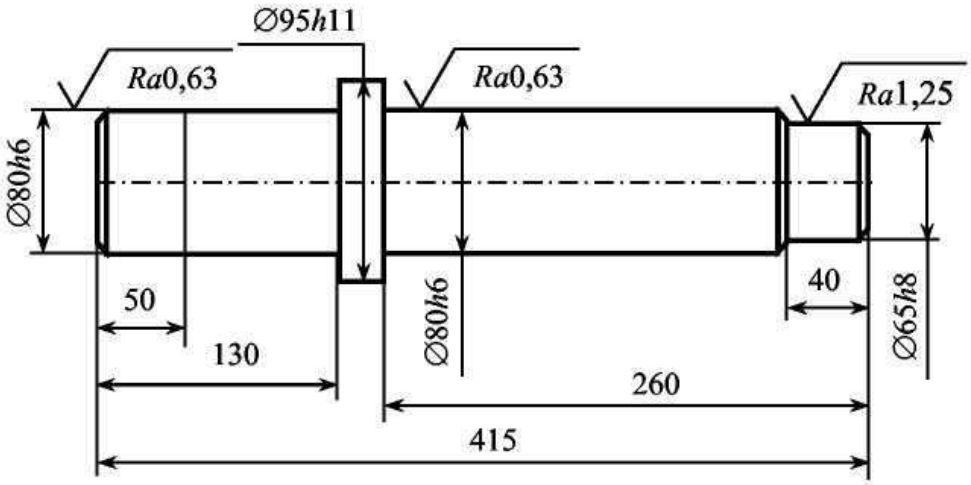
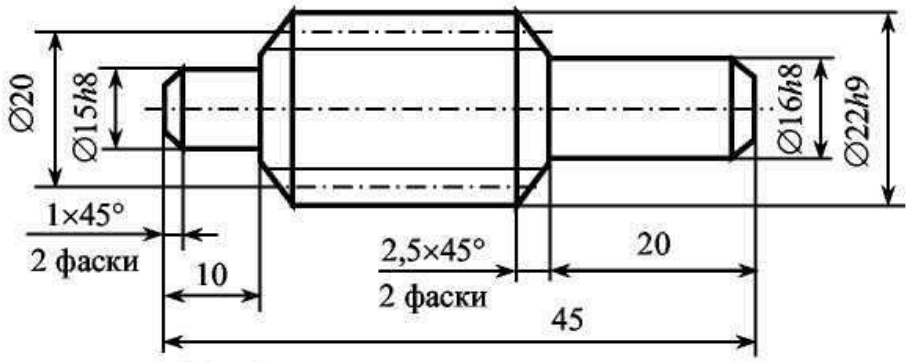

10
40
10
R2
R5
Ra0,63
5
2
15h9
60
20

Рис. 28


40±0,5
60h10
8
10
15
35
10
15




| | |
|---|---|
| Модуль, мм | 1 |
| Число зубьев | 20 |

Рис. 30

## Контрольные вопросы

1. Что называется станочным приспособлением?

2. Каковы преимущества применения приспособлений в технологическом процессе?

3. Какие приспособления используются для токарных и круглошлифовальных станков?

4. Каков принцип действия универсального трехкулачкового спирально-реечного патрона?

5. В чем особенности конструкции скальчатых кондукторов?

6. Какие виды тисков применяются на фрезерных станках?

7. Какие виды приспособлений используются для фрезерных станков?

8. Каково устройство и принцип действия делительной головки?

# РАБОТА № 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕРЖИВАЮЩЕГО УСИЛИЯ ЗАЖИМНОГО УСТРОЙСТВА

**Цель работы**: определение усилия зажима заготовки $P_З$.

**Краткие теоретические сведения**

Основными элементами приспособлений являются установочные, зажимные, направляющие, делительные (поворотные), крепежные детали, корпуса и механизированные приводы.

Их назначение следующее:

*установочных элементов* - определение положения обрабатываемой заготовки относительно приспособления и относительно режущего инструмента;

*зажимных элементов* - закрепление обрабатываемой заготовки;

*направляющих элементов* - осуществление требуемого направления движения инструмента;

*делительных или поворотных элементов* - точное изменение положения обрабатываемой поверхности заготовки относительно режущего инструмента;

*крепежных элементов* - соединение отдельных элементов между собой;

*корпусов приспособлений* (как базовых деталей) - размещение на них всех элементов приспособлений;

*механизированных приводов* - автоматическое закрепление обрабатываемой заготовки.

Установка заготовок в приспособлениях включает в себя их ба-

зирование и закрепление. Для точной обработки заготовок необходимо осуществлять ее правильное расположение в приспособлении по отношению к устройствам оборудования, определяющим траекторию движения инструмента или самой заготовки, обеспечивать постоянство контакта баз с опорными точками. Силы закрепления заготовки должны предотвращать возможный отрыв заготовок от установочных элементов приспособления, сдвиг или поворот ее под действием сил резания и обеспечить надежное закрепление в процессе обработки.

Силы резания и их моменты определяют по формулам теории резания или по данным нормативных справочников. Силы закрепления должны быть достаточными с некоторым коэффициентом запаса, который рассчитывают как произведение коэффициентов, учитывающих условия обработки.

При конструировании станочного приспособления необходимо произвести расчет усилия зажима $P_З$. Полученное значение $P_З$ используется при выполнении расчетов на прочность элементов зажимных устройств и силовых приводов. Величина усилия зажима определяется, исходя из значений сил резания, условий обработки и состояния поверхностей зажимных устройств.

*Определение усилия зажима при точении в зависимости от схемы закрепления деталей в патроне и на оправке*

1. Усилие зажима при обтачивании валика с закреплением в патроне (рис. 31)

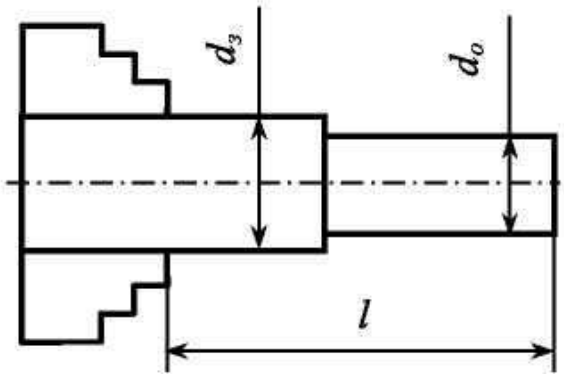



Рис. 31. Схема закрепления заготовки в патроне

При закреплении валика в патроне величина усилия зажима зависит от отношения $l/d_з$ и $dз/d_о$, где l - вылет заготовки - из патрона, $d_з$ - диаметр заготовки, $d_о$ - диметр обработанной поверхности. Чем больше отношение $l/d_з$ и $dз/d_о$, тем больше должно быть усилие зажима.

Составляющие силы резания сводятся к одной результирующей силе $R$, стремящейся сдвинуть заготовку вдоль оси и повернуть вокруг нее:

$$R = k\sqrt{P_z^2\left(\frac{d_з}{d_о}\right)^2 + P_x^2}$$

где $P_x$, $P_z$ - составляющие силы резания вдоль осей $x$, $z$ соответственно; $k$ - коэффициент надежности закрепления, учитывающий влияние составляющей $P_y$, вылета заготовки из патрона, а также непрерывные изменения величины и направления действующих сил, выбирается из табл. 2.

Таблица 2

| $l/d_з$ | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 |
|---|---|---|---|---|
| $k$ | 1,0 | 1,5 | 2,5 | 4,0 |

Усилие зажима на кулачки патрона $P_з$ равно:

где $\mu$ - коэффициент сцепления, зависящий от характера опорной поверхности (для гладких кулачков 0,25; для рифленых -0,3.… 0,5); z - количество кулачков.

2. Усилие зажима при обтачивании закрепленной на цанговой оправке (рис. 32) заготовки

Усилие зажима определяется следующим образом

$$P_з = \frac{k}{\mu}\sqrt{\left(\frac{2M_{рез}}{d_з}\right)^2 + P_x{}^2 tg(\alpha+\varphi)},$$

где $\mu$ - коэффициент сцепления, равный 0,3….. 1; $\kappa$ - коэффициент надежности, равный 1,2… 1,5; $M_{рез}$ - момент резания, равный $P_z$-$r$; $r$ - расстояние от оси до точки приложения силы резания; $a$ - половина угла при вершине конуса цанги; <$p$ - угол трения в цанге

{$tg(p$ = 0,2); $d_з$ - зажимаемый диаметр заготовки.

3. Усилие зажима при обтачивании втулки, закрепленной на жесткой оправке с торцовым зажимом (рис. 33)

$$P_з = \frac{k}{\mu}\sqrt{\left(\frac{2M_{рез}}{d_з}\right)^2}$$

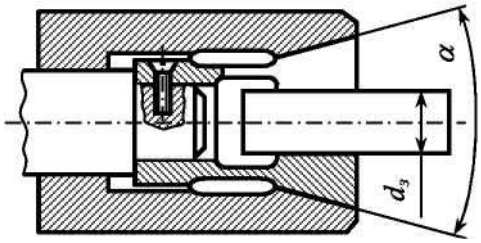



Рис. 32. Схема закрепления заготовки на цанговой оправке

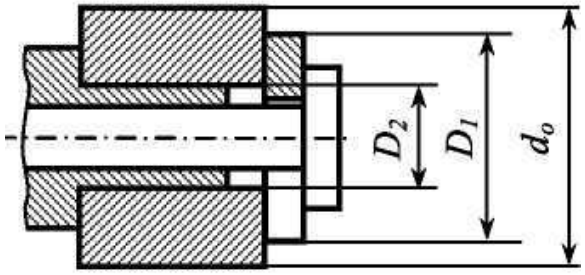



Рис. 33. Схема закрепления на цилиндрической оправке с торцовым зажимом

Усилие зажима определяется следующим образом

$$\frac{kP_z d_o}{(D_1 + D_2)\mu},$$

где $\mu$ - коэффициент сцепления, равный 0,1…0,15; $k$ —коэффициент надежности,равный 1,5… 2,5; $d_o$ - диаметр обрабатываемой поверхности; $D1$ - наружный диаметр торцовой шайбы; $D_2$ - диаметр оправки.

## Необходимое оборудование, приспособления, инструмент, Материалы

1. Токарно-винторезный станок 1616
2. Токарный трехкулачковый самоцентрирующий патрон.
3. Оправка цанговая.
4. Оправка цилиндрическая.
5. Измерительные инструменты: штангенциркуль ШЦ-125 (ГОСТ 166-89), микрометр МК (ГОСТ 6507-90).

## Правила техники безопасности

1. Работать в лаборатории разрешается только после проведения инструктажа.

2. Выполнять только ту работу, которая поручена преподавателем. Не работать на оборудовании и оснастке, не изучив правил техники безопасности.

3. Приступая к выполнению работы, предварительно ознакомиться с устройством токарного станка.

4. По окончании работы навести порядок на рабочем месте.

## Порядок выполнения работы

1. По заданным режимам резания (взятым из табл. 3 в соответствии с вариантом) определить значения составляющих усилия резания $P_z$, $P_x$, $Py$

$$P_{z,y,x} = 10 C_p t^{x_p} S^{y_p} v^{n_p} K_{\mu p},$$

где $C_p$ - коэффициент; $t$ - глубина резания, мм; $S$ - подача, мм/об; v - скорость резания, равнаям/мин; $K_№$ - коэффициент (точение без охлаждения); $n$ -частота вращения шпинделя, об/мин.

, $$v = \frac{\pi d_з n}{1000},$$

При продольном наружном точении заготовки из стали 45 с пределом прочности $\sigma_в$ = 750 МПа проходным резцом с углами γ = 15°, ф = 45°, $\lambda = 0°$

$P_x : P_y : P_z$ =1 : 0,45 : 0,35; $C_p$ =300; $x_p$ =1,0;

Таблица 3

| Номер вари-анта | Схема за-крепления | dз, мм | do,мм | l, мм | S, мм/об | n, об/мин | α, град | D1, мм | D2,мм |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | Рис.9 | 38 | 35 | 25 | 0,07 | 315 | — | — | — |
| 2 | Рис. 10 | 52 | 48 | 32 | 0,14 | 400 | 15 | - | - |
| 3 | Рис.9 | 45 | 40 | 50 | 0,21 | 500 | - | - | - |
| 4 | Рис. 11 | 60 | 58 | 46 | 0,28 | 630 | - | 25 | 50 |
| 5 | Рис.9 | 75 | 70 | 28 | 0,07 | 500 | - | - | - |
| 6 | Рис. 10 | 32 | 30 | 50 | 0,14 | 400 | 10 | - | - |
| 7 | Рис.9 | 50 | 46 | 40 | 0,21 | 315 | - | - | - |
| 8 | Рис. 11 | 80 | 75 | 65 | 0,28 | 400 | - | 32 | 56 |
| 9 | Рис.9 | 65 | 60 | 55 | 0,07 | 500 | - | - | - |
| 10 | Рис. 10 | 48 | 45 | 30 | 0,14 | 630 | 15 | - | - |
| 11 | Рис.9 | 78 | 75 | 65 | 0,21 | 315 | — | — | — |
| 12 | Рис. 11 | 86 | 82 | 42 | 0,28 | 400 | - | 28 | 52 |
| 13 | Рис.9 | 36 | 34 | 46 | 0,07 | 500 | - | - | - |
| 14 | Рис. 10 | 28 | 25 | 52 | 0,07 | 630 | 10 | - | - |
| 15 | Рис.9 | 40 | 36 | 80 | 0,14 | 500 | - | - | - |
| 16 | Рис.9 | 44 | 40 | 36 | 0,21 | 400 | — | — | — |
| 17 | Рис. 10 | 36 | 34 | 46 | 0,28 | 315 | 15 | - | - |
| 18 | Рис.9 | 60 | 55 | 50 | 0,21 | 400 | - | - | - |
| 19 | Рис. 11 | 55 | 54 | 36 | 0,07 | 500 | - | 20 | 40 |
| 20 | Рис.9 | 72 | 68 | 80 | 0,14 | 630 | - | - | - |
| 21 | Рис. 10 | 36 | 32 | 50 | 0,21 | 315 | 10 | — | — |
| 22 | Рис.9 | 46 | 44 | 75 | 0,28 | 400 | - | - | - |
| 23 | Рис. 11 | 86 | 82 | 46 | 0,07 | 500 | - | 32 | 60 |
| 24 | Рис.9 | 54 | 52 | 40 | 0,14 | 630 | - | - | - |
| 25 | Рис. 10 | 38 | 35 | 50 | 0,21 | 500 | 10 | - | - |
| 26 | Рис. 11 | 80 | 76 | 62 | 0,28 | 630 | — | 26 | 52 |
| 27 | Рис.9 | 36 | 34 | 56 | 0,07 | 315 | - | - | - |
| 28 | Рис. 10 | 42 | 40 | 68 | 0,14 | 400 | 15 | - | - |
| 29 | Рис. 11 | 75 | 70 | 60 | 0,21 | 500 | - | 28 | 56 |
| 30 | Рис.9 | 40 | 38 | 65 | 0,28 | 630 | - | - | - |

$y_{P_z}$=0,754; $n_{P_z}$=-0,15; $K_{\mu P_z} = \left(\frac{\sigma_в}{750}\right)^n$, где $n$=0,75.

2. Для заданной схемы закрепления заготовки определить усилие зажима.

Результаты вычислений занести в табл. 4.

| $d_3$, мм | $d_o$, мм | $l$, мм | $v$, м/мин | $S$, мм/об | $t$, мм | $P_z$, Н | $P_x$, Н | $R$, Н | $P_3$, Н |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | |

## Содержание отчета

1. Сведения о зажимных устройствах.

2. Схема закрепления с указанием вылета заготовки, диаметра заготовки и диаметра обработанной поверхности.

3. Расчет усилий резания и результирующего усилия.

4. Определение усилия зажима для заданных режимов обработки.

## Контрольные вопросы

1. Как различаются станочные приспособления по назначению?

2. Какие приспособления используются для токарных станков?

3. Какие элементы входят в состав в зажимного устройства?

**4.** Какие исходные данные необходимо знать для расчета усилия зажима?

**5.** Каковы факторы, влияющие на величину усилия зажима?

# РАБОТА № 4.ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК В ТИСКАХ, ПАТРОНЕ

Цель работы: определение погрешности закрепления заготовки в тисках и трехкулачковом патроне.

## Краткие теоретические сведения

В результате возникновения случайных погрешностей при обработке партии заготовок на настроенном станке истинный размер каждой заготовки является случайной величиной и подчиняется закону распределения случайной величины - закону нормального распределения (Гаусса).

Рассеяние размеров обрабатываемых заготовок вызывается многочисленными случайными факторами различного характера, оказывающими свое воздействие одновременно и независимо друг от друга. В числе таких факторов: вид обработки; погрешность установки заготовки в приспособлении; погрешность настройки станка.

Погрешность установки заготовки складывается из погрешности базирования $\omega_б$, закрепления $\omega_з$ и приспособления $\omega_{пр}$.

Погрешность базирования в ряде случаев связана с несовпадением измерительной и технологической баз или вызвана особенностями формы опорных поверхностей заготовки и установочных элементов приспособления (рис. 35). Погрешность базирования определяется как разность предельных расстояний измерительной базы заготовки относительно установленного на размер инструмента. Выражения для расчета погрешности базирования при различной форме базирующих поверхностей заготовок и установочных элементов

приспособлений приведены в справочной литературе.

Погрешность закрепления возникает при закреплении заготовки в приспособлении, при этом во многих случаях происходит перемещение заготовки (выжимание из приспособления) и появление зазора между базирующей поверхностью заготовки и соответствующей установочной поверхностью приспособления (рис. 36). Изменение перемещения заготовки при ее закреплении в приспособлении в большинстве случаев определяется экспериментальным путем.

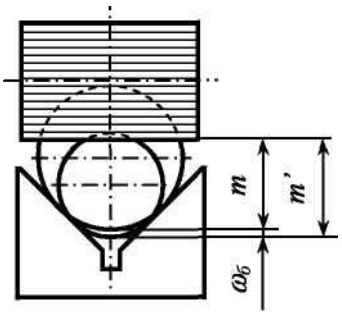



Рис. 35. Возникновение погрешности базирования

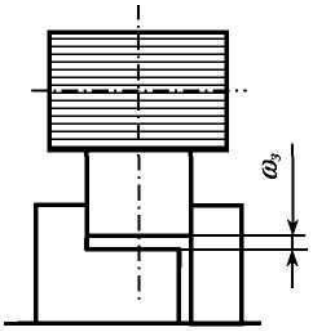



Рис. 36. Погрешность закрепления

Погрешность приспособления зависит от погрешности изготовления и сборки приспособления, его износа и неточности установки на станке.

## Необходимое оборудование, приспособления, инструмент, материалы

1. Тиски станочные, подкладки.
2. Патрон трехкулачковый.
3. Станок вертикально-фрезерный.
4. Станок токарно-винторезный.
5. Образцы деталей.
6. Измерительные инструменты: индикаторная головка со стойкой, штангенциркуль.

## Правила техники безопасности

1. Работать в лаборатории разрешается только после проведения инструктажа. Не работать на оборудовании и оснастке, не изучив правил техники безопасности.

2. Выполнять только ту работу, которая поручена преподавателем.

3. Перед началом работы на металлорежущих станках необходимо: привести в порядок рабочую одежду - застегнуть обшлага рукавов; заправить концы одежды так, чтобы не было развевающихся концов; волосы убрать под головной убор; привести в порядок рабочее место, убрать все лишнее со станка, осмотреть и подготовить для работы режущий, измерительный, крепежный инструмент и приспособления; предварительно ознакомиться с устройством станка по его описанию, после чего проверить ис-

правность станка на холостом ходу.

4. Во время работы на металлорежущих станках необходимо: перед включением станка убедиться, что его пуск никому не угрожает опасностью; применять указанные в операционной карте режимы резания.

5. Во время работы категорически запрещается снимать и открывать ограждения и предохранительные устройства станка.

6. По окончании работы навести порядок на рабочем месте.

## Порядок выполнения работы

1. Установить станочные тиски и индикаторную стойку на столе вертикально-фрезерного станка (рис. 37).

2. Установить заготовку 2 в тиски на подкладку 3 и рукой прижать к неподвижной губке 1 тисков. В этом положении индикатору 5 дать натяг и установить его стрелку на нуль.

3. Многократно закрепить и раскрепить заготовку в тисках, перемещая подвижную губку 4 тисков и фиксируя каждый раз показания индикатора, при этом применять следующие способы установки и закрепления заготовки:

- заготовка свободно кладется на подкладку тисков и зажимается от руки с произвольным усилием зажима;

- заготовка свободно кладется на подкладку тисков, после чего производится легкое предварительное зажатие тисков; затем легким постукиванием молотка по заготовке плотно прижимают ее к подкладке и производят проверку плотности прилегания заготовки путем по-

пытки вынуть прокладку из-под нее; если подкладка плотно прижата

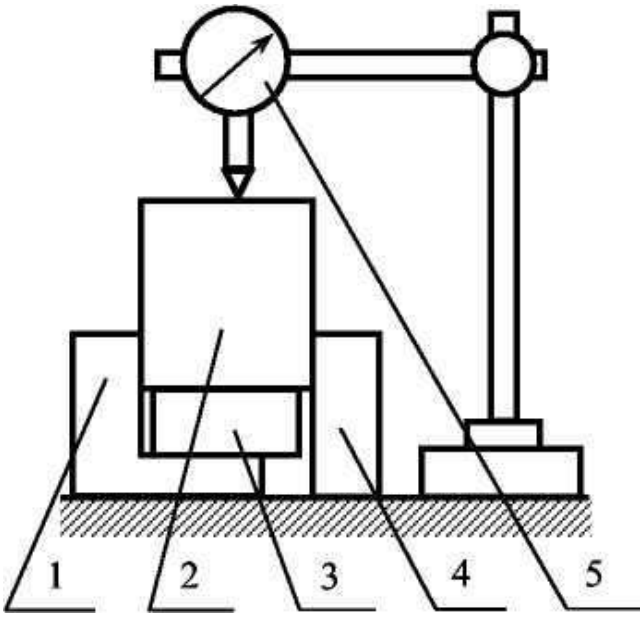



Рис. 37. Схема установки заготовки в тисках

заготовкой, то производится окончательный зажим тисков. Каждый способ установки повторить 25 … 30 раз. Обработать результаты замеров, сгруппировав их в восьми - десяти интервалах и определяя среднее взвешенное арифметическое значение действительных размеров погрешности закрепления, равное $\omega_{з.ср} = 1 \sum \omega_з.im_i$, и $\sigma$- среднее квадратическое отклонение, равное $a = Л—J^{ct)_{3l}}$-,-$(o_{3cp}jm_t$ , где /и, - частота (т.е. количество величин погрешности данного интервала размеров); $n$ - количество всех измерений. Все полученные результаты занести в табл. 6. Построить график осевых смещений для различных способов установки и закрепления заготовки.

4. Установить на шпинделе токарно-винторезного станка трехкулачковый патрон.

Таблица 6

| Способ установки и закрепления заготовки | Интервал,м | Частота тг | Частость m/n | Среднее арифметическое значение ωср, мм | Среднее квадратическое отклонение σ, мм |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |
| | | | | | |

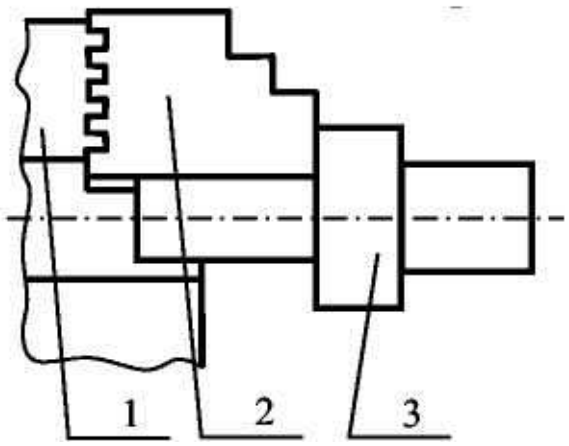



Рис. 38. Схема установки заготовки в трехкулачковом патроне

5. Установить обрабатываемую заготовку 3 в патрон 1 и, не закрепляя ее плотно, прижать буртиком к торцевым поверхностям кулачков 2 (рис. 38). В этом положении подвести суппорт с укрепленным в державке резцедержателя индикатором, измерительный наконечник которого должен касаться торца закрепляемой заготовки по линии центров с натягом 1 …. 2 мм; после чего закрепить суппорт и установить стрелку индикатора на нуль.

6. Многократно закрепляя заготовку (25…30 раз), при каждой ее повторной установке записывать показания индикатора, фиксирующего действительную величину погрешности $\omega_з$.

7. Обработать результаты замеров (см. п. 4), занести полученные

данные в табл. 7. и построить график осевых смещений.

Таблица 7

| Интервал, мм | Частота | Частость m/n | Среднее арифметическое значение $\omega_{ср}$, мм | Среднее квадратическое отклонение σ, мм |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |
| | | | | |

## Содержание отчета

1. Сведения об используемых приспособлениях и измерительных средствах (наименование, цена деления).
2. Эскизы схем установки заготовок с простановкой размеров.
3. Заполненные табл. 6 и 7.
4. Построенные графики осевых смещений.

## Контрольные вопросы

1.Какие факторы влияют на точность обработки партии заготовок?

2. Из каких составляющих складывается погрешность установки заготовки в приспособлении?

3. Чем вызвана погрешность базирования заготовок?

4. Вследствие чего возникает погрешность закрепления заготовок?

5. Чем обусловлено возникновение погрешности приспособления?

# РАБОТА № 5. ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ УНИВЕРСАЛЬНЫХ БЕЗНАЛАДОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Универсальные безналадочные приспособления (УБП) применяются в единичном и серийном типе производства для установки и закрепления обрабатываемой заготовки с различной формой и различными габаритами. К ним относятся универсальные патроны, тиски, поворотные столы и т. д.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Изучить конструкцию 4-х кулачкового патрона (привести схему и дать описание его работы).

1. Изучить конструкцию 3-х кулачкового самоцентрирующего патрона (**привести схему патрона и дать описание его работы**).
2. Изучить конструкции 2-х типов люнетов (подвижного и неподвижного) и **дать их схемы и способ монтажа на станке**.
3. Изучить конструкции поводковых устройств, используемых на токарных и шлифовальных станках (**привести схемы**).
4. Изучить конструкции патронов, используемых для крепления сверл на сверлильных и токарных станках (**привести схемы**).
5. Изучить конструкции машинных тисков (**привести схему работы**).
6. Рассчитать усилие зажима в тисках при сверлении сквозного отверстия заданного диаметра.
7. Рассчитать усилие зажима в тисках при фрезеровании заданной поверхности

В ответах должны быть приведены ***эскизы, поясняющие работу*** универсального безналадочного приспособления.

Таблица 2

**Варианты заданий**

| Вариант | Диаметр детали, мм | Ширина фрезерования и глубина резания, мм | Диаметр отверстия, мм | Материал |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 30 | 10/2 | 10 | Ст 40 |
| 2 | 40 | 10/3 | 20 | Ст 35 |
| 3 | 50 | 15/4 | 10 | Ст 45 |
| 4 | 60 | 15/5 | 10 | Сталь 40ХНМА |
| 5 | 70 | 20/5 | 20 | Сталь 30ХГС, |
| 6 | 80 | 20/10 | 30 | Ст 40 |
| 7 | 90 | 50/1 | 12 | Ст 40Х |
| 8 | 100 | 40/10 | 15 | Ст 40 Х |
| 9 | 90 | 15/1 | 25 | Ст 45Х |
| 10 | 80 | 30/5 | 20 | Ст 45Х |
| 11 | 70 | 40/10 | 5 | Ст 40Х |
| 12 | 60 | 12/1 | 10 | Ст 5 |

## ПРИМЕРЫ СОСТАВЛЕНИЯ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ И ИСХОДНОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗАЖИМНОГО УСИЛИЯ

Величину необходимого зажимного усилия W, как правило, определяют на основе решения задачи статики, рассматривая равновесие детали под действием приложенных к ней сил и моментов. предварительно необходимо составить расчетную схему, т.е. изобразить на схеме установки заготовки все силы, действующие на заготовку: силы и моменты резания, зажимные усилия, реакции опор и силы трения в местах контакта заготовки с установочными элементами и зажимными устройствами. Расчетную схему следует составлять для наиболее неблагоприятного варианта местоположения режущего

инструмента по длине обрабатываемой поверхности, когда для удержания заготовки от перемещения или поворота под действием сил и моментов резания требуется приложить наибольшее зажимное усилие.

Пользуясь расчетной схемой, следует установить направление возможного перемещения или поворота заготовок под действием сил и моментов резания, определить величину проекций всех сил на направление перемещения и составить уравнение сил и моментов.

В случае использования принципа возможных перемещений [1] составить уравнения элементарных работ в направлении перемещения заготовка, т.е. $\Sigma \delta A = 0$.

Так как в производственных условиях всегда возможны отступления от тех условий применительно в которым рассчитывались по нормативам силы и моменты резания, то возможны отклонения величин сил и моментов резания от расчетных. В большинстве случаев будет иметь место увеличение сил и моментов резания их, величин, рассчитанных или взятых из таблиц нормативов по режимам резания. Поэтому возможное увеличение сил и моментов резания следует учесть введением коэффициента надежности закрепления ($K$) путем умножения на него сил и моментов резания, входящих в составленные уравнения статики или динамики.

На основании решения уравнения получают формулы для расчета зажимного усилия $W$, обеспечивающего надежное закрепление заготовки. Сказанное проиллюстрируем примерами.

**Пример 1.**

На операции фрезерования плоскости (рис. 3, *а*) при принятом методе установки и схеме закрепления заготовки под действием сил резания может только поворачиваться относительно точки *О*.

Из условия равновесия заготовки (рис.3, *а*) уравнение моментов будет $$W \cdot a + F \cdot l = P_z \cdot b + P_V \cdot l$$

После подстановки значения $F = f \cdot W$ и введения коэффициента надежности *K* уравнение примет вид

$$W \cdot a + f \cdot W \cdot l = K(P_z \cdot b + P_V \cdot l),$$

откуда

$$W = \frac{K(P_z \cdot b + P_V \cdot l)}{a + f \cdot l},$$

где *f* – коэффициент трения между заготовкой и зажимными устройствами. Обозначения остальных величин даны на рис. 3, *а*.

Используя принципы возможных перемещений, исходное уравнение для нахождения зажимной силы *W* (по примеру 1) будет иметь вид:

$$Mp_z \cdot \delta\varphi + Mp_V \cdot \delta\varphi + M_W \cdot \delta\varphi + M_F \cdot \delta\varphi = 0,$$

или $$Mp_Z + Mp_V + M_W + M_F = 0.$$

Раскрывая значение моментов (взятых относительно т. *О*) и силы трения и вводя коэффициент надежности *K*, уравнение примет вид

$$W \cdot a + W \cdot l \cdot f = K(P_Z \cdot b + P_V \cdot l).$$

откуда

$$W = \frac{K(P_Z \cdot b + P_V \cdot l)}{a + f \cdot l},$$

т.е. получили то же самое значение.

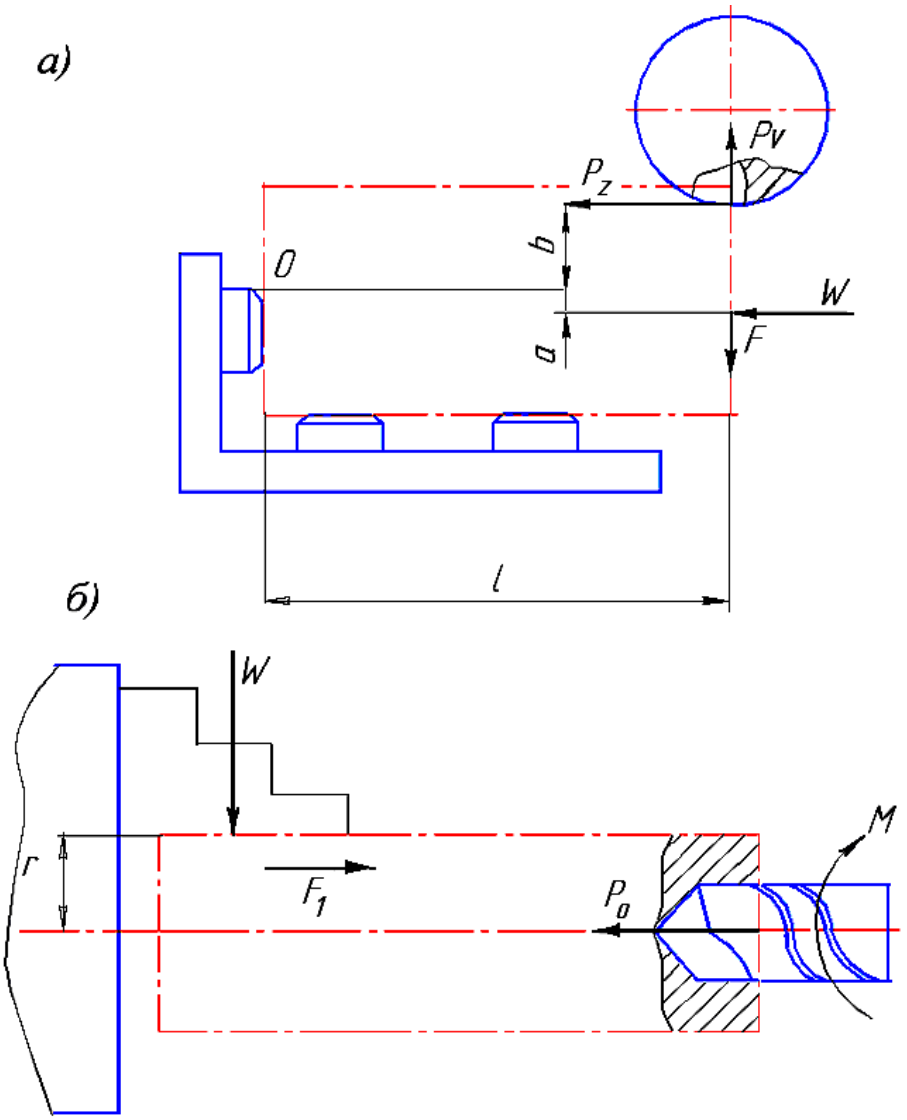



Рис. 3. Расчетные схемы

**Пример 2.**

При сверлении отверстия в заготовке, закрепленной в трехкулачковом патроне (рис. 3, *б*), она может перемещаться вдоль кулачков

под действием силы резания $\boldsymbol{P_0}$ (усилие подачи) и провертываться в кулачках под действием момента резания $\boldsymbol{M}$.

Необходимо приложить такое зажимное усилие, чтобы не было ни перемещения, ни провертывания детали относительно кулачков. В зависимости от формы насечки на кулачках, сопротивление перемещению и провертыванию может быть различным, так как при этом могут быть различными коэффициенты трения.

Допустим, что при перемещении заготовки в кулачках вдоль её оси коэффициент трения будет $f_1$, а при провертывании $f_2$. Тогда силы трения между кулачком и заготовкой будут составлять

при перемещении $F_1 = f_1 \cdot W$,

при провертывании $F_2 = f_2 \cdot W$.

Определим величину зажимного усилия при условии недопустимости перемещения заготовок в кулачках. Пользуясь принятыми обозначениями (рис. 3, *б*) и имея в виду, что у патрона три кулачка, составим уравнение сил: $3F_1 = P_0$.

После подстановки значения $F_1$ и введения коэффициента $K$ уравнение примет вид $3f_1W = KP_0$

откуда

$$W = \frac{K \cdot P_0}{3 \cdot f_1} \text{ (на один кулачок).}$$

Теперь определим величину зажимного усилия при условии недопустимости провертывания заготовки в кулачках.

Так как заготовка зажата в трех кулачках, уравнение моментов будет иметь следующий вид: $3F_2 \cdot r = M$,

где $M$ – момент сил резания;

$F_2$ – сила трения между кулачком и деталью при провертывании последней;

$r$ – радиус наружной цилиндрической поверхности детали на участке закрепления её в кулачках.

После подстановки значения $F_2$ и введения коэффициента $\boldsymbol{K}$ уравнение примет вид

$$3F_2 \cdot r = 3 f_2 \cdot W \cdot r = K \cdot M ,$$

откуда

$$W = \frac{KM}{3 f_2 \cdot r} \text{ (на 1 кулачок).}$$

После подстановки численных данных в конечные формулы по примеру 2 получим два значения величины зажимного усилия $\boldsymbol{W}$. В качестве расчетного следует брать максимальное значение.

В примере 2 принцип возможных перемещений дает исходные уравнения из условия перемещения заготовки:

$$F_1 \cdot \delta S + P_0 \cdot \delta S = 0 \text{ или } F_1 + P_0 = 0,$$

при провертывании заготовки

$$M_{F2} \cdot \delta\varphi + M\delta\varphi = 0 \text{ или } M_{F2} + M = 0.$$

Раскрывая значение сил и моментов трения и вводя коэффициент надежности $K$, получим:

$$W \cdot f_1 = K \cdot P_0 \text{, откуда } W = \frac{KP_0}{f_1} \text{ (на 3 кулачка),}$$

$$W \cdot f_2 = K \cdot M \text{ , откуда } W = \frac{KM}{f_2 r} \text{ (на 3 кулачка)}$$

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА НАДЕЖНОСТИ ЗАКРЕПЛЕНИЯ "*К*" И ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ

Таблица 3

**Значения коэффициента трения**

| Характеристика контактируемых поверхностей | Значение $f$ |
|---|---|
| **А. Контактируемая пара деталь – установочный элемент.** Обработанная поверхность заготовки контактирует с плоскостью опорных пластин, с плоскостью магнитной плиты и т.п. | 0,10 – 0,15 |
| Обработанная поверхность детали контактирует с установочным элементом по линии (установка на призму) или сфере (установка на опорный штырь со сферической головкой) | 0,18 – 0,3 |
| Необработанная поверхность детали контактирует с закаленным насеченным элементом (установка на опорные штыри с насеченной головкой) | 0,5 – 0,8 |
| **Б. Контактируемая пара зажимной элемент-деталь.** Контактный элемент с плоской контактной поверхностью при закреплении соприкасается с плоской обработанной поверхностью детали | 0,1 – 0,15 |
| Контактный элемент при закреплении соприкасается с цилиндрической поверхностью детали (при установке в кулачках, в цанге и т.п.): | |
| при гладкой поверхности контактного элемента | 0,25 |
| поверхность контактного элемента имеет кольцевые канавки | 0,35 |
| поверхность контактного элемента имеет крестообразные канавки | 0,45 |
| Контактный элемент, имевший кольцевые канавки соприкасается с необработанной поверхностью детали | 0,4 – 0,5 |
| Контактный элемент, имеющий насечку на контактной поверхности, соприкасается с необработанной поверхностью детали | 0,5 – 0,8 |

Значение коэффициента надежности закрепления ***К***, введенного в уравнения, следует выбирать дифференцированно в зависимости от конкретных условий выполнения операции и способа закрепления заготовка. Величину коэффициента ***К*** можно представить как произведение первичных коэффициентов, каждый из которых отражает влияние определенного фактора **[2].** Следовательно,

$$K = K_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \ .$$

Коэффициент $K_0$, представляющий собой гарантированный коэффициент запаса надежности закрепления, для всех случаев следует брать равным 1,5.

Таблица 4

**Значения коэффициента $K_2$**

| Способы обработки | Компонент сил резания | Значение | Обрабатываемый материал |
|---|---|---|---|
| Сверление | Крутящий момент<br>Осевая сила | 1,15<br>1,10 | Чугун |
| Предварительное зенкерование | Крутящий момент<br>Осевая сила | 1,3<br>1,2 | Чугун при износе по заданной поверхности 1,5мм |
| Предварительное точение | Тангенциальная сила<br>Радиальная сила<br><br>Сила подачи | 1,0<br>1,4<br>1,2<br>1,6<br>1,25 | Сталь и чугун<br>Сталь<br>Чугун<br>Сталь<br>Чугун |
| Цилиндрическое предварительное и чистовое фрезерование | Окружная сила | 1,75 –1,90<br><br>1,2 – 1,4 | Вязкие стали<br><br>Твердые стали и чугуны |
| Торцевое предварительное и чистовое фрезерование | Окружная сила | 1,75 –1,90<br><br>1,2 – 1,4 | Вязкие стали<br><br>Твердые стали и чугуны |

Коэффициент $K_1$, учитывает увеличение силы резания из-за случайных неровностей на заготовках. Для черновой обработки $K_1$ = 1,2, для чистовой $K_1$ = 1,0.

Коэффициент $K_2$ учитывает увеличение силы резания вследствие затупления инструмента. Значения $K_2$ приведены в табл. 4, а значение остальных коэффициентов в табл. 5.

Приведенные значения коэффициентов $K_0 – K_6$ позволяют определить величину $K$ для проектируемого приспособления с учетом

конкретных условий выполнения операций.

Таблица 5

**Значения коэффициентов $K_3$, $K_4$, $K_5$ и $K_6$**

| Обозначение коэффициента | Фактор, учитываемый введением коэффициента | Значение коэффициента | |
|---|---|---|---|
| $K_3$ | Увеличение силы резания при прерывистом резании | 1,2 | - при точении |
| $K_4$ | Непостоянство зажимного усилия | 1,3<br><br>1,0 | - для ручных зажимных устройств;<br>- для пневматических и гидравлических устройств |
| $K_5$ | Степень удобства расположения рукояток в ручных зажимных устройствах | 1,0<br><br>1,2 | - при удобном расположении и малой длине рукоятки;<br>- при диапазоне угла отклонений рукоятки 90° |
| $K_6$ | Неопределенность из–за неисправностей места контакта детали с установочными элементами, имеющими большую установочную поверхность | 1,0 | - для установочного элемента, имеющего ограниченную поверхность контакта с деталью |
| | Учитывая только при наличии момента, стремящегося повернуть деталь | 1,5 | - для установочного элемента |

## Сверление [3]

При сверлении глубина резания $t$ – 0,5$D$.

**Подача.** При сверлении отверстий без ограничивающих факторов выбираем максимально допустимую по прочности сверла подачу (табл. 2.6).

**Скорость резания**. Скорость резания, м/мин, при сверлении

$$V = \frac{C_v D^q}{T^m S^y} K_v .$$

Значения коэффициентов $C_v$ и показателей степени приведены для сверления в (табл. 6), а значения периода стойкости $T$ – (в табл. 2.30).

Общий поправочный коэффициент на скорость резания, учитывающий фактические условия резания,

$$K_v = K_{мv} K_{иv} K_{lv}.$$

где $K_{MV}$ – коэффициент, учитывающий качество обрабатываемого материала (см. табл. 1.7); $K_{ПV}$ – коэффициент, учитывающий состояние поверхности заготовки (см. табл.1.9); $K_{ИV}$ – коэффициент, учитывающий материал инструмента (см. табл.1.8).

**Крутящий момент**, Н·м, и осевую силу, Н, рассчитывают по формулам:

При сверлении:

$$M_{кр} = 10 C_м D^q S^y K_р; \quad P_о = 10 C_р D^q S^y K_р.$$

Значения коэффициентов $C_м$ и $C_р$, и показателей степени приведены в (табл. 7).

Таблица 6

**Значения коэффициента $C_v$ и показателей степени в формуле скорости резания при сверлении**

| Обрабатываемый материал: | Материал режущей части инструмента | Подача $S$, мм/об | Коэффициент и показатели степени | | | | Охлаждение |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $C_v$ | $q$ | $y$ | $m$ | |
| Сталь конструкционная углеродистая, $\sigma_в$ = 750 МПа | Р6М5 | ≤0,2<br>>0,2 | 7,0<br>9,8 | 0,40 | 0,70<br>0,50 | 0,20 | Есть |
| Сталь жаропрочная 12Х18Н9Т, *НВ* 141 | | – | 3,5 | 0,50 | 0,45 | 0,12 | |
| Чугун серый, *НВ* 190 | | ≤0,3<br>>0,3 | 14,7<br>17,1 | 0,25 | 0,55<br>0,40 | 0,12<br>5 | Нет |
| | ВК8 | – | 34,2 | 0,45 | 0,30 | 0,20 | |

**Примечание:** Для сверл из быстрорежущей стали рассчитанные по приведенным данным скорости резания действительны при двойной заточке и подточенной перемычке, При одинарной заточке сверл из быстрорежущей стали рассчитанную скорость резания следует уменьшать, умножая ее на коэффициент $K_{3v} = 0{,}75$.

Таблица 7

**Значения коэффициентов и показателей степени в формулах крутящего момента и осевой силы при сверлении**

| Обрабатываемый материал | Материал режущей части инструмента | Коэффициент и показатели степени в формулах | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Крутящего момента | | | | Осевой силы | | | |
| | | $C_M$ | $q$ | $x$ | $y$ | $C_p$ | $q$ | $x$ | $y$ |
| Конструкционная углеродистая сталь $\sigma_в = 750$ МПа | Быстрорежущая сталь | 0,034 | 2,0 | – | 0,8 | 68 | 1,0 | – | 0,7 |
| Серый чугун *НВ* 190 | Твёрдый сплав | 0,012 | 2,2 | – | 0,8 | 42 | 1,2 | – | 0,75 |
| | Быстрорежущая сталь | 0,021 | 2,0 | – | 0,8 | 42,7 | 1,0 | – | 0,8 |
| Ковкий чугун *НВ*150 | Быстрорежущая сталь | 0,021 | 2,0 | – | 0,8 | 43,3 | 1,0 | – | 0,8 |
| | Твёрдый сплав | 0,01 | 2,2 | – | 0,8 | 32,8 | 1,2 | – | 0,75 |

**Примечание:** Рассчитанные по формуле осевые силы при сверлении действительны для свёрл с подточенной перемычкой; с неподточенной перемычкой осевая сила при сверлении возрастает в 1,33 раза.

Коэффициент, учитывающий фактические условия обработки, в данном случае зависит только от материала обрабатываемой заготовки и определяется выражением

$$K_p = K_{мр}$$

Значения коэффициента $K_{мр}$ приведены для стали и чугуна в (табл. 8).

Таблица 8

**Поправочный коэффициент $K_{мр}$ для стали и чугуна, учитывающий влияние качества обрабатываемого материала на силовые зависимости**

| Обрабатываемый материал | Расчетная формула | Показатель степени ***n*** при определении | | |
|---|---|---|---|---|
| | | составляющей $P_z$ силы резания при обработке резцами | крутящего момента $M$ и осевой силы $P_o$ при сверлении, рассверливании и зенкеровании | Окружной силы резания $Pz$ при фрезеровании |
| Конструкционная углеродистая и легированная сталь $\sigma_в$ МПа:<br>≤600<br>>600 | $K_{мр} = \left(\frac{\sigma_в}{750}\right)^n$ | 0,75/0,35<br>0,75 | 0,75/0,75<br>0,75/0,75 | 0,3/0,3<br>0,3/0,3 |
| Серый чугун | $K_{мр} = \left(\frac{HB}{190}\right)^n$ | 0,4/0,55 | 0,6/0,6 | 1,0/0,55 |
| Ковкий чугун | $K_{мр} = \left(\frac{HB}{150}\right)^n$ | 0,4/0,55 | 0,6/0,6 | 1,0/0,55 |

**Примечание:** В числителе приведены значения показателя степени ***n*** для твердого сплава, в знаменателе для быстрорежущей стали.

## Фрезерование[3]

**Глубина фрезерования *t* и ширина фрезерования *B*** – понятия, связанные с размерами слоя заготовки, срезаемого при фрезеровании.

Во всех видах фрезерования, за исключением торцового, *t* определяет продолжительность контакта зуба фрезы с заготовкой; *t* измеряют в направлении, перпендикулярном к оси фрезы. Ширина фрезерования *B* определяет длину лезвия зуба фрезы, участвующую в реза-

нии; $B$ измеряют в направлении, параллельном оси фрезы.

**Подача.** При фрезеровании различают подачу на один зуб $S_z$, подачу на один оборот фрезы $S$ и подачу минутную $S_м$, мм/мин, которые находятся в следующем соотношении:

$$S_м = S\, n\ = s_z\, z\, n,$$

где $n$ – частота вращения фрезы, об/мин; $z$ – число зубьев фрезы.

Исходной величиной подачи при черновом фрезеровании является величина ее на один зуб $S_Z$. Рекомендуемые подачи для различных фрез и условий резания приведены в табл.,2.28.

**Скорость резания** – окружная скорость фрезы, м/мин,

$$v = \frac{C_v D^q}{T^m t^x S_z^y B^u z^p} K_v .$$

Значения коэффициента $C_v$ и показателей степени приведены в (табл. П2.2.3), а периода стойкости $T$ – в (табл. 2.30).

Общий поправочный коэффициент на скорость резания, учитывающий фактические условия резания:

$$K_v = K_{мv} K_{пv} K_{иv},$$

где $K_{мv}$ – коэффициент, учитывающий качество обрабатываемого материала (см. табл. 1.7); $K_{пv}$ – коэффициент, учитывающий состояние поверхности заготовки (см. табл. 1.9); $K_{иv}$ – коэффициент, учитывающий материал инструмента (см. табл. 1.8).

Таблица 8

**Поправочный коэффициент $K_{мр}$ для стали и чугуна, учитывающий влияние качества обрабатываемого материала на силовые зависимости**

| **Обрабатываемый материал** | Расчетная формула | Показатель степени $n$ при определении | | |
|---|---|---|---|---|
| | | составляющей $P_z$ силы резания при обработке резцами | крутящего момента $M$ и осевой силы $P_o$ при сверлении, рассверливании и зенкеровании | Окружной силы резания $P_z$ при фрезеровании |
| Конструкционная углеродистая и легированная сталь<br>$\sigma_в$ МПа:<br>≤600<br>>600 | $K_{мр} = \left(\frac{\sigma_в}{750}\right)^n$ | <br><br>0,75/0,35<br>0,75 | <br><br>0,75/0,75<br>0,75/0,75 | <br><br>0,3/0,3<br>0,3/0,3 |
| Серый чугун | $K_{мр} = \left(\frac{HB}{190}\right)^n$ | 0,4/0,55 | 0,6/0,6 | 1,0/0,55 |
| Ковкий чугун | $K_{мр} = \left(\frac{HB}{150}\right)^n$ | 0,4/0,55 | 0,6/0,6 | 1,0/0,55 |

**Примечание:** В числителе приведены значения показателя степени $n$ для твердого сплава, в знаменателе для быстрорежущей стали.

**Сила резания.** Главная составляющая силы резания при фрезеровании – окружная сила, Н

$$P_z = \frac{10 C_p t^x S_z^y B_z^u}{D^q n^w} K_{мр},$$

где $z$ – число зубьев фрезы; $n$ – частота вращения фрезы, об/мин.

Значения коэффициента $C_p$ и показателей степени приведены в (табл. 9), поправочный коэффициент на качество обрабатываемого материала $K_{мр}$ для стали и чугуна – в (табл. 8). Величины остальных составляющих силы резания: горизонтальной (сила подачи) $P_h$, вертикальной $P_v$, радиальной $P_y$, осевой $P_x$ устанавливают из соотноше-

ния с главной составляющей $P_z$ .

Таблица 9

**Значения коэффициента $C_P$ и показателей степени в формуле окружной силы $P_Z$ при фрезеровании**

| Фрезы | Материал режущей части инструмента | Коэффициент и показатели степени | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $C_P$ | $x$ | $y$ | $u$ | $q$ | $w$ |
| *Обработка конструкционной углеродистой стали, $\sigma_в$ = 750 МПа* | | | | | | | |
| Торцовые | Твердый сплав<br>Быстрорежущая сталь | 825<br>82,5 | 1,0<br>0,95 | 0,75<br>0,8 | 1,1<br>1,1 | 1,3<br>1,1 | 0,2<br>0 |
| Цилиндрические | Твердый сплав<br>Быстрорежущая сталь | 101<br>68,2 | 0,88<br>0,86 | 0,75<br>0,72 | 1,0<br>1.0 | 0,87<br>0,86 | 0<br>0 |
| Дисковые, прорезные и отрезные | Твердый сплав<br>Быстрорежущая сталь | 261<br>68,2 | 0,9<br>0,86 | 0,8<br>0,72 | 1,1<br>1,0 | 1,1<br>0,86 | 0,1<br>0 |
| Концевые | Твердый сплав<br>Быстрорежущая сталь | 12,5<br>68,2 | 0,85<br>0,86 | 0,75<br>0,72 | 1,0<br>1,0 | 0,73<br>0,86 | –0,13<br>0 |

**Примечание**: Окружная сила $P_z$, рассчитанная по табличным данным, соответствует работе фрезой без затупления. При затуплении фрезы до допускаемой величины износа сила возрастает: при обработке мягкой стали ($\sigma_в$ < 600 МПа) в 1,75 – 1,9 раза; во всех остальных случаях – в 1,2 – 1,4 раза.

*(Форма отчета для лабораторных работ № 2)*

Студент _____ Группа _____

***Отчет по лабораторной работе №2.***

***Изучение конструкций универсальных безналадочных приспособлений***

*Схемы приспособлений (эскизы) и описание работы*

*Режим резания (расчет)*

*Расчет усилия зажима в тисках при сверлении сквозного отверстия заданного диаметра d =*

## ЛИТЕРАТУРА


1. *Тарг С. М.* Краткий курс теоретической механики: Для вузов. – 4 – изд. – М.: Наука, 1966. – 478 с.
2. *Корсаков В. С.* Основы конструирования приспособлений. – 2 – е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1965. – 367 с.
3. *Глинникова Т. П., Волегов С. А.* Пособие по выполнению самостоятельных работ по дисциплине «ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ» ИЗУЧЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И ВЫБОР РЕЖИМА РЕЗАНИЯ

(Часть 1) для студентов профилизации «Горные машины и оборудование» направления 150400 – «Технологические машины и оборудование» для студентов очного и заочного обучения Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2006. 112 с.

4. *Справочник технолога-машиностроителя: В 2-х т. Т. 1* /Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Суслова. М.:Машиностроение-1, 2001. -912 с.
5. *Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2* / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Суслова. - М.:Машиностроение-1, 2001. - 944 с.

# РАБОТА № 6. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ 3-Х КУЛАЧКОВОГО ПАТРОНА ПО ТОЧНОСТИ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЭТАЛОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

## ХОД РАБОТЫ

1. Установить кулачки патрона ключом на размер, превышающий посадочный диаметр эталонной детали на 0,5 … 1 мм.
2. Установить эталонную деталь в кулачки и подвести наконечник индикатора **к торцу** буртика (обеспечив **натяг 1 – 2** мм).
3. Прижать пальцем буртик эталонной детали к кулачкам и зафиксировать показания индикатора.
4. Закрепить ключом эталонную деталь в патроне и зафиксировать показание индикатора.
5. Подвести наконечник индикатора к цилиндрической части буртика (обеспечив **натяг 1 – 2** мм).
6. Повернуть деталь с патроном на угол > 360° и зафиксировать **торцовое биение буртика** детали по индикатору (абсолютная величина смещения стрелки индикатора).
7. Установить кулачки патрона ключом на размер, превышающий посадочный диаметр эталонной детали на 0,5 … 1 мм.
8. Повернуть деталь в кулачках на любой угол.
9. Повторить выполнение пунктов с 3 по 7-й ***25 раз(!)***.
10. Результаты занести в таблицу.

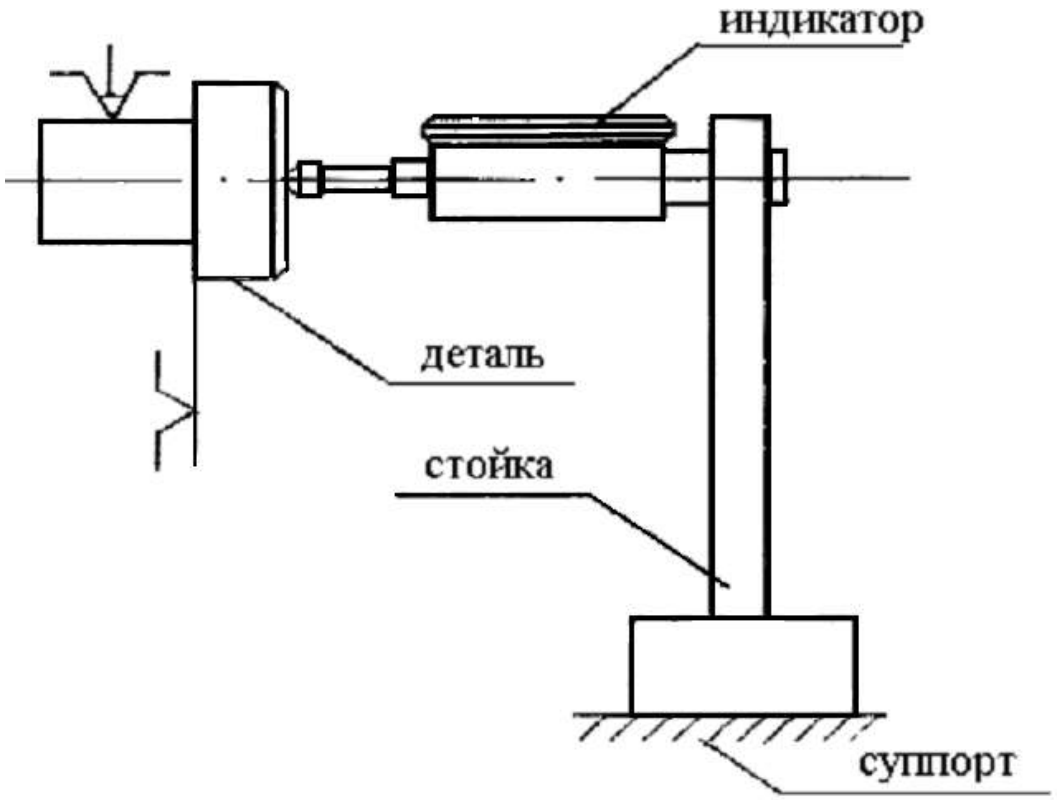



Рис. 6.Схема эксперимента

11. Провести обработку результатов:

а) определить $\overline{\Delta} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta_i}{n}$,

б) определить $S_\Delta = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{n} (\Delta_i - \overline{\Delta})^2}{n-1}}$,

где $\overline{\Delta}$ – средняя ошибка закрепления (погрешность);

$\Delta$ – ошибки закрепления;

$n$ – число повторений опыта;

$S_\Delta$ – ***стандарт ошибки.***

12. Повторить эксперименты по пп. 1…9 на 3-х станках.

13. Провести анализ точности закрепления деталей в 3-х патронах

по $\overline{\Delta}, S_{\Delta}$ и сделать выводы.

14. Провести сравнение величины радиального биения заготовки по $\Delta r$ для 3-х станков и сделать выводы.

**Биения** в машинах и механизмах – отклонение от правильного взаимного расположения поверхностей во вращающихся (колеблющихся) цилиндрических деталях машин и механизмов. Радиальное Б. – разность наибольшего $A_{макс}$ и наименьшего $A_{мин}$ расстояний от точек реальной поверхности цилиндрической детали до базовой оси вращения в сечении, перпендикулярном к этой оси (рис. 7); радиальное Б. – результат смещения центра (эксцентриситета) рассматриваемого сечения относительно оси вращения.

Торцовое Б. – разность наибольшего и наименьшего расстояний от точек реальной торцовой поверхности, расположенных на окружности заданного диаметра ($D$), до плоскости, перпендикулярной к базовой оси вращения (рис. 8); торцовое Б. – результат неперпендикулярности торцовой поверхности к базовой оси и отклонений формы торца по линии измерения.

Б. – вредное явление в машинах и механизмах; они приводят к повышенному износу и выходу из строя деталей машин.




Рис. 7. Схема радиального биения.

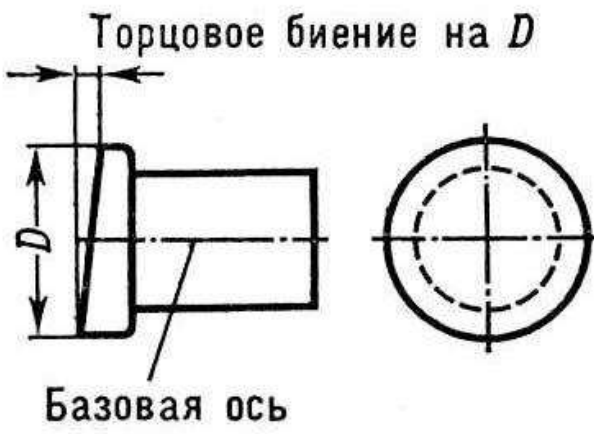



Рис. 8. Схема торцового биения.

*(Форма отчета для лабораторной работы № 3)*

*Студент* _____ *Группа* _____

***Отчет по лабораторной работе № 3.***

***Сравнительный анализ 3-хкулачковых патронов***

*Схема эксперимента*

*Таблица*

***Результаты замеров. Станок №***

| *№ опыта* | *Показание индикатора* | | *Ошибка закрепления* | *Торцовое биение детали при повороте* |
|---|---|---|---|---|
| | *до закрепления* | *после закрепления* | | |
| | $a_i$ | $a_{i+1}$ | $\Delta i = a_{i+1} - a_i$ | $\Delta r$ |
| ***1*** | | | | |
| ***2*** | | | | |
| ***3*** | | | | |
| ***…*** | | | | |
| ***…*** | | | | |
| ***25*** | | | | |

***Обработка результатов***

***ВЫВОДЫ:***

# РАБОТА № 7. ИЗУЧЕНИЕ ДЕЛИТЕЛЬНОЙ ГОЛОВКИ И РАСЧЕТ ГИТАРЫ СМЕННЫХ ШЕСТЕРЕН ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДЕЛЕНИЯ И ФРЕЗЕРОВАНИЯ ВИНТОВЫХ КАНАВОК

Делительные головки являются важнейшими принадлежностями консольно-фрезерных станков, которые расширяют их технологические возможности. Делительные головки служат для периодического поворота заготовки вокруг ее оси на определенный угол (деление на равные или неравные части); установки заготовки под требуемым углом относительно стола; непрерывного вращения заготовки при фрезеровании винтовых канавок большого шага на режущем инструменте или винтовых зубьев зубчатых колес.

Наибольшее распространение имеют универсальные делительные головки (УДГ). Делительная головка (см. рис. 9) состоит из червяка ***K*** (всегда однозаходный, т. е. $k = 1$), а также червячного колеса $Z_{ЧШ}$, имеющего 40, 60 или 80 зубьев и закрепленного на валу *11*. Червяк можно вращать рукояткой *7*, длину (т. е. радиус) которой можно менять и фиксировать с помощью фиксатора *8* на определенной окружности делительного диска *9*, соединенного с корпусом головки. Второй фиксатор *10* удерживает или освобождает делительный диск относительно корпуса делительной головки. Ножки раздвижного сектора *6* позволяют избежать погрешности при отсчете числа отверстий, когда вращают рукоятку, чтобы обеспечить деление.

Принцип деления заключается в том, что однозаходный червяк вращает червячное колесо с числом зубьев 40, 60 или 80. Отношение

$N = Z_{ЧШ} / k$ называют ***характеристикой делительной головки***. Одному обороту рукоятки *7*, т. е. одному обороту червяка, соответствует поворот червячного колеса на один зуб. Таким образом, если червячное колесо имеет 40 зубьев, оно повернется на 1/40 оборота. Для того чтобы заготовка, установленная на делительной головке, повернулась на один оборот, необходимо повернуть рукоятку на 40 оборотов.

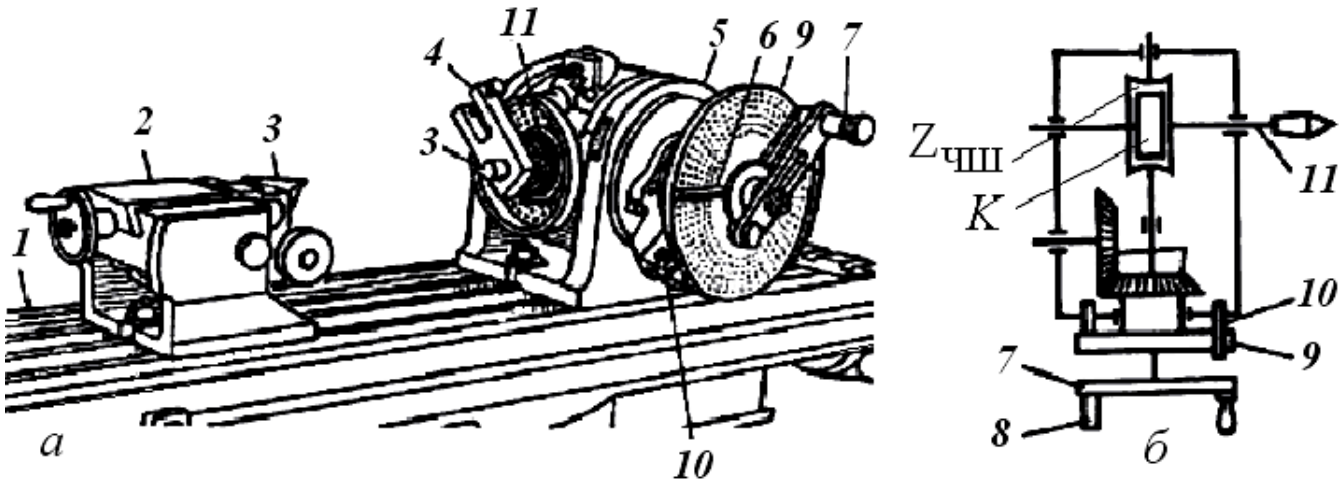



Рис. 9. Делительная головка:
*а* – установка на фрезерном станке; *б* – кинематическая схема при настройке на простое деление:
*1* – стол станка; *2* – задняя бабка; *3* – центры; *4* – оправка; *5* – корпус делительной головки; *6* – раздвижной сектор; 7 – рукоятка настройки; *8* – фиксатор; *9* – делительный диск; *10* – фиксатор (стопор); *11* – шпиндель.

Делительные диски имеют ряды окружностей, на которых расположено определенное число отверстий.

Число отверстий делительного диска:

на одной стороне: 16, 17, 19, 21, 23, 29, 30, 31;
на другой стороне: 33, 37, 39,41, 43, 47, 49, 54.

Применяются следующие способы наладки универсальных де-

лительных головок: для простого деления, дифференциального деления и фрезерования винтовых канавок.

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Научиться рассчитывать и настраивать делительную головку на простое, дифференциальное деление и фрезерование винтовых канавок.

## ХОД ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. По заданию преподавателя рассчитать и начертить кинематические схемы делительной головки:

- для простого деления,
- для дифференциального деления,
- для фрезерования винтовых канавок.

2. Профрезеровать с помощью простого деления заданный многогранник.

3. Дать эскиз фрезы с основными параметрами и углами.

4. Настроить гитару делительной головки для дифференциального деления.

5. Отчет по работе выполняется на специальном бланке.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

### Метод простого деления

При простом делении вращение шпинделя (рис. 11) передается от рукоятки *7* с фиксатором через червяк *K* и червячное колесо, расположенное в средней части шпинделя. При этом делительный диск *9* должен быть закреплен с помощью стопора *10* относительно корпуса делительной головки.

Простое деление окружности на равные и неравные части проводится с помощью рукоятки *4* с фиксатором. Величина поворота рукоятки отсчитывается по отверстиям на делительном диске и фиксируется стержнем фиксатора.

Настройка головки заключается в определении числа оборотов рукоятки. Величина поворота рукоятки определяется по формуле:

$$n_{\text{р}} = \frac{N}{z},$$

где $z$ – число, на которое требуется разделить обрабатываемую деталь;

$N$ – характеристика делительной головки (передаточное число – основные стандартные значения 30, 40, 60);

$Z_{\text{ЧШ}}$ – число зубьев червячной шестерни;

$K$ – число заходов червяка для данной головки,

$$N = 40; \quad K = 1; \quad Z_{\text{ЧШ}} = 40.$$

Если при вычислении число оборотов рукоятки получится дробным, то его необходимо преобразовать таким образом, чтобы

знаменатель дроби был ***равен числу отверстий на одной из окружностей на делительном диске 9.***

**Пример.** Требуется профрезеровать 18 канавок. Определить число оборотов рукоятки.

$$n_{\text{р}} = \frac{N}{z} = \frac{40}{18} = 2\frac{4}{18} = 2\frac{2}{9} = 2\frac{2^{\times 6}}{9^{\times 6}} = 2 + \frac{12}{54}.$$

Число 2 показывает, что после фрезерования каждой канавки рукоятку *7* необходимо повернуть на 2 полных поворота и двенадцать отверстий на окружности делительного диска с числом отверстий 54. Итак, для деления заготовки на 18 частей необходимы 2 оборота рукоятки *7* и 12 отверстий на окружности делительного диска *9* с 54 отверстиями. Устанавливаем раздвижной сектор *6* так, чтобы общее число отверстий, заключенных между внутренними сторонами (с фаской) линеек, было 12 + 1 = 13 (т.е. 12 интервалов между отверстиями) и к двум оборотам рукоятки добавляем поворот сектора.

**Метод дифференциального деления.**

Необходимый поворот шпинделя в случае дифференциального деления осуществляется поворотом рукоятки и делительного диска. Для этого фиксатор *10* (см. рис. 10) должен быть освобожден. Вращение делительного диска будет осуществляться от шпинделя *11* (см. рис. 10) через гитару сменных колес и коническую пару с передаточным отношением $i = 1$. Настройка головки заключается в определении числа оборотов рукоятки (как и в простом делении) и чисел зубьев гитары сменных колес.

Число оборотов рукоятки подсчитывают обычным методом деления, заменяя число делений, на которое нельзя разделить методом простого деления, числом $z_{\text{ПР}}$, близким к нему, но на которое возможно деление.

$$n_{\text{Р}} = \frac{N}{z_{\text{ПР}}}.$$

В этом случае при каждом приеме деления будет возникать погрешность $\alpha_x$, которая должна компенсироваться дополнительным поворотом делительного диска в ту или иную сторону. Этот поворот обеспечивается гитарой сменных колес $\frac{a}{b}\cdot\frac{c}{d}$ или $\frac{a}{d}$ с паразитным промежуточным колесом.

$$\frac{a}{b}\cdot\frac{c}{d}=i_{\text{г}}=\frac{N(z-z_{\text{ПР}})}{z_{\text{ПР}}}.$$

Направление вращения делительного диска должно быть тем же, что и направление вращения рукоятки.

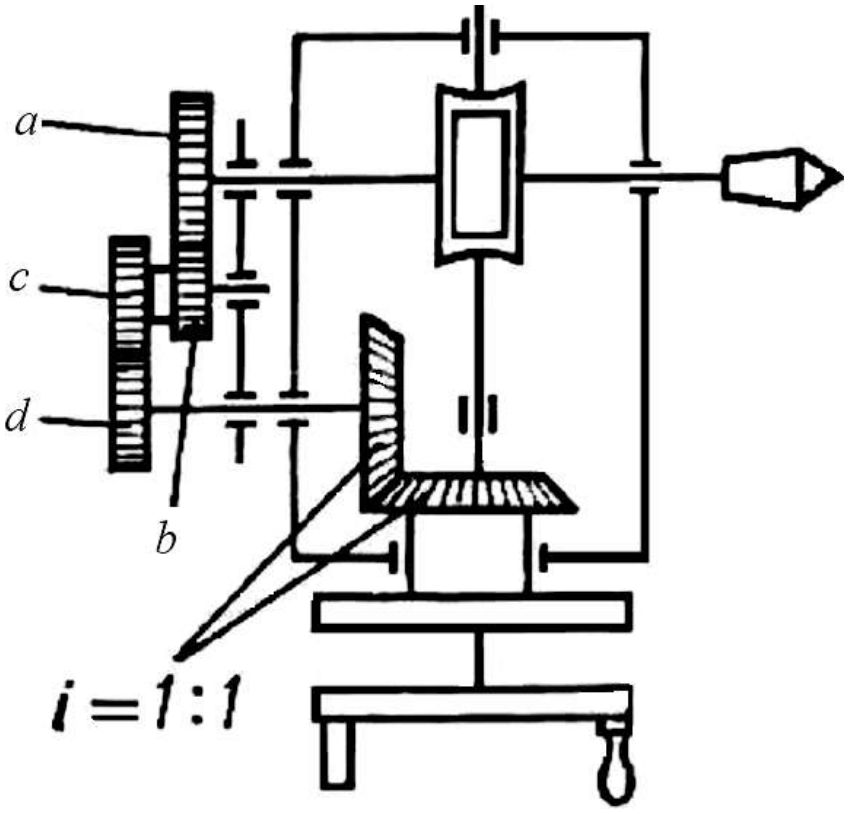



Рис. 10. Кинематическая схема УДГ, настроенной на дифференциальное деление.

**Пример.** Требуется нарезать шестерню с числом зубьев $z$ = 93. Подбираем вспомогательное число $z_{\text{ПР}}$, близкое к заданному числу зубьев $z_{\text{ПР}}$ = 90.

В этом случае поворот рукоятки при делении определяется как

$$n_{\text{Р}} = \frac{N}{z_{\text{ПР}}} = \frac{40}{90} = \frac{4^{\times 6}}{9^{\times 6}} = \frac{24}{54} \quad \text{оборота.}$$

Передаточное отношение гитары, обеспечивающей деление на 93

$$i_{\text{г}} = \frac{N(z - z_{\text{ПР}})}{z_{\text{ПР}}} = \frac{40 \cdot (93 - 90)}{90} = \frac{120}{90} = \frac{4 \cdot 3}{3 \cdot 3} = \frac{4^{\times 10} \cdot 3^{\times 20}}{3^{\times 10} \cdot 3^{\times 20}} = \frac{40 \cdot 60}{30 \cdot 60}.$$

Получим $a = 40$, $b = 30$, $c = 60$, $d = 60$(см. Таблицу на стр.51).

Количество шестерен в гитаре может быть равным от 2 до 5.

Знак "–" значения передаточного отношения гитары сменных колес $i_{\text{г}}$ означает, что направление поворота делительного диска *9* (рис. 10) осуществляется в противоположную сторону от поворота рукоятки, уменьшая величину поворота рукоятки относительно делительного диска.

**Фрезерование винтовых канавок**

Фрезерование винтовых канавок производится при продольном перемещении стола фрезерного станка и одновременном вращении детали, закрепленном в делительной головке относительно своей оси. Для согласования вращения детали с продольным перемещением стола устанавливается гитара сменных шестерен, передающая вращение от ходового винта фрезерного станка через пару конических шестерен, червяк и червячное колесо на шпиндель делительной головки *11*. Делительный диск *9* при этом должен быть освобожден от стопора *10* и соединен с рукояткой фиксатором *8* (см. рис. 9 и 11).

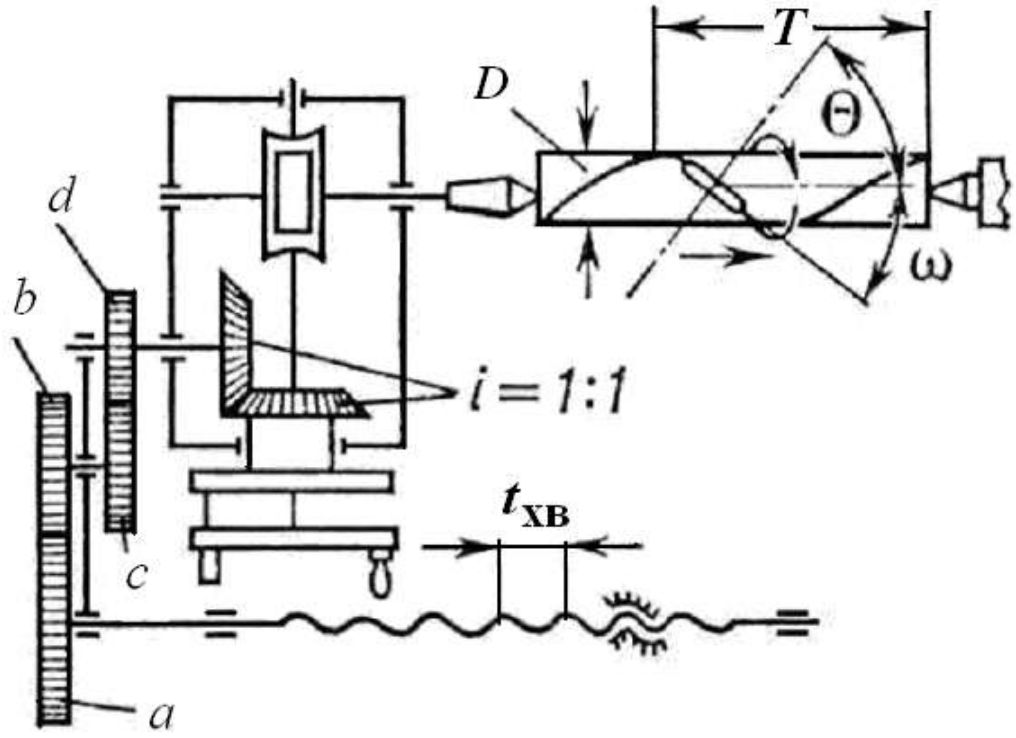



Рис. 11. Кинематическая схема УДГ,
настроенной на фрезерование винтовой канавки.

За один поворот заготовки стол должен перемещаться на величину:

$$1_{\text{ОБ.ЗАГ.}} \cdot \frac{Z_{\text{ЧШ}}}{K} \cdot i_k \cdot \frac{1}{i_{\Gamma}} = \frac{NT}{t_{\text{Х}} \cdot b},$$

$$i_k = 1; \quad \frac{Z_{\text{ЧШ}}}{K} = N; \quad i_{\Gamma} = \frac{t_{\text{ХВ}} \cdot N}{T} = \frac{a}{b} \cdot \frac{c}{d},$$

где $t_{\text{ХВ}}$ – шаг ходового винта продольной подачи фрезерного станка;

$T$ – шаг нарезаемой винтовой канавки;

$N$ – характеристика делительной головки.

При нарезании винтовых канавок фреза должна быть повернута

на угол наклона винтовой линии заготовки ω. Это достигается поворотом стола на тот же угол, который определяется по формуле

$$\mathrm{tg}\alpha = \frac{\pi \cdot D}{T},$$

где $D$ – диаметр обрабатываемой детали.

Следовательно, нарезание винтовых канавок возможно лишь на универсально-фрезерном станке, имеющем поворотный стол.

**Пример.** Профрезеровать винтовую канавку с шагом $T = 25$ мм: шаг ходового винта $t_{\text{ХВ}} = 6$ мм, диаметр заготовки $D = 12$ мм.

$$i_{\Gamma} = \frac{a}{b} \cdot \frac{c}{d} = \frac{40 \cdot 6}{25} = \frac{40^{\times 2} \cdot 6^{\times 15}}{1^{\times 2 \times 15} \cdot 25} = \frac{80}{30} \cdot \frac{90}{25}$$ (см. табл. 10).

Таблица 10

**Набор сменных шестерен к гитаре сменных шестерен**

| № | Количество зубьев у шестерни | Количество шестерен в наборе | № | Количество зубьев у шестерни | Количество шестерен в наборе |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 25 | 2 | 7 | 60 | 2 |
| 2 | 30 | 2 | 8 | 70 | 2 |
| 3 | 35 | 2 | 9 | 80 | 2 |
| 4 | 40 | 2 | 10 | 90 | 2 |
| 5 | 50 | 2 | 11 | 100 | 2 |
| 6 | 55 | 2 | – | – | – |

Формулы для определения:

а) диаметра заготовки шестерни по заданному количеству зубьев и модулю – $D = m(z + 2)$,

б) высоты зуба – $h = 2{,}2 \cdot m$.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назначение делительной головки.
2. В чем заключается настройка делительной головки?
3. На каких станках можно попользовать делительную головку?
4. Какие работы можно выполнять с помощью делительной головки?
5. В чем заключается настройка делительной головки?
6. На каких станках можно производить фрезерование винтовых поверхностей?

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Горбунов Б.И.* Обработка металла резанием.- М.: Машиностроение. 1981.– 286 с.

2. *Барбашов Ф.А. и др*. Фрезерные и зуборезные работы. -М.: Высшая школа, 1983.– 304 с.

3. Головки делительные универсальные: Техническое описание и инструкция по эксплуатации Ю-42.47.013 ТО, 1978.

# СОДЕРЖАНИЕ

РАБОТА № 1. ИЗУЧЕНИЕ УСТРОЙСТВ, РАСШИРЯЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СТАНКОВ ..... 2
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ИЗУЧЕНИЕ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ ..... 10
РАБОТА № 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕРЖИВАЮЩЕГО УСИЛИЯ ЗАЖИМНОГО УСТРОЙСТВА ..... 36
РАБОТА № 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК В ТИСКАХ, ПАТРОНЕ ..... 44
РАБОТА № 5. ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ УНИВЕРСАЛЬНЫХ БЕЗНАЛАДОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ ..... 51
РАБОТА № 6. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ 3-Х КУЛАЧКОВОГО ПАТРОНА ПО ТОЧНОСТИ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЭТАЛОННЫХ ДЕТАЛЕЙ ..... 69
РАБОТА № 7. ИЗУЧЕНИЕ ДЕЛИТЕЛЬНОЙ ГОЛОВКИ ИРАСЧЕТ ГИТАРЫ СМЕННЫХ ШЕСТЕРЕН ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДЕЛЕНИЯ И ФРЕЗЕРОВАНИЯ ВИНТОВЫХ КАНАВОК ..... 73

Сергей Александрович Волегов

**Лабораторный практикум**

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА

*Лабораторный практикум*
по дисциплине « Технологическое оборудование
машиностроительного производства»
для студентов направления подготовки
15.03.01 «Машиностроение» специализации
«Оборудование и технология повышения износостойкости
и восстановления деталей машин и аппаратов»

Корректура кафедры эксплуатации горного оборудования

Подписано в печать

Бумага писчая. Формат бумаги 60 × 84 1/16. Печать на ризографе.

Печ.л. 3,4. Уч.– изд.л. Тираж 50 экз. Заказ №

Издательство УГГУ.

620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева 30.

Уральский государственный горный университет

Лаборатория множительной техники

Минобрнауки России
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

**УТВЕРЖДАЮ**
Проректор по учебно-методическому комплексу
_____С.А. Упоров

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

# Б1.В. ДВ.05. 01.ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Направление подготовки
**15.03.01 «Машиностроение»**

Направленность
***Производство и реновация машин и оборудования***

форма обучения: очная, заочная

год набора: 2019

квалификация выпускника: **бакалавр**

Автор: Волегов С. А. к.т.н.

| | |
|---|---|
| Одобрен на заседании кафедры | Рассмотрен методической комиссией факультета |
| Эксплуатации горного оборудования | Горно-механического |
| *(название кафедры)* | *(название факультета)* |
| Зав. кафедрой _____ | Председатель _____ |
| *(подпись)* | *(подпись)* |
| Симисинов Д.И. | Барановский В.П. |
| *(Фамилия И.О.)* | *(Фамилия И.О.)* |
| Протокол № 8 от 17.04.2019 | Протокол № 7 от 19.04.2019 |
| *(Дата)* | *(Дата)* |

Екатеринбург
2019

Комплект оценочных средств дисциплины согласован с выпускающей кафедрой эксплуатации горного оборудования

Заведующий кафедрой _____ Симисинов Д.И.

*подпись*

# содержание

ВВЕДЕНИЕ ..... 3
ВИДЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТА ..... 4
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ КО ВСЕМ ВИДАМ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ ..... 4
Подготовка к практическим занятиям и лабораторным работам ..... 5
Подготовка и написание контрольной работы ..... 6
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ..... 7
Подготовка к зачёту ..... 7

# ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа студентов - это разнообразные виды деятельности студентов, осуществляемые под руководством, но без непосредственного участия преподавателя в аудиторное и/или внеаудиторное время.

Это особая форма обучения по заданиям преподавателя, выполнение которых требует активной мыслительной, поисково-исследовательской и аналитической деятельности.

Методологическую основу самостоятельной работы студентов составляет деятельностный подход, когда цели обучения ориентированы на формирование умений решать типовые и нетиповые задачи, то есть на реальные ситуации, где студентам надо проявить знание конкретной дисциплины, использовать внутрипредметные и межпредметные связи.

Цель самостоятельной работы - закрепление знаний, полученных на аудиторных занятиях, формирование способности принимать на себя ответственность, решать проблему, находить конструктивные выходы из сложных ситуаций, развивать творческие способности, приобретение навыка организовывать своё время

Кроме того самостоятельная работа направлена на обучение студента осмысленно и самостоятельно работать сначала с учебным материалом, затем с научной информацией, заложить основы самоорганизации и самовоспитания с тем, чтобы привить умение в дальнейшем непрерывно повышать свой профессиональный уровень.

Самостоятельная работа реализует следующие задачи:

систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;

- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- формирование практических (общеучебных и профессиональных) умений и навыков;
- развитие исследовательских умений;
- получение навыков эффективной самостоятельной профессиональной (практической и научно-теоретической) деятельности.

В учебном процессе выделяют два вида самостоятельной работы:

- аудиторная;
- внеаудиторная.

Аудиторная самостоятельная работа по дисциплине выполняется на учебных занятиях под непосредственным руководством преподавателя и по его заданию.

Внеаудиторная самостоятельная работа - планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во

внеаудиторное время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия.

Самостоятельная работа, не предусмотренная образовательной программой, учебным планом и учебно-методическими материалами, раскрывающими и конкретизирующими их содержание, осуществляется студентами инициативно, с целью реализации собственных учебных и научных интересов.

Для более эффективного выполнения самостоятельной работы по дисциплине преподаватель рекомендует студентам источники и учебно-методические пособия для работы, характеризует наиболее рациональную методику самостоятельной работы, демонстрирует ранее выполненные студентами работы и т. п.

## ВИДЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТА

Основные формы организации самостоятельной работы студентов определяются следующими параметрами:

- содержание учебной дисциплины;
- уровень образования и степень подготовленности студентов;
- необходимость упорядочения нагрузки студентов при самостоятельной работе.

В соответствии с реализацией рабочей программы дисциплины в рамках самостоятельной работы студенту необходимо выполнить следующие виды работ:

*для подготовки ко всем видам текущего контроля:*

- повторение материала лекций;
- самостоятельное изучение курса;
- подготовка к практическим занятиям и лабораторным работам;
- подготовка к контрольной работе, написание контрольной работы;
- для подготовки ко всем видам промежуточной аттестации:
- подготовка к зачёту;

Особенностью организации самостоятельной работы студентов является необходимость не только подготовиться к сдаче зачета, но и собрать, обобщить, систематизировать, проанализировать информацию по темам дисциплины.

Технология организации самостоятельной работы студентов включает использование информационных и материально-технических ресурсов образовательного учреждения.

Самостоятельная работа может осуществляться индивидуально или группами студентов как в домашних условиях, так и на занятиях в зависимости от цели, объема, конкретной тематики самостоятельной работы, уровня сложности, уровня умений студентов.

В качестве форм и методов контроля внеаудиторной самостоятельной работы студентов могут быть использованы обмен информационными файлами, семинарские занятия, тестирование, опрос, доклад, реферат, самоотчеты, контрольные работы, защита контрольных и курсовых работ (проектов), защита зачётных работ в виде доклада с презентацией и др.

Текущий контроль результатов внеаудиторной самостоятельной работы студентов осуществляется в пределах времени, отведенного на обязательные учебные занятия по дисциплине.

Промежуточный контроль результатов внеаудиторной самостоятельной работы студентов осуществляется в пределах времени, отведенного для сдачи экзамена / зачёта.

В методических указаниях по каждому виду контроля представлены материалы для самостоятельной работы и рекомендации по организации отдельных её видов.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ КО ВСЕМ ВИДАМ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

Повторение материала лекций и самостоятельное изучение курса

Лекционный материал по дисциплине излагается в виде устных лекций преподавателя во время аудиторных занятий. Самостоятельная работа студента во время лекционных аудиторных занятий заключается в ведении записей (конспекта лекций).

Конспект лекций, выполняемый во время аудиторных занятий, дополняется студентом при самостоятельном внеаудиторном изучении некоторых тем курса. Самостоятельное изучение тем курса осуществляется на основе списка основной и дополнительной литературы к дисциплине.

Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины приведён в рабочей программе дисциплины.

Рекомендуемые задания для самостоятельной внеаудиторной работы студента, направленные на повторение материала лекций и самостоятельное изучение тем курса: для овладения знаниями:

- конспектирование текста;
- чтение основной и дополнительной литературы;
- составление плана текста;
- работа со словарями, справочниками и нормативными документами;
- просмотр обучающих видеозаписей. для закрепления и систематизации знаний:
- работа с конспектом лекций;
- повторная работа над учебным материалом;
- составление таблиц для систематизации учебного материала;
- изучение нормативных материалов;
- составление плана и тезисов ответа на вопросы для самопроверки;
- ответы на вопросы для самопроверки;
- составление библиографических списков по изучаемым темам. для формирования навыков и умений:
- выполнение рисунков, схем, эскизов оборудования;
- рефлексивный анализ профессиональных умений.

Тематический план изучения дисциплины и содержание учебной дисциплины приведены в рабочей программе дисциплины.

Вопросы для самопроверки приведены учебной литературе по дисциплине или могут быть предложены преподавателем на лекционных аудиторных занятиях после изучения каждой темы.

## Подготовка к практическим занятиям и лабораторным работам

Практические занятия по дисциплине выступают средством формирования у студентов системы интегрированных умений и навыков, необходимых для освоения профессиональных компетенций, а также умений определять, разрабатывать и применять оптимальные методы решения профессиональных задач.

На практических занятиях происходит закрепление теоретических знаний, полученных в ходе лекций, осваиваются методики и алгоритмы решения типовых задач по образцу и вариантных задач, разбираются примеры применения теоретических знаний для практического использования, выполняются доклады с презентацией по определенным учебно-практическим, учебно-исследовательским или научным темам с последующим их обсуждением.

Рекомендуемые задания для самостоятельной внеаудиторной работы студента, направленные на подготовку к практическим занятиям: для овладения знаниями:

- чтение основной и дополнительной литературы;
- работа со словарями, справочниками и нормативными документами;
- просмотр обучающих видеозаписей. для закрепления и систематизации знаний:
- работа с конспектом лекций;
- ответы на вопросы для самопроверки;
- подготовка публичных выступлений;

- составление библиографических списков по изучаемым темам. для формирования навыков и умений:
- решение задач по образцу и вариативных задач;
- выполнение рисунков, схем, эскизов оборудования;рефлексивный анализ профессиональных умений.

Тематический план изучения дисциплины и содержание учебной дисциплины приведены в рабочей программе дисциплины.

Лабораторные занятия по дисциплине выступают средством формирования у студентов навыков работы с использованием лабораторного оборудования, планирования и выполнения экспериментов, оформления отчётной документации по выполнению лабораторных работ.

Рекомендуемые задания для самостоятельной внеаудиторной работы студента, направленные на подготовку к лабораторным занятиям: для овладения знаниями:

- изучение методик работы с использованием различных видов и типов лабораторного оборудования;
- изучение правил безопасной эксплуатации лабораторного оборудования;
- работа со словарями, справочниками и нормативными документами. для закрепления и систематизации знаний:
- составление плана проведения эксперимента;
- составление отчётной документации по результатам экспериментирования;
- аналитическая обработка результатов экспериментов. для формирования навыков и умений:
- выполнение рисунков, схем, эскизов оборудования;
- - оформление отчётной документации по выполнению лабораторных работ.

## Подготовка и написание контрольной работы

Контрольная работа - индивидуальная деятельность обучающегося по концентрированному выражению накопленного знания, обеспечивает возможность одновременной работы всем обучающимся за фиксированное время по однотипным заданиям, что позволяет преподавателю оценить всех обучающихся. Контрольная работа является средством проверки умений применять полученные знания для решения задач определенного типа по теме или разделу.

Рекомендуемые задания для самостоятельной внеаудиторной работы студента, направленные на подготовку к контрольной работе: для овладения знаниями:

- чтение основной и дополнительной литературы;
- работа со словарями, справочниками и нормативными документами. для закрепления и систематизации знаний:
- работа с конспектом лекций;
- ответы на вопросы для самопроверки. для формирования навыков и умений:
- решение задач по образцу и вариативных задач;
- выполнение рисунков, схем, эскизов оборудования;
- оформление отчётной документации по выполнению контрольной работы.

Контрольная работа может быть выполнена в виде доклада с презентацией.

Доклад с презентацией - это публичное выступление по представлению полученных результатов знаний по определенной учебно-практической, учебно-исследовательской или научной теме.

При подготовке доклада с презентацией обучающийся должен продемонстрировать умение самостоятельного изучения отдельных вопросов, структурирования основных по-

ложений рассматриваемых проблем, публичного выступления, позиционирования себя перед коллективом, навыки работы с библиографическими источниками и оформления научных текстов.

В ходе подготовки к докладу с презентацией обучающемуся необходимо:

- выбрать тему и определить цель выступления;
- осуществить сбор материала к выступлению;
- организовать работу с источниками;
- -во время изучения источников следует записывать вопросы, возникающие по мере ознакомления, ключевые слова, мысли, суждения; представлять наглядные примеры из практики;
- сформулировать возможные вопросы по теме доклада, подготовить тезисы ответов на них;
- обработать материал и представить его в виде законченного доклада и презентации.

При выполнении контрольной работы в виде доклада с презентацией самостоятельная работа студента включает в себя: *для овладения знаниями*:

- чтение основное и дополнительной литературы по заданной теме доклада;
- составление плана доклада;
- работа со словарями, справочниками и нормативными документами;
- просмотр обучающих видеозаписей по теме доклада

*для закрепления и систематизации знаний*:

- составление плана и тезисов презентации по теме доклада;
- составление презентации;
- составление библиографического списка по теме доклада;
- подготовка к публичному выступлению;
- составление возможных вопросов по теме доклада и ответов на них.

*для формирования навыков и умений:*

- публичное выступление;
- выполнение рисунков, схем, эскизов оборудования;
- рефлексивный анализ профессиональных умений.

Варианты контрольных работ и темы докладов приведены в комплекте оценочных средств дисциплины.

Рекомендуемые задания для самостоятельной внеаудиторной работы студента, направленные на подготовку к курсовой работе (проекту): для овладения знаниями:

- чтение основной и дополнительной литературы;
- работа со словарями, справочниками и нормативными документами;
- составление плана выполнения курсовой работы (проекта);
- составление списка использованных источников.

*для закрепления и систематизации знаний:*

- изучение основных методик расчёта технологических схем, выбора и расчёта оборудования;

*для формирования навыков и умений:*

- решение задач по образцу и вариативных задач;
- выполнение рисунков, схем, компоновочных чертежей;
- оформление текстовой и графической документации.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

### Подготовка к зачёту

Зачёт по дисциплине может быть проведён в виде теста или включать в себя защиту контрольной работы (доклад с презентацией).

Тест - это система стандартизированных заданий, позволяющая автоматизировать процедуру измерения уровня знаний и умений обучающегося.

При самостоятельной подготовке к зачёту, проводимому в виде теста, студенту необходимо:

- проработать информационный материал (конспект лекций, учебное пособие, учебник) по дисциплине; проконсультироваться с преподавателем по вопросу выбора дополнительной учебной литературы;
- выяснить условия проведения теста: количество вопросов в тесте,
- продолжительность выполнения теста, систему оценки результатов и т. д.;
- приступая к работе с тестом, нужно внимательно и до конца прочитать вопрос и предлагаемые варианты ответов, выбрать правильные (их может быть несколько), на отдельном листке ответов вписать цифру вопроса и буквы, соответствующие правильным ответам.

В процессе выполнения теста рекомендуется применять несколько подходов в решении заданий. Такая стратегия позволяет максимально гибко оперировать методами решения, находя каждый раз оптимальный вариант. Не нужно тратить слишком много времени на трудный вопрос, а сразу переходить к другим тестовым заданиям, к трудному вопросу можно обратиться в конце. Необходимо оставить время для проверки ответов, чтобы избежать механических ошибок.

Зачёт также может проходить в виде защиты контрольной работы (доклад с презентацией). Методические рекомендации по подготовке и выполнению доклада с презентацией приведены в п. «Подготовка и написание контрольной работы».

Билет на зачет включает в себя тест одновременной работы всем обучающимся за фиксированное время по однотипным заданиям, что позволяет преподавателю оценить всех обучающихся.

При самостоятельной подготовке к зачету студенту необходимо:

- получить перечень теоретических вопросов;
- проработать пройденный материал (конспект лекций, учебное пособие, учебник) по дисциплине, при необходимости изучить дополнительные источники;
- составить планы и тезисы ответов на вопросы;
- проработать все типы практико-ориентированных заданий;
- составить алгоритм решения основных типов задач;
- выяснить условия проведения зачета: количество теоретических вопросов в билете, продолжительность и форму проведения экзамена (устный или письменный), систему оценки результатов и т. д.;
- приступая к работе с э билетом, нужно внимательно прочитать теоретические вопросы и условия практико-ориентированного задания;

Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный
горный университет»

**Э.В. Горшков, Д. И. Симисинов**

# Проектирование цехов (участков) машиностроительных производств

*Учебное пособие*
**по выполнению курсовой работы и специальной части ВКРБ для студентов специализации подготовки– «Оборудование и технологии повышения износостойкости и восстановления деталей машин и аппаратов» (МШС) специальности 15.03.01 – «Машиностроение» очного и заочного обучения**

**Екатеринбург**
**2019**

Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

*ОДОБРЕНО:*
Методической комиссией
горно-механического факультета
«12» февраля 2015 г.
Председатель комиссии
проф. В.П. Барановский

Э.В. Горшков, Д. И. Симисинов

# Проектирование цехов (участков) машиностроительных производств

Учебное пособие
по выполнению курсовой работы и специальной части ВКРБ для студентов специализации подготовки – «Оборудование и технологии повышения износостойкости и восстановления деталей машин и аппаратов» (МШС) специальности 15.03.01 – «Машиностроение» очного и заочного обучения

Издание УГГУ Екатеринбург, 2019

*УДК 621.757 (076.5)*

*Э.В. Горшков, Д. И. Симисинов* Проектирование цехов (участков) машиностроительных производств. Учебное пособие по выполнению курсовой работы и специальной части ВКРБ для студентов специализации подготовки– «Оборудование и технологии повышения износостойкости и восстановления деталей машин и аппаратов» (МШС) специальности 15.03.01 – «Машиностроение» очного и заочного обучения. Екатеринбург: Изд-во. УГГУ, 2017. 24 с.

Пособие предназначено для использования при выполнении курсовой работы и выполнении соответствующих разделов дипломных проектов студентами всех форм обучения.

В пособии приводится последовательность проектирования механосборочного участка на основе типизации запланированных к выпуску изделий. Приведены необходимые данные по нормам проектирования машиностроительных предприятий.

Справочно-методическое пособие рассмотрено на заседании кафедры эксплуатации горного оборудования 09.12.16 г. (протокол № 1) и рекомендовано для издания в УГГУ.

Рецензент – Н. М. Суслов, докт. техн. наук, профессор кафедры ГМК УГГУ.

© Горшков Э.В.,
Симисинов Д. И., 2019
© Уральский государственный
горный университет, 2019

# ВВЕДЕНИЕ

Каждое предприятие, выпускающее горные машины, имеет в своем составе более или менее развитые три части: основное производство (механические, термические, сварочные, гальванические, сборочные, окрасочные цеха или участки), заготовительное производство (литейные, кузнечные, метизные цехи или участки), вспомогательное производство (энергетический, ремонтный, инструментальный, транспортный цехи или участки, склады и др.).

Проектирование всего этого комплекса задача весьма сложная, для ее решения существуют специальные проектные институты (например, Уралгипротяжмаш).

Для проектирования небольших предприятий или участков, ориентированных на выпуск новой продукции, а также для предварительных расчетов при организации нового производства (к примеру, составлению проектов, бизнес-планов) требуется выполнить эту работу в короткие сроки с минимальными трудозатратами.

Наибольший объем в проектировании занимает определение трудоемкости изготовления запланированных к выпуску изделий. Решение задачи в значительной мере упрощается приведением подлежащих изготовлению изделий к типовым представителям.

Методика по определению трудоемкости изготовления изделий по типовому представителю, а так же все последующие этапы проектирования технологической части цехов и участков механосборочного производства приведены в данном справочно-методическом пособии.

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Приобретение практических навыков по определению трудоемкости изготовления сложных машиностроительных изделий на основе типизации, разработки технологического процесса сборки и основам проектирования технологической части цехов и участков механосборочного производства.

Выполнение работы основывается на самостоятельном творчестве студента, развивающем его инициативу в решении технологических задач, а так же экономического анализ принятых решений.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

Работа заключается в проектировании технологической части участка механосборочного производства заданного изделия при заданном объеме выпуска.

Задание представляет собой конструкторскую документацию на выпускаемое изделие, включающее сборочный чертеж и деталировку.

Работу рекомендуется выполнять в следующей последовательности и включающей разделы:

1. Разработка технологического процесса изготовления типовой детали.

2. Расчет потребного оборудования.

3. Разработка сборочной схемы.

4. Разработка и планировка механосборочного участка.

Работа оформляется в виде чертежа планировки механосборочного участка и пояснительной записки.

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

## 1. Разработка технологического процесса изготовления типовой детали

Для сокращения объема расчетов трудоемкости изготовления, подлежащие изготовлению детали, входящие в изделие, условно приводятся к типовому представителю. В качестве типового представителя выбирается деталь, которая выпускается в наибольшем количестве, а по конструкции и технологическому процессу сходна с большинством деталей данной группы (в данной работе типовая деталь задается преподавателем).

Разрабатывается технологический процесс изготовления типовой детали, определяется тип производства и трудоемкость ее изготовления, выполнение данного этапа изложено в части 1 данного методического руководства [1]. В таблицах П.1, П.2 приложения приведены формулы для упрощенного расчета нормы штучного времени. Технологический процесс в работе оформляется в форме маршрута обработки.

Для определения трудоемкости остальных деталей, входящих в план производства, предлагается воспользоваться коэффициентом приведения $K$

$$K = K_{м} \cdot K_{сер.} \cdot K_{сл.}, \qquad (1)$$

где $K_{м}$, $K_{сер}$, $K_{сл}$ – соответственно коэффициенты, отражающие различия масс, серийности, сложности.

Коэффициент массы определяется по формуле:

$$K_{м} = ( Q_i / Q_{тип} )^{2/3}, \qquad (2)$$

где $Q_{тип}$ - масса типовой детали;

$Q_i$ - масса $i$-ой детали, кг.

При весе детали менее 1 кг учитывать различие в массах деталей нецелесообразно.

Коэффициент серийности:

$$K\text{сер} = (N\text{тип} / Ni)^{0,2}, \quad (3)$$

где $Ni$ - количество одинаковых $i$-х деталей в узле;

$N$тип - количество одинаковых типовых деталей в узле.

Коэффициент сложности:

$$K\text{сл} = (Hi / H\text{тип})^{0,5}, \quad (4)$$

где $Hi$ - количество обрабатываемых поверхностей у $i$-ой детали;

$H$тип - количество обрабатываемых поверхностей у типовой детали.

Штучно-калькуляционное время для остальных деталей, мин.:

$$T\text{шт-к}_i = T\text{тип} \cdot K, \quad (5)$$

Ход и результаты расчетов оформляется по форме таблицы 1.

Таблица 1

**Расчет трудоемкости изготовления деталей**

| Номер детали | Наименование детали | Кол-во в изделии | $K$м | $K$сер | $K$сл | $K$ | $T$шт-к, мин. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | |
| | | | | | | $\Sigma T\text{шт-к}_i$ | |

## 2. Расчет потребного оборудования

Определяется общее количество станков:

$$C_{общ} = \Sigma T_{шт\text{-}к} \cdot N_{г} / (F_{д} \cdot 60) \cdot \eta, \quad (6)$$

где $F_{д}$ - действительный годовой фонд времени работы оборудования, час; η – коэффициент использования рабочего времени оборудования, час. (принимается равным 0,85÷0,75);

Таблица 2

**Примерное соотношение станков по группам для общего машиностроения**

| Станки | % |
|---|---|
| Токарные | 40 |
| Сверлильные | 20 |
| Фрезерные | 15 |
| Строгальные | 5 |
| Шлифовальные | 10 |
| Разные | 10 |

Общее количество оборудования распределяется по группам в соответствии с установленным процентным соотношением видов станков от их количества, с учетом специфики изготовления изделия. В каждой группе целесообразно принимать различные по типу, точности и размерам станки (например, токарная группа 3 станка – принимаем: 2 токарно-винторезных станка, 1 токарно-револьверный).

Заполняется ведомость принятого основного оборудования в форме табл. 3.

Таблица 3

**Ведомость принятого основного оборудования**

| Наименование | Марка | Кол. | Габариты | Площадь, $м^2$ |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |
| | | | Итого: | |

Кроме основного оборудования необходимо предусмотреть наличие вспомогательного:

- заточные станки (3÷5 % от общего количества станков);
- отрезные станки (например, дисковая пила для резки проката);
- слесарные верстаки основного и сборочного отделения, количество верстаков принимается 20÷25 % от $C_{общ}$;
- контрольные плиты, разметочные столы (5÷10 % от $C_{общ}$);
- инструментальные ящики (на каждый станок) и другое необходимое оборудование.

Ведомость вспомогательного оборудования заполняется в форме табл. 4.

Таблица 4

**Ведомость принятого вспомогательного оборудования**

| Оборудование | Количество | Габариты, мм х мм | Площадь, м$^2$ |
|---|---|---|---|
| Верстак слесарный | | 2200х1200 | |
| Ящик для инструмента | | 800х500 | |
| Плита контрольная | | 2000х1200 | |
| Стол разметочный | | 2000х1200 | |
| Итого: | | | |

## 3. Разработка сборочной схемы

Составление технологических схем целесообразно при проектировании сборочных процессов для любого типа производства, так как они значительно упрощают разработку сборочных процессов. При разработке последовательности сборки нужно учитывать следующие правила:

1. В каждой сборочной единице должна быть найдена базирующая деталь, определяющая положение всех деталей составляющих данную сборочную единицу. С этой базовой детали (или узла) и должна начинаться сборка.

2. Каждая последующая, более сложная сборочная единица всегда должна содержать не менее одной предшествующей, более простой сборочной единицы.

3. Положение детали для общей сборки должно быть удобно для сборки всех узлов, без поворота и переустановки ее.

4. Смонтированные детали и узлы не должны мешать последующей сборке.

5. В первую очередь производится сборка и установка на базовую деталь сборочных единиц, выполняющих наиболее ответственные функции в работе.

6. Если узлы имеют взаимосвязанные элементы в размерных цепях, то сборка начинается с тех деталей, которые имеют общие взаимосвязанные размеры.

На рис. 1 в качестве примера показан фрагмент технологической схемы сборки.

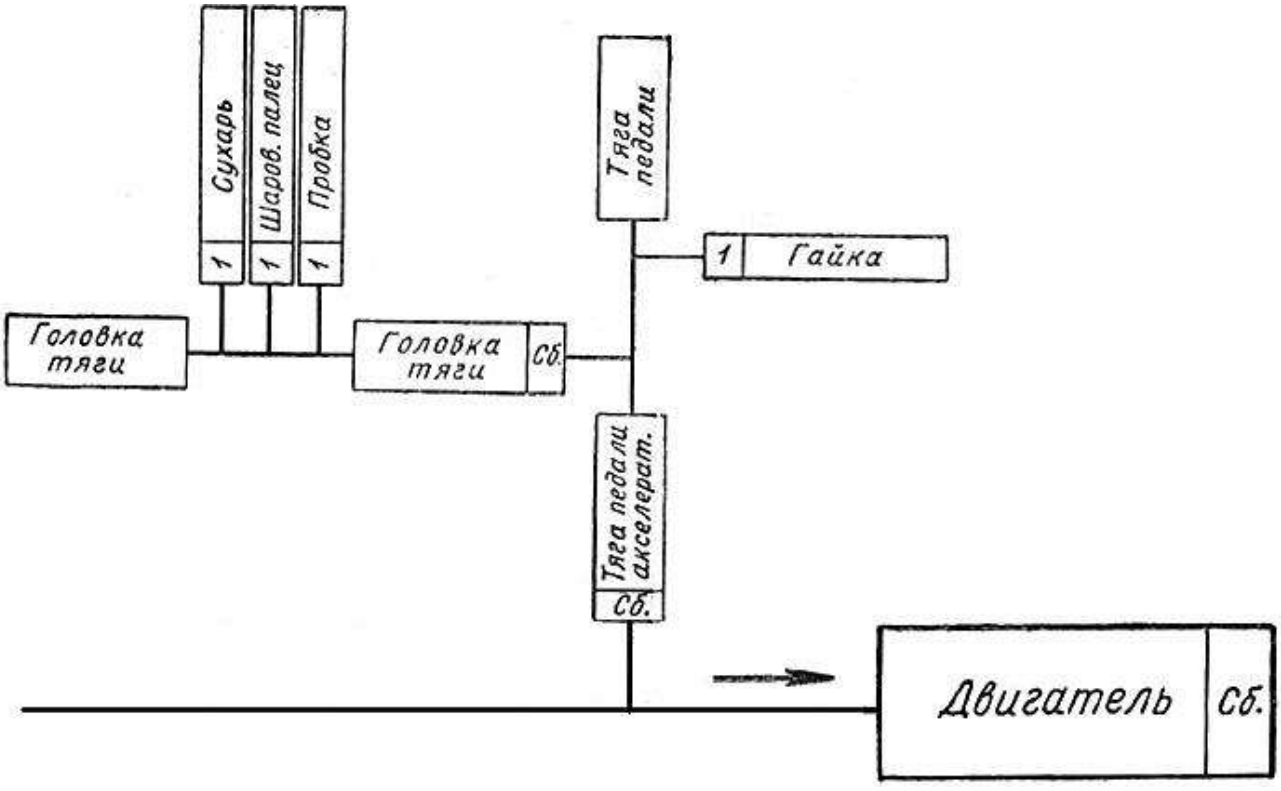



Рис. 1. Фрагмент схемы сборки

В левой части указывается базовый элемент, а в правой части – изделие в сборе. Эти две части соединены горизонтальной линией, выше и ниже которой обозначены все детали в порядке последовательности сборки и узлы, входящие непосредственно в изделие. Технологические схемы могут снабжаться надписями, если метод сборки не очевиден из схемы, например: «запрессовать», «сварить» и т. д.

## 4. Расчет площадей механосборочного участка

Площадь станочного отделения цеха, м$^2$:

$$S_{об} = (S_о + S_в)\cdot k_п, \qquad (8)$$

где $S_о$ - площадь основного оборудования (по табл. 3);

$S_в$ - площадь вспомогательного оборудования (по табл. 4);

$k_п = 3{,}5 \div 4$ коэффициент, учитывающий проходы и проезды;

Площадь механосборочного участка с учетом вспомогательных помещений, м$^2$:

$$S_{мсу} = S_{об} + S_{су} + S_{упр} + S_{скл} + S_{заг} + S_{сги}, \qquad (7)$$

где $S_{су}$ - площадь санузла (с учетом душевых и медпункта) – 10 % от общей площади;

$S_{упр}$ - площадь для управляющего персонала (производственные мастера), принимается 10÷20 м$^2$;

$S_{со}$ - площадь сборочного отделения принимается 20÷30 % от общей площади;

$S_{скл}$ - площадь складских помещений 10÷15 % от общей площади;

$S_{заг}$ - площадь заготовительных помещений – 5÷6 % от площади станочного отделения цеха.

## 5. Рекомендации по планировке механосборочного участка

После определения общей площади участка задаются его габаритные размеры. Для зданий, имеющих прямоугольную форму, целесообразно выдерживать соотношение ширины и длины не более 1:3. Габариты участка нормируется по *сетке колонн* – 12х6, 15х6, 18х6 м и ширине пролета, установленному 12 м – для легкого и 15, 18 м – среднего машиностроения. Ширина проезда на участке принимается 2÷3 м, в зависимости от типа транспорта, ширина проходов 1 м.

На плане указывают основные строительные элементы здания, относящиеся к проектируемому участку: наружные и внутренние стены, перегородки, ворота, двери, окна и антресоли. Показывают технологическое оборудование, производственный инвентарь (верстаки, стеллажи, инструментальные шкафы), подъемно-транспортное оборудование (за исключением безрельсовых самоходных и несамоходных транспортных средств: электрокар, погрузчиков и т. п.), проезды и проходы, необходимые для обеспечения рабочих мест материалами и запасными частями, а также площадки накопления изделий или материалов.

Технологическое оборудование изображают в принятом масштабе условным упрощенным контуром с учетом крайнего положения движущихся частей, открывающихся кожухов и устанавливаемых на оборудовании изделий, если последние выходят в плане за габаритные размеры оборудования. Внутри контура оборудования и производственного инвентаря или вне контура на выносной полке указывают его номер по спецификации к чертежу. Нумерацию обычно дают последовательно, в порядке размещения оборудования и инвентаря на чертеже, слева направо и затем сверху вниз.

Расположение станков и другого технологического оборудования, устанавливаемого на фундаменты, координируют относительно колонн

и стен здания. Указание на чертеже расстояний от оборудования до колонн и стен называют *привязкой оборудования*.

Условными обозначениями на чертеже показывают места расположения рабочих и места подсоединения к энергетическим сетям, водопроводу, вентиляции и канализации. Основные условные обозначения приведены на рис. 2 приложения.

Планы расстановки технологического оборудования выполняют, как правило, на стадии разработки проекта в масштабе 1:200, на стадиях разработки рабочей документации или рабочего проекта – в масштабе 1:100. В учебных проектах допускается применение масштабов 1:50 и 1:25.

К плану расстановки технологического оборудования прилагают спецификацию, содержащую в табличной форме следующие данные: номера по плану; наименование оборудования и инвентаря; краткую техническую характеристику; модель или тип; место изготовления; количество; примечания, в которых указывают мощность оборудования и потребителей воды, воздуха, пара, газа и других энергоресурсов. Допускается размещать спецификацию на свободном поле чертежа.

Расположение технологического оборудования, ширина и расположение проходов и проездов должны обеспечивать удобство и безопасность работы, подачи изделий, инструмента, уборки отходов и помещения, доступа к оборудованию для его обслуживания, ремонта, монтажа и демонтажа.

Расстояния между оборудованием и частями зданий (стенами, колоннами), размеры проходов и проездов должны быть не менее указанных в нормах технологического проектирования (табл. П.3), пример планировки – рис. 3, 4 приложения.

Одновременно с расстановкой производственного оборудования на планировке располагают подъемно-транспортные средства для обеспечения ремонта оборудования, а также перемещения поддонов с заготовками или готовыми изделиями (конвейеры, монорельсы, склизы, рольганги, мостовые краны и др., табл. 5).

Основным принципом расположения оборудования является обеспечения кратчайшего пути движения заготовок (деталей) в процессе их обработки.

Для этого необходимо при расстановке оборудования стремиться к соблюдению следующих наиболее важных условий:

1. Располагать оборудование по порядку выполнения операций технологического процесса.

2. Обеспечить полную комплектность оборудования на линии обработки, т. е. обеспечить ее всеми станками, нужными для обработки детали.

3. Расстояние между станками должно быть минимальным, при этом уменьшаются затраты труда на транспортировку заготовок от станка к станку, создаются лучшие условия для многостаночной работы и обеспечивается лучшее использование производственной площади.

4. Станки на линии должны быть расставлены так, чтобы было обеспечено (по возможности) одно направление всех обрабатываемых заготовок. Обычно линии станков для обработки заготовок располагаются параллельно друг другу. Проезды устраивают перпендикулярно этим линиям.

Кроме этого при разработке планировки необходимо учесть следующее:

- необходимо обеспечить монтаж и демонтаж любого станка без перестановки остального оборудования;

- следует учесть возможность многостаночного обслуживания;

- оборудование, работающее с длинномерными заготовками (токарно-револьверные станки и др.), устанавливается под углом 15 - 20 °.

Проектирование производственных участков необходимо проводить в соответствии со строительными нормами и правилами (СНиП), правилами безопасности жизнедеятельности, пожарной безопасности и санитарии. Правила установки оборудования с соблюдением техники безопасности даны в специальной литературе [2-7]. Там же приведены контуры и габаритные размеры станков.

Таблица 5

**Подъемно-транспортное оборудование**

| Наименование | Грузоподъемность | Длина пролета, м |
|---|---|---|
| Кран мостовой с электротельфером | 1, 2, 3, 5 т | 5, 6, 7, … 17 |
| Монорельс с электротельфером или электроталью | 0,15; 0,25; 0,5; 1; 2; 3 т | – |
| Кран-укосина с электроталью (угол поворота до 270°) | От 0,25 т | Длина стрелы 1,2 - 4 |
| Кран-балка электрифицированная | До 3 т | – |
| Рольганг | До 1000 кг/м | Ширина до 0,6 |

## 6. Определение технико-экономических показателей цеха

Разработав проект цеха механической обработки по полученному ранее заданию, необходимо оценить эффективность разработанного проекта в сравнении со средними технико-экономическими показателями по отраслям (табл. 6), в зависимости от изготовляемой продукции.

Таблица 6

**Технико-экономические показатели производства по машиностроительным отраслям**

| Номер показат. | Показатели | Станкостроение | Тракторостроение | Тяжелое машиностроение |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Выпуск на 1 производственного рабочего, т | 10,9 | 60,0 | 30,0 |
| 2 | Выпуск на 1 шт. производственного оборудования, т | 17,5 | 68,0 | 83,3 |
| 3 | Выпуск на 1 м² производственной площади, т | 1,87 | 5,4 | 2,07 |
| 4 | Трудоемкость 1 т обрабатываемых деталей, станко-часов | 162,0 | 35,2 | 39,0 |
| 5 | Средний коэффициент загрузки оборудования | 0,83 | 0,64 | 0,86 |
| 6 | Производственная площадь на единицу производственного оборудования, м² | 21,4 | 12,5 | 40,0 |
| 7 | Общая площадь на единицу производственного оборудования, м² | 28,1 | 19,0 | 58,0 |
| 8 | Коэффициент использования площади | 0,76 | 0,65 | 0,69 |

Основной показатель рациональности расположения оборудования - коэффициент использования площади

$$k_{и.пл.}=S_{мсу}/S_{факт}, \quad (8)$$

где $S_{мсу}$ – расчетная сумма площадей занятых соответственно оборудованием для изготовления и обработки деталей и вспомогательными службами в соответствии с принятыми нормами (7);

$S_{факт}$ – фактическая площадь цеха, участка.

# ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

## Приближенные формулы для определения основного технологического времени $T_o \cdot 10^{-3}$, мин.

| | |
|---|---|
| Черновая обточка за один проход | 0,17*dl* |
| Чистовая обточка по 11-му квалитету | 0,1*dl* |
| Чистовая обточка по 9-му квалитету | 0,17*dl* |
| Черновая подрезка торца $R_a$ 6,3 | 0,037($D^2 - d^2$) |
| Чистовая подрезка торца $R_a$ 1,6 | 0,052($D^2 - d^2$) |
| Отрезание | 0,19$D^2$ |
| Черновое и чистовое обтачивание фасонным резцом | 0,63($D^2 - d^2$) |
| Шлифование грубое по 11-му квалитету | 0,07*dl* |
| Шлифование чистое по 9-му квалитету | 0,1*dl* |
| Шлифование чистовое по 6-му квалитету | 0,15*dl* |
| Растачивание отверстий на токарном станке | 0,18*dl* |
| Сверление отверстий | 0,52*dl* |
| Рассверливание *d* = 20…60 | 0,31*dl* |
| Зенкерование | 0,21*dl* |
| Развертывание черновое | 0,43*dl* |
| Развертывание чистое | 0,86*dl* |
| Внутреннее шлифование отверстий 9-го квалитета | 1,5*dl* |
| Внутреннее шлифование отверстий 7-го квалитета | 1,8*dl* |
| Черновое растачивание отверстий за один проход *Ra* 12,5 | 0,2*dl* |
| Черновое растачивание под развертку | 0,3*dl* |
| Развертывание плавающей разверткой по 9-му квалитету | 0,27*dl* |
| Развертывание плавающей разверткой по 7-му квалитету | 0,52*dl* |
| (*d* – диаметр; *l* – длина обрабатываемой поверхности; *D* – диаметр обрабатываемого торца; (*D* – *d*) – разность наибольшего и наименьшего диаметров обрабатываемого торца) | |
| Протягивание отверстий и шпоночных канавок (*l* – длина протяжки, мм) | 0,4*l* |
| Строгание черновое на продольно-строгальных станках | 0,065*Bl* |
| Строгание чистовое под шлифование или шабрение | 0,034*Bl* |
| Фрезерование черновое торцевой фрезой - за проход<br>- чистовое | 6*l*<br>4*l* |
| Фрезерование черновое цилиндрической фрезой | 7*l* |
| Шлифование плоскостей торцом круга | 2,5*l* |
| (*B* – ширина обрабатываемой поверхности, мм; *l* – длина обрабатываемой поверхности, мм) | |
| Фрезерование зубьев червячной фрезой (*D* = 30 … 300 мм) | 2,2*Db* |
| Обработка зубьев червячных колес (*D* = 100 … 400 мм)<br>(*D* – диаметр зубчатого колеса, мм; *b* – длина зуба, мм) | 60,3*D* |

Окончание табл. П.1

| | |
|---|---|
| Фрезерование шлицевых валов методом обкатки | 9*lz* |
| Шлицешлифование (*l* – длина шлицевого валика, мм; *z* – число шлицев) | 4,6*lz* |
| Нарезание резьбы на валу (*d* = 32…120) | 19*dl* |
| Нарезание метчиком резьбы в отверстиях (*d* = 10 … 24) (*d* – диаметр резьбы, мм; *l* – длина резьбы, мм) | 0,4*dl* |

Таблица П.2

**Значение коэффициента $\varphi_k$**

| Виды станков | Производство | |
|---|---|---|
| | единичное и мелкосерийное | крупносерийное |
| Токарно-револьверные | 1,98 | 1,27 |
| Токарно-многорезцовые | – | 1,35 |
| Вертикально-сверлильные | 1,72 | 1,50 |
| Радиально-сверлильные | 1,75 | 1,30 |
| Расточные | 3,25 | 1,41 |
| Круглошлифовальные | 2,10 | – |
| Строгальные | 1,73 | 1,55 |
| Фрезерные | 1,84 | – |
| Зуборезные | 1,66 | 1,51 |
| Токарные | 2,14 | 1,27 |
| Примечание: штучно-калькуляционное время $T_{ик} = \varphi_k T_o$. | | |

Таблица П3

**Нормы расстояний между станками и элементами зданий**

| Расстояния | Величина расстояния, мм при размерах станков, м | | |
|---|---|---|---|
| | мелкие (до 1,8х0,8) | средние (до 2,4х1,2) | крупные (до 4х2) |
| *При расположении фронтальными сторонами к проезду* | | | |
| Между боковыми сторонами | 700 | 900 | 1200 |
| Между тыльными сторонами | 700 | 800 | 1000 |
| *При поперечном расположении к проезду* | | | |
| Расположение станков в «затылок» | 1300 | 1500 | 1800 |
| Расположение станков в фронтом к друг другу | 2000 | 2500 | 2800 |
| То же при многостаночном обслуживании | 1300 | 1500 | - |
| От стен или колонн здания до тыльной или боковой стороны станка | 700 | 800 | 900 |
| То же до фронта станка | 1300 | 1500 | 1800 |

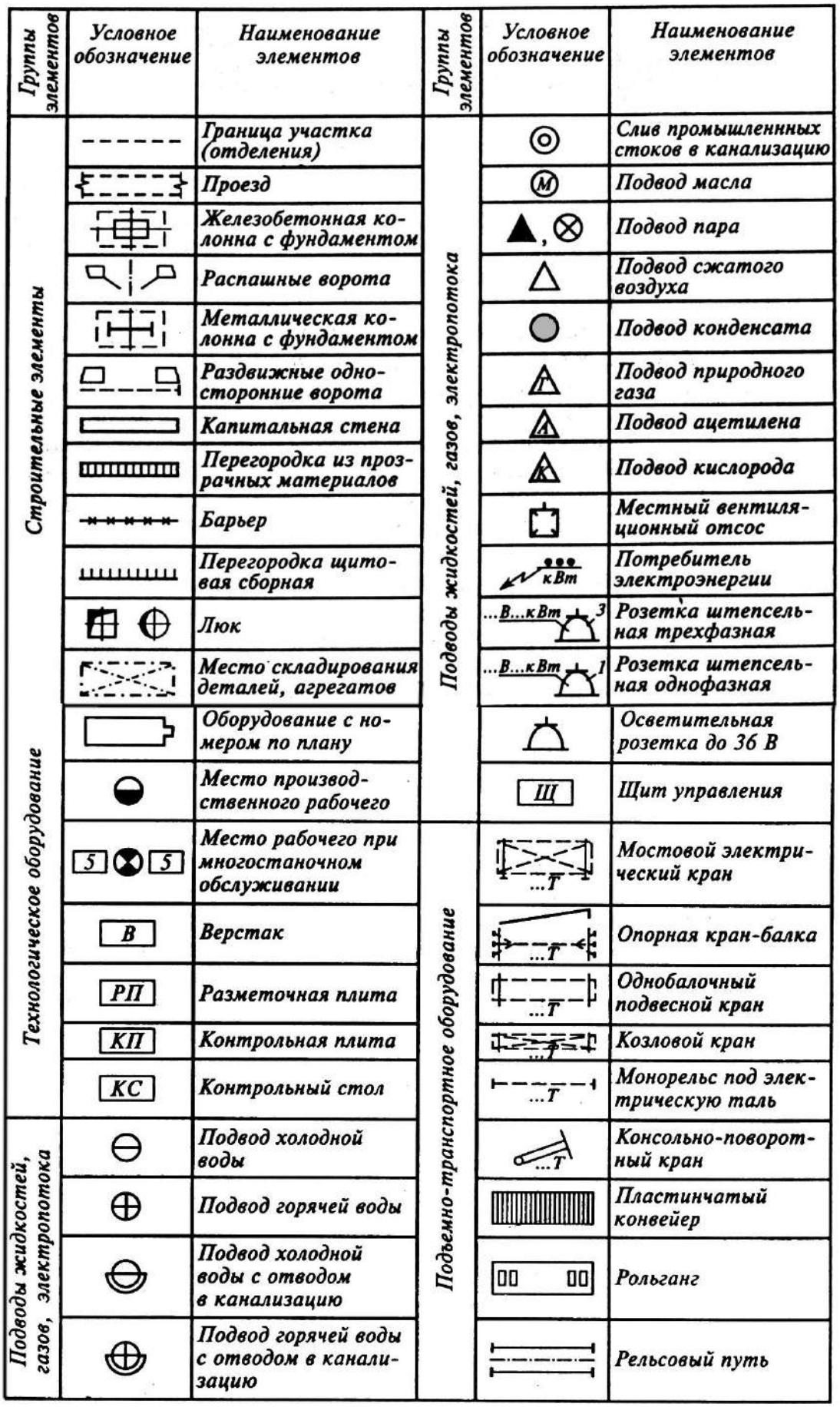



Рис. 2. Условные обозначения элементов строительных конструкций и оборудования

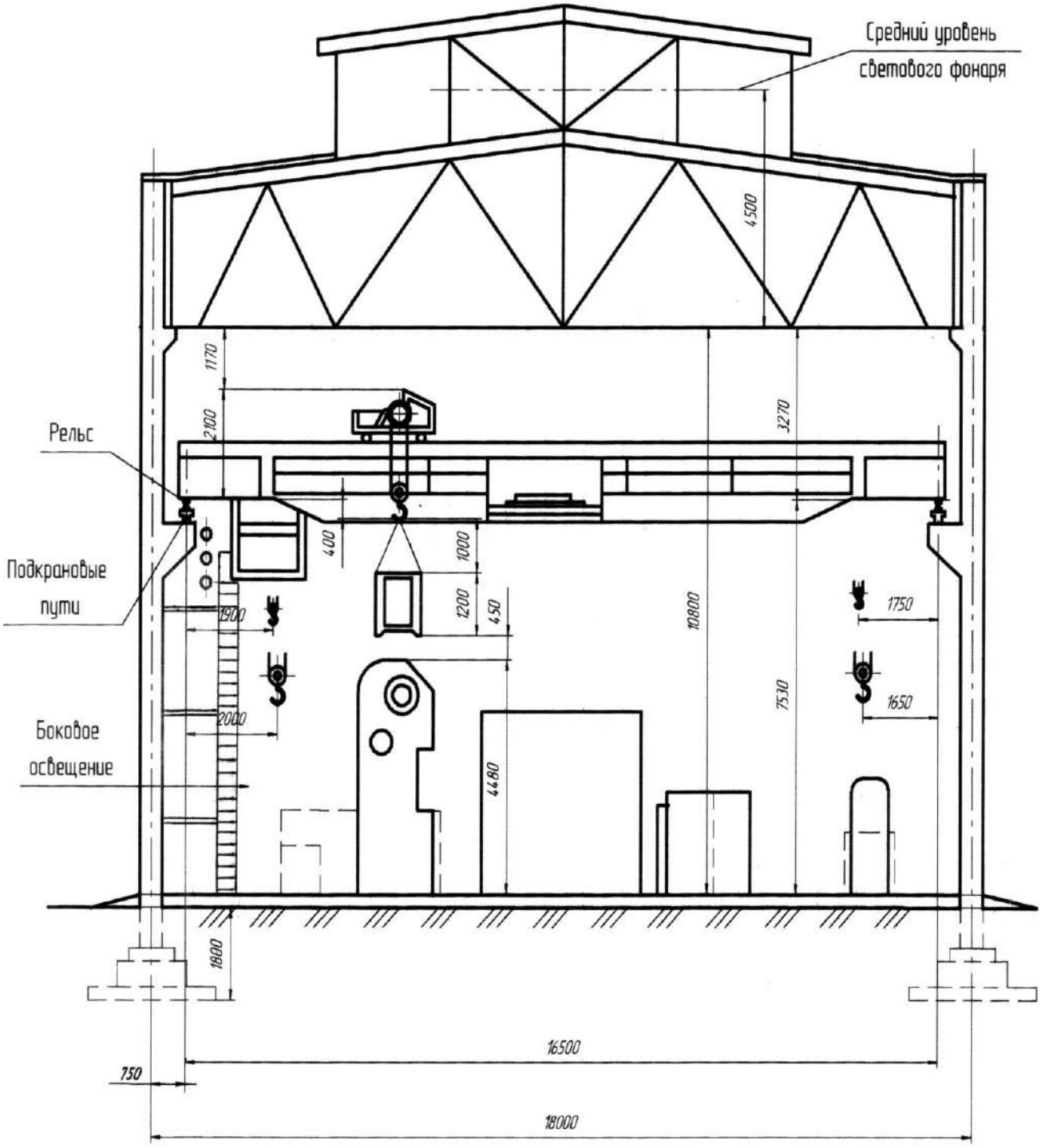



Рис. 3. Сечение производственного здания

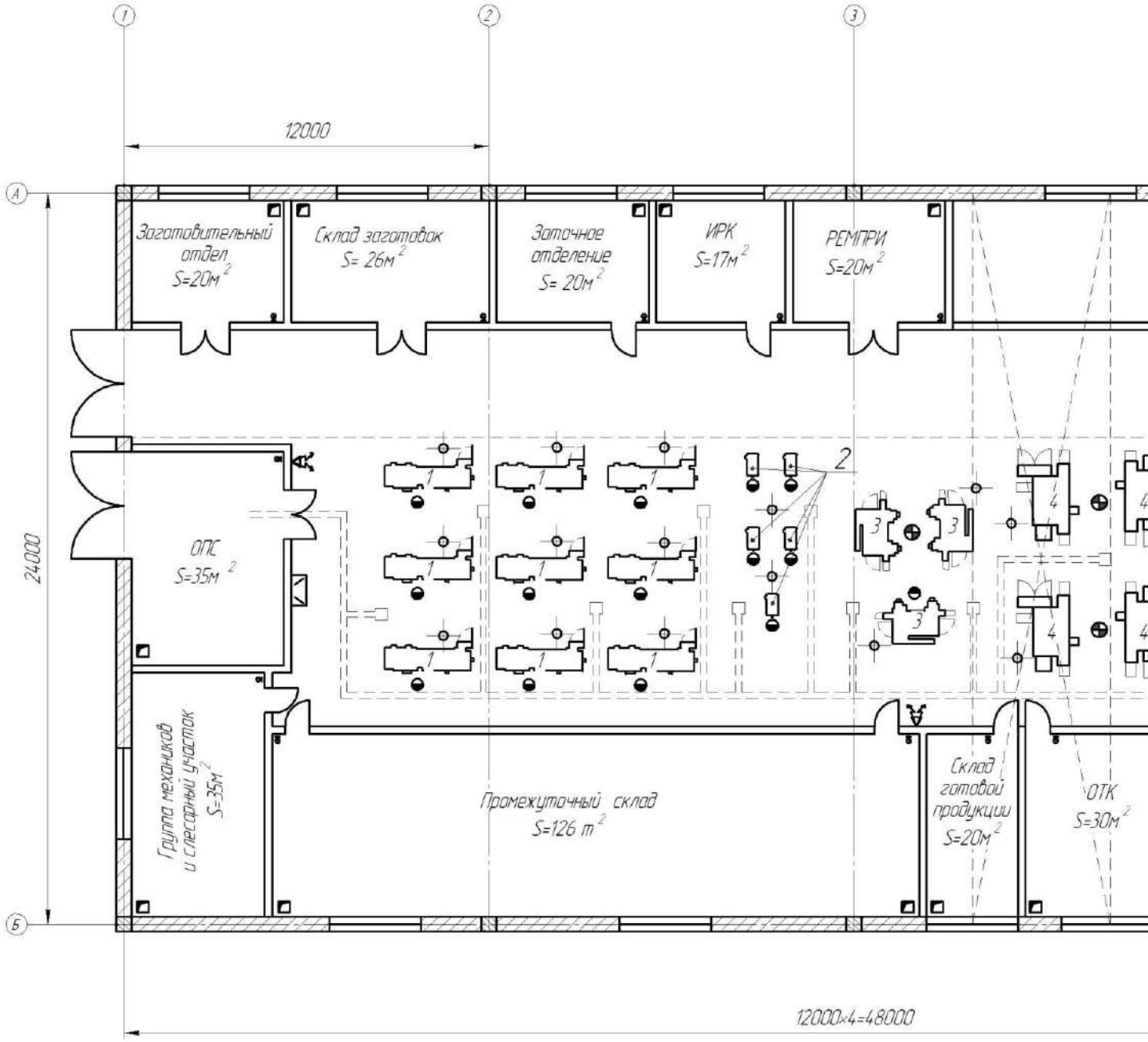
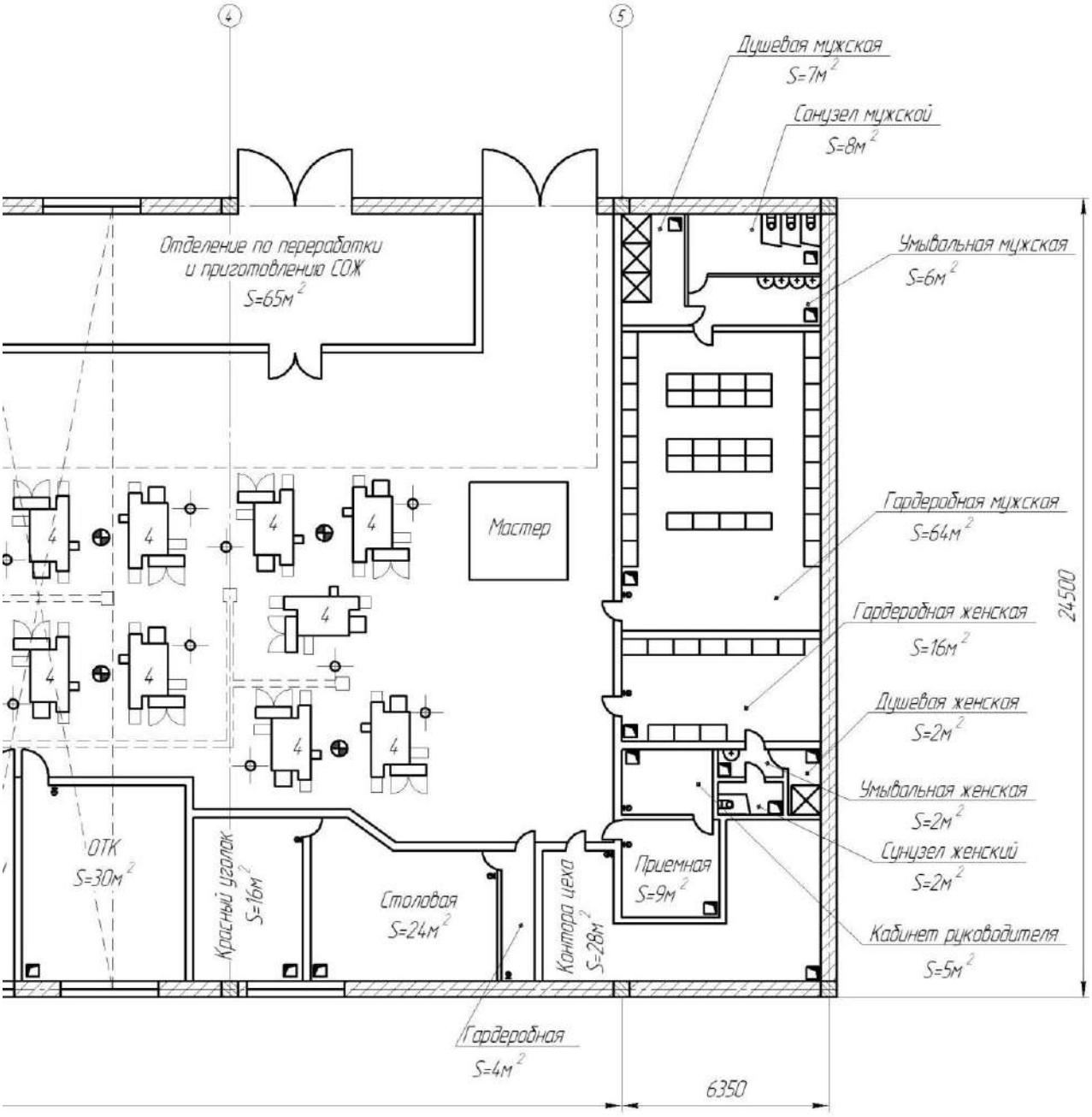



Рис. 4. Пример планировки механо-




-сборочного цеха (фрагмент)

# ПРИЛОЖЕНИЕ

Графические изображения станков М 1:100

Станки подразделяют:

- по степени универсальности – на универсальные и специализированые;
- по массе - на легкие (до 1т), нормальные (до 10т), крупные (до 30т); тяжелые (до 100т) и универсальные (более 100 т);
- по точности: нормальной (Н), повышенной (П), высокой (В), особовысокой (А), особоточные и прецизионные (С).

Условное обозначение (индекс) станка состоит из трех или четырех цифр и букв: первая цифра - группа станка (например 1 - токарный) вторая цифра - тип или разновидность, третья или четвертая цифра – типоразмер, следующая цифра (или две) - параметры обработки.

Буква, стоящая после первой цифры указывает на исполнение станка по точности.

Буквы, стоящие в конце типовой части - модификация базовой модели.

Пример: 1Г325: 1- токарной группы; Г - модификация; 3 - револьверный; 25 - диаметр прутка (мм).

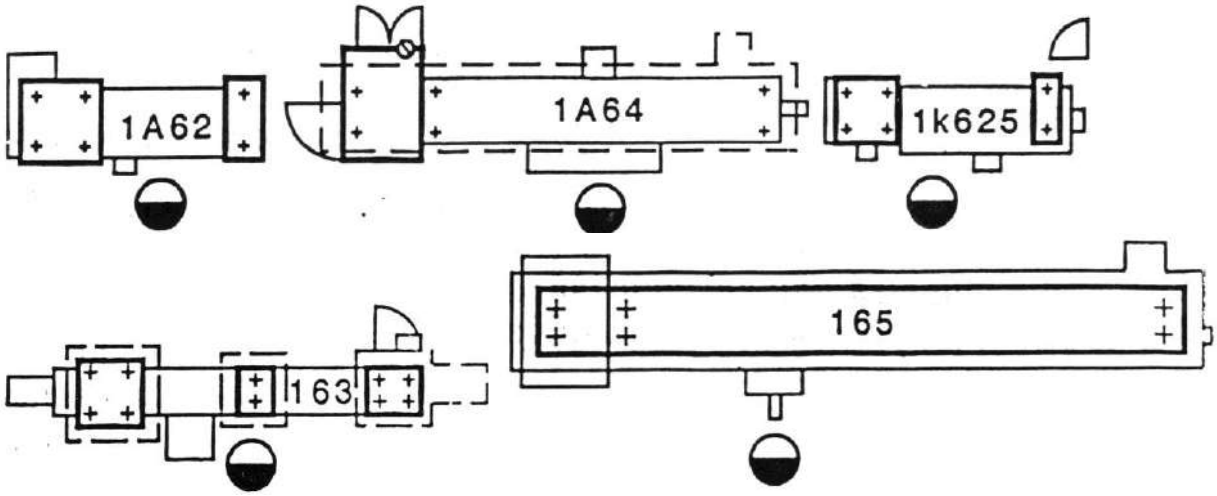
При наличии дополнительных конструктивных особенностей (программное управление, цифровая индексация, магазин с автоматической сменой инструмента) в индексе добавляют следующие буквы:

Ц - цикловое программное управление, Ф1 - цифровая индексация, Ф2 - числовое позиционное программное управление, ФЗ - числовое контурное программное управление, Ф4 и Ф5 - многопозиционные станки, Р - поворотная револьверная головка для автоматической смены инструмента, М - магазин.

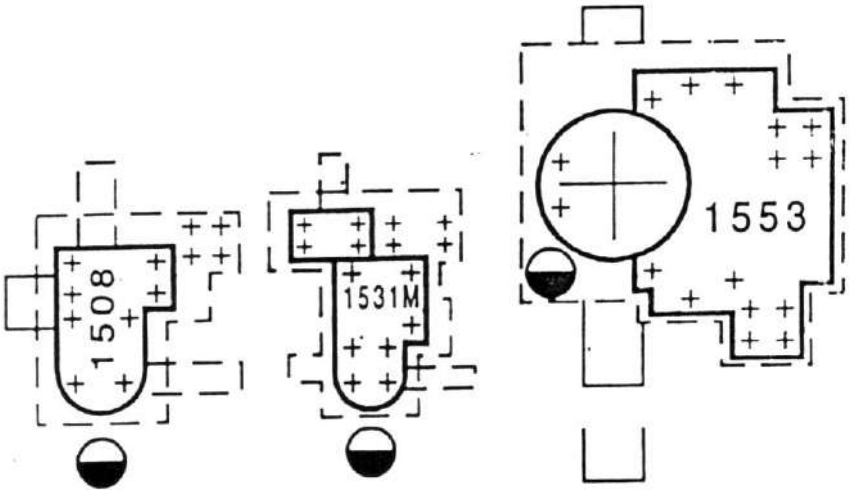
Ниже в контурах станков указаны обозначения моделей станков. М 1:100

ТОКАРНЫЕ

*Токарно-винторезные*

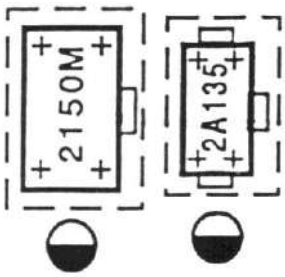


*Токарно-карусельные*

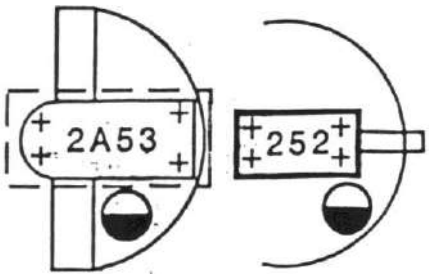



СВЕРЛИЛЬНЫЕ

*Вертикально*

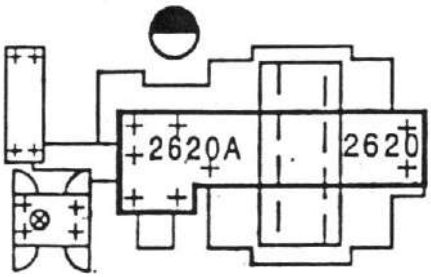



*Радиально*

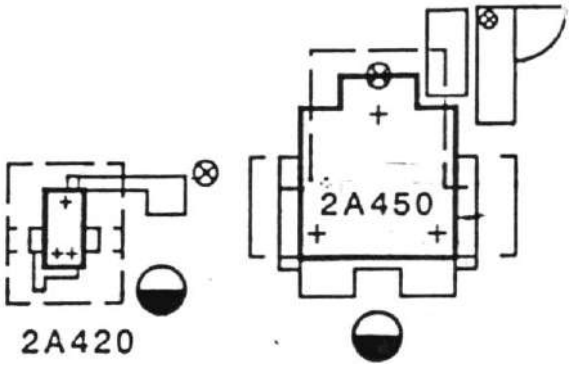



РАСТОЧНЫЕ

Горизонтально

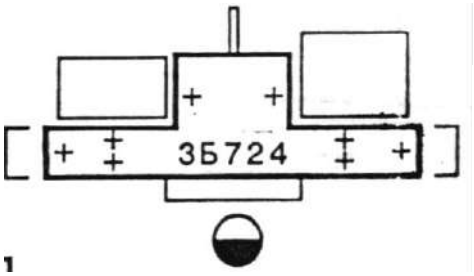



Координатно-расточные

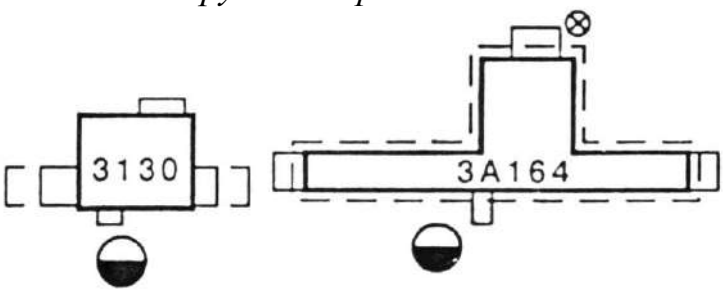


ШЛИФОВАЛЬНЫЕ

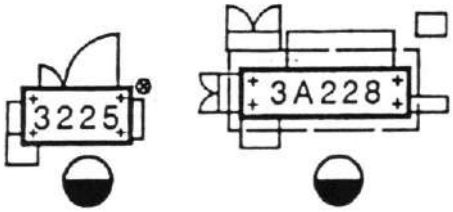
*Плоскошлифовальный*



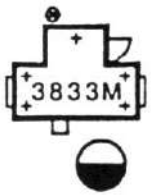

*Круглошлифовальные*



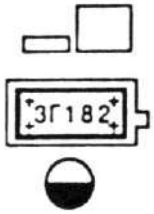

*Внутришлифовальные*




*Хонинговальный*

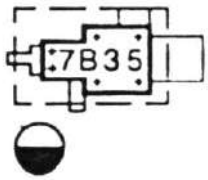



*Бесцентрошлифовальный*

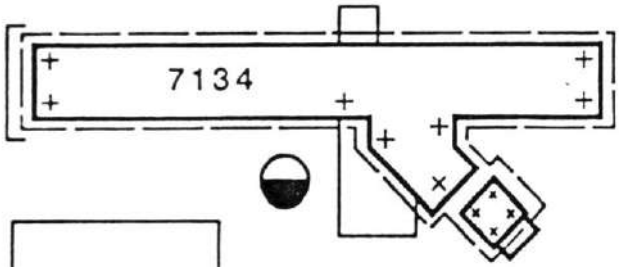



СТРОГАЛЬНЫЕ

*Поперечно*

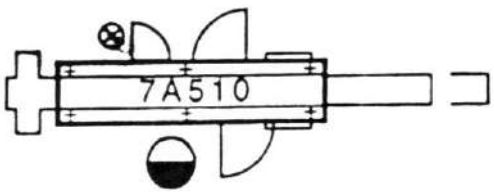



*Продольно*

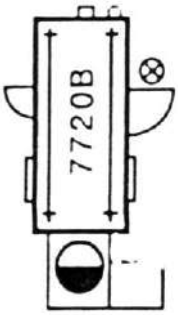



ПРОТЯЖНЫЕ

*Горизонтально*

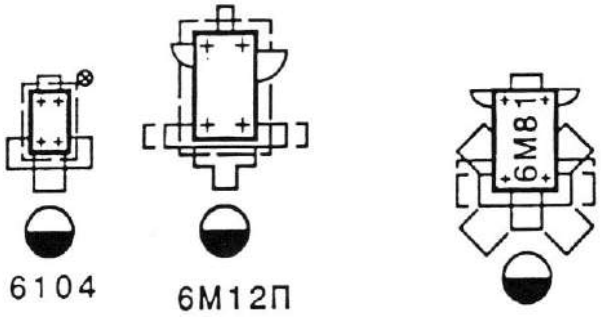



*Вертикально*



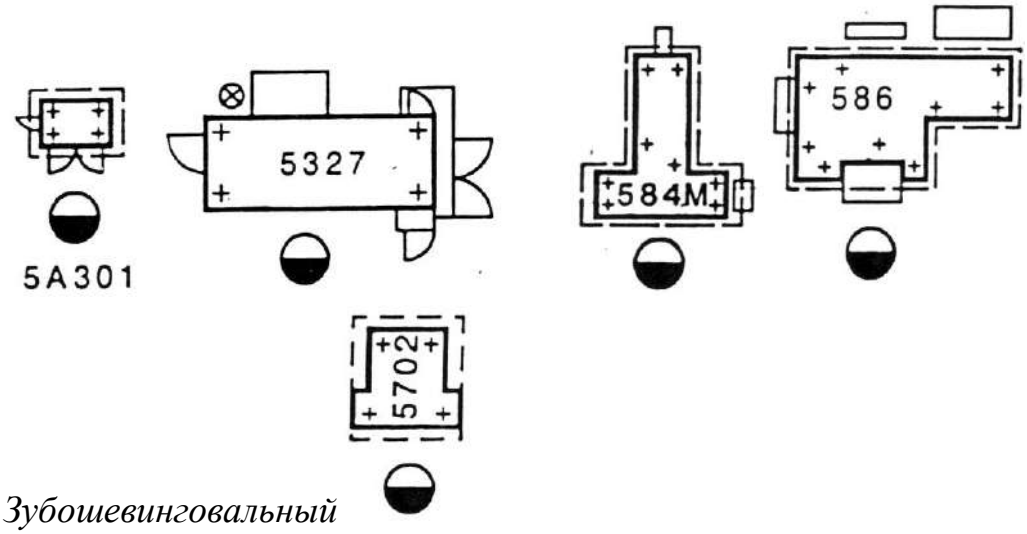
ФРЕЗЕРНЫЕ

*Вертикально* *Консольно*




ЗУБООБРАБАТЫВАЮЩИЕ

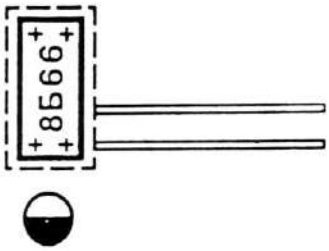
*Зубофрезерные* *Зубошлифовальные*




*Зубошевинговальный*

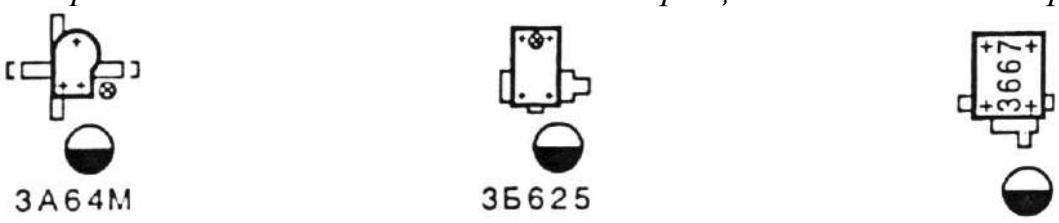
РАЗНЫЕ

*Дисковая пила*




*Станки для заточки инструмента*

*универсально-заточные* *для заточки резцов* *для заточки фрез*



# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Глинникова Т. П., Волегов С. А.* Технология производства горных машин. Часть 1. Справочно-методическое пособие по выполнению технологической части курсового проекта и ВКРИ для студентов специальности 150402 – «Горные машины и оборудование» направления 150400 – «Технологические машины и оборудование» очного и заочного обучения Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2015. 62 с.

2. *Егоров М. Е.* Основы проектирования промышленных предприятий. М.: Машгиз., 1968.

3. *Дмитриев В. Т., Боярских Г. А.* Проектирование технологических процессов восстановления деталей и ремонтных баз горных предприятий: Учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 1994. 140 с.

4. *Мельников Г. Н., Вороненко В. П.* Проектирование механосборочных цехов. Учебник для студентов машиностроит. специальностей вузов / Под ред. А. М. Дальского. -М.: Машиностроение, 1990. 352 с.

5. *СНиП* 10-01-94. Основные положения.

6. *СНиП* 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений.

7. *СНиП* 23-05-95. Естественное и искусственное освещение.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ ..... 3
ЦЕЛЬ РАБОТЫ ..... 4
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ ..... 4
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ ..... 5
1. Разработка технологического процесса изготовления типовой детали ..... 5
2. Расчет потребного оборудования ..... 7
3. Разработка сборочной схемы ..... 8
4. Расчет площадей механосборочного участка ..... 10
5. Рекомендации по планировке механосборочного участка ..... 10
6. Определение технико-экономических показателей цеха ..... 14
ПРИЛОЖЕНИЯ ..... 16
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ..... 21
ОГЛАВЛЕНИЕ ..... 27

### Таблица перевода ОСТ – СЭВ 144-75

| Классы точности | | Квалитет | Обозначение шероховатости | |
|---|---|---|---|---|
| валы | отверстия | | новое | старое |
| 0,7 | | *JT*3 | 0 | ∞ |
| 0,8 | | *JT*4 | 320 | ∇ 1 |
| 1 | 0,9 | *JT*5 | *Rz*160 | ∇ 2 |
| 2 | 1 | *JT*6 | *Rz*80 | ∇ 3 |
| 2 а | 2 | *JT*7 | *Rz*40 | ∇ 4 |
| - | 2 а | *JT*8 | *Rz*20 | ∇ 5 |
| 3 | | *JT*9 | 2,5 | ∇ 6 |
| 3 а | | *JT*10 | 1,25 | ∇ 7 |
| 4 | | *JT*11 | 0,63 | ∇ 8 |
| 5 | | *JT*12 - *JT*13 | 0,32 | ∇ 9 |
| 7 - 8 | | *JT*14 - *JT*15 | 0,16 | ∇ 10 |

Эдуард Викторович Горшков
Денис Иванович Симисинов

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦЕХОВ (УЧАСТКОВ) МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Учебное пособие
по выполнению курсовой работы и специальной части ВКРБ для студентов специализации подготовки – «Оборудование и технологии повышения износостойкости и восстановления деталей машин и аппаратов» (МШС) специальности 15.03.01 – «Машиностроение» очного и заочного обучения

Корректура кафедры эксплуатации горного оборудования

Подписано в печать
Бумага писчая. Формат бумаги 60х84 1/16. Печать на ризографе.
Печ.л.1,75. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ №

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.
Уральский государственный горный университет
Лаборатория множительной техники

Министерство науки и высшего образования РФ
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

# ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Методические указания
по подготовке выпускной квалификационной работы бакалавров, обучающихся
по направлению 15.03.01 «Машиностроение»
очного и заочного обучения

Екатеринбург 2019

УДК 621.7/9 (07)

Требования к выполнению выпускной квалификационной работы бакалавра / Хазин М. Л., Волегов С.А., Симисинов Д.И. Уральский государственный горный университет. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2019 – 32 с.

Приведены методические указания к выпускной работе бакалавра по направлению обучения 15.03.01 «Машиностроение».
Предназначено для студентов, обучающихся по вышеуказанному направлению очной и заочной форм обучения

Подготовлено на кафедре эксплуатации горного оборудования.

Печатается по решению ученого совета Уральского государственного горного университета

**Оглавление**

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ..... 4
2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ ..... 4
2. ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ ..... 5
3.1. Тематика и тема выпускной квалификационной работы ..... 5
3.2. Руководство выпускной квалификационной работой ..... 7
3.3. Составление рабочего плана ..... 8
4. ТРЕБОВАНИЯ К СТРУКТУРНЫМ ЭЛЕМЕНТАМ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ ..... 9
4. 1. Структура выпускной квалификационной работы ..... 9
4.2. Титульный лист ..... 10
4.3. Задание на выполнение выпускной квалификационной работы ..... 11
4.4. Реферат ..... 11
4.5. Оглавление ..... 11
4.6. Обозначения и сокращения ..... 12
4.7. Введение ..... 12
4.8. Литературно-патентный обзор ..... 13
4.9. Основная часть ..... 14
4.10. Экономико-техническое обоснование ..... 16
4.11. Охрана труда и окружающей среды ..... 17
4.12. Заключение ..... 17
4.13. Список используемых источников ..... 18
4.14. Приложения ..... 18
5. ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ ..... 19
6. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ ..... 19
6.1. Пояснительная записка ..... 19
6.2. Графический материал ..... 20
6.3. Спецификация изделия ..... 21
6.4. Правила оформления технологических документов ..... 21
6.5. Оформление демонстрационного материала ..... 22
7. ЗАЩИТА ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ ..... 22

7.1. Подготовка выпускной квалификационной работы к защите ..... 22
7.2. Проверка на плагиат ..... 23
7.3. Предварительная защита ..... 23
7.4. Необходимые документы ..... 24
7.4. Защита выпускной квалификационной работы ..... 24
8. ДОКЛАД И ПРЕЗЕНТАЦИЯ ..... 25
8.1. Доклад ..... 25
8.2. Презентация ..... 26
**8.3. Оценка результата защиты ВКР ..... 27**
8.4. Типичные ошибки при подготовке и оформлении работы ..... 27
Приложение 1. Пример оформления титульного листа на выполнение ВКРБ 29
Приложение 2. ЗАДАНИЕ на выпускную квалификационную работу (ВКР) бакалавра ..... **Ошибка! Закладка не определена.**
Приложение 3. Пример оформления реферата ..... 32
Приложение 4. ОБРАЗЕЦ ЗАЯВКИ РУКОВОДИТЕЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ НА РАЗРАБОТКУ КОНКРЕТНОЙ ТЕМЫ ВКР ..... 33
Приложение 5. Образец оформления первой страницы раздела основной части ..... 34
Приложение 6. Пример оформления последующих листов пояснительной записки ..... 35
Приложение 7. АКТ проверки материалов ВКРб на обнаружения заимствований в работе ..... 36
Приложение 8. Схема обозначения листов в ВКР ..... 37
Приложение 9. Индексация горных машин (изделий) .... **Ошибка! Закладка не определена.**
приложение 10. Вопросы для самоподготовки к защите квалификационных работ ..... 39
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ..... 41

# 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Настоящее учебное пособие устанавливает общие правила подготовки, выполнения и защиты выпускной квалификационной работы бакалавра. Степень «бакалавр» - это академическая степень или квалификация, присуждаемая лицам, освоившим первую ступень образовательной программы высшего образования, свидетельствующая о наличии фундаментальной подготовки по соответствующему направлению и общекультурным, профессиональным и другим компетенциям, прописанным в Федеральном государственном образовательном стандарте высшего образования (ФГОС ВО) и основной образовательной программе (ООП).

Выпускная квалификационная работа (ВКР) служит средством итоговой аттестации выпускников. ВКР бакалавра представляет собой решения конкретных проектно-конструкторских и технологических задач и может базироваться на реальных материалах предприятий и организаций.

За все сведения, изложенные в ВКР, использование фактического материала и другой вспомогательной информации, обоснованность (достоверность) выводов и защищаемых положений автор ВКР несет ответственность. Обнаружение заимствований числового и текстового материала без указания источника является основанием для снижения оценки за ВКР, вплоть до выставления оценки «неудовлетворительно».

# 2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Цели подготовки и защиты ВКР бакалавра:

- определение готовности выпускника к выполнению профессиональных обязанностей;
- подготовка к прохождению следующих ООП ВО: программы подготовки специалиста либо программы подготовки магистра.

Решение задач в процессе выполнения ВКР должно соответствовать современному уровню развития науки и техники, а используемые методики должны отвечать последним разработкам в данной профессиональной области знаний. Особое значение приобретают те ВКР, в

которых содержатся результаты научно-исследовательских работ.

Основными задачами ВКР бакалавра являются:

- проверка уровня усвоения студентами учебного и практического материала по основным дисциплинам;
- теоретическое обоснование и раскрытие сущности профессиональных категорий, явлений и проблем по теме ВКР;
- развитие навыков разработки и представления технической документации.

В процессе работы над ВКР обучающийся должен проявить способности к использованию освоенных компетенций:

- к осмыслению, систематизации, закреплению и расширению полученных теоретических знаний и практических навыков;
- к применению известных приемов и методов решения вопросов, возникающих в процессе выполнения ВКР.

Развитие умений:

- концентрироваться на определенном виде деятельности;
- работать с литературой, а именно: находить необходимые источники информации, перерабатывать информацию, вычленяя главное, анализировать и систематизировать результаты информационного поиска, понимать и использовать идеи и мысли, изложенные в информационных источниках;
- выявлять сущность поставленной перед ним проблемы;
- применять полученные в ходе обучения знания для решения поставленных проектно-конструкторских и технологических задач.

# 3. ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

## 3.1. Тематика и тема выпускной квалификационной работы

Основанием для выбора темы выпускной квалификационной работы может являться:

а) научный интерес студента;

б) связь избранной для исследования проблемы с будущей работой после окончания учебного заведения или с дальнейшим обучением в магистратуре;

в) связь с ранее выполненными курсовыми работами;

г) заявка от руководителя организации (предприятия, учреждения, где студент проходил практику или собирается трудоустраиваться) на разработку конкретной темы ВКР.

Тематика ВКР может быть предложена работодателями и государственными организациями. Избранное направление исследования или тема выпускной квалификационной работы должна соответствовать примерной тематике ВКР бакалавра, предложенной кафедрой, которая, как правило, отражает современные направления теоретических и практических исследований, соответствующих специализации кафедры.

Возможна подготовка и защита ВКР по теме, предложенной обучающимся, в случае обоснованности целесообразности её разработки для практического применения в соответствующей области профессиональной деятельности или на конкретном объекте профессиональной деятельности.

Если работа пишется по тематике, интересной предприятию, то заказ от предприятия готовится на бланке предприятия (организации, фирмы) с указанием ее точных реквизитов, подписями первого руководителя или его заместителей и печатью, удостоверяющей подписи (Прил. 4).

Тема работы после назначения научного руководителя от выпускающей кафедры может уточняться. Окончательный вариант темы утверждается на заседании кафедры.

Тематика ВКР может предусматривать не только индивидуальные работы, но и проекты, выполняемые группой студентов (комплексные, большие по объему задания), что позволяет усилить и индивидуализировать проработку каждой части проекта и в целом повысить технический уровень ВКР. Комплексная ВКР предполагает решение взаимосвязанных задач в рамках одного объекта исследования и может содержать общую теоретико-методическую и/или информационно-аналитическую часть. Для комплексных тем ВКР, выполняемых группой студентов, в техническом задании должен быть четко указан личный вклад студента в разработку. При этом допускается совпадение в содержании работ, но не более чем на 30 %.

Тема ВКР должна:

- соответствовать направлению подготовки бакалавров 15.03.01 «Машиностроение»;
- отвечать современным техническим требованиям;

- учитывать перспективы развития техники и технологии;
- быть актуальной и, по возможности, максимально приближенной к решению реальных задач.

***Типовые темы ВКР(б):***

1. Проектирование участка по восстановлению/изготовлению типовых деталей или изделий.
2. Повышение надежности деталей машин/изделий за счет упрочнения
3. Восстановления работоспособности оборудования.
4. Выявление технологических резервов изготовления группы деталей (корпусных) в условиях конкретного производства.
5. Технологическое оснащение производства и ремонта деталей машин.
6. Текущий ремонт узлов машин и оборудования.
7. Модернизация узлов машин и оборудования.
8. Проектирование передвижной ремонтной мастерской.
9. Разработка технологии повышения износостойкости деталей машин.
10. Конструирование оригинального оборудования (оснастки, приспособления).
11. Технологическая подготовка производства деталей машин/изделий

Объектами тем ВКР являются заданные детали, изделия. Студент имеет право выбрать одну из объявленных тем ВКР или предложить свою, согласовав её с руководителем. При ее рассмотрении кафедра имеет право аргументировано отклонить или, при согласии студента, переформулировать.

Изменение или уточнение темы ВКР возможно до издания приказа по университету. Приказ является основанием для допуска студента к выполнению ВКРБ.

## 3.2. Руководство выпускной квалификационной работой

К руководству ВКР привлекаются преподаватели и научные сотрудники кафедры. Обучающийся вправе самостоятельно выбрать руководителя ВКР из списка, предложенного выпускающей кафедрой. Список, формируемый заведующим кафедрой, вывешивается на информационном стенде кафедры не позднее 6 месяцев до начала

выполнения ВКР.

В обязанности руководителя ВКР бакалавра входит:

- проверка оформления задания с календарным графиком выполнения ВКР (Приложение 2).
- выдача рекомендаций по подбору научно-технической, справочной литературы и иных источников информации по теме ВКР;
- проведение систематических консультаций по содержанию и оформлению ВКР согласно составленному расписанию;
- оказание помощи в выборе методик для решения проектно-конструкторских и технологических задач;
- осуществление систематического контроля хода выполнения ВКР;
- проверка законченной ВКР: оценка степени и качества выполнения разделов ВКР, качества ее оформления;
- проверка готовности выпускника к защите;
- составление отзыва на ВКР бакалавра.

Текущие консультации с руководителем и консультантами проводятся по мере необходимости, но не реже одного раза в неделю. В установленный график консультаций по кафедре руководитель контролирует ход и полноту выполнения календарного плана, делая в нем письменную отметку о результатах контроля.

### 3.3. Составление рабочего плана

План подготовки ВКР включает содержание работы, сроки и ожидаемые результаты, форму их представления и отметку руководителя о выполнении. Рабочий план (оглавление) составляется студентом самостоятельно; он решает, сколько требуется разделов, сколько пунктов будет в составе разделов, как они будут называться. Проект рабочего плана согласовывается с руководителем.

План должен отражать основную идею работы. При составлении плана работы следует определить содержание отдельных глав и сформулировать их название; продумать содержание каждой главы и наметить в виде разделов и параграфов последовательность вопросов, которые будут в ней рассмотрены. Рабочий план не должен ограничивать творческое развитие идеи. Дальнейшие изменения в плане работы могут быть связаны с корректировкой вариантов направления

работы после детального ознакомления с изучаемой проблемой, в связи с отсутствием или недостаточностью исходного материала, выявлением новых данных, представляющих теоретический и практический интерес.

Окончательный вариант плана утверждается руководителем и представляет собой оглавление работы, согласованное со сроками выполнения отдельных ее этапов. Календарный план выполнения работы составляется студентом в течение первой недели согласно учебному плану. Выпускная работа должна быть закончена не позднее, чем за одну неделю до начала защиты.

# 4. ТРЕБОВАНИЯ К СТРУКТУРНЫМ ЭЛЕМЕНТАМ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

## 4. 1. Структура выпускной квалификационной работы

ВКР должна содержать:

- текстовый документ - пояснительную записку;
- технологическую документацию;
- графический материал - демонстрационные плакаты, чертежи и схемы.

Рекомендуемая структура пояснительной записки ВКР бакалавра:

- титульный лист (Прил. 1);
- задание на ВКР (Прил. 2);
- реферат (Прил. 3);
- оглавление;
- введение;
- обозначения и сокращения;
- литературно-патентный обзор;
- основная часть (конструкторская или технологическая);
- экономико-техническое обоснование;
- заключение;
- список используемых источников;
- приложения.

Каждый раздел основной части начинается с нового листа, оформленного согласно установленной форме (Прил. 5);

Примерный объем основных разделов пояснительной записки ВКР приведен ниже (табл. 1).

Таблица 1

**Объем основных разделов пояснительной записки ВКР**

| № п/п | Разделы | Ориентировочный объем в листах | |
|---|---|---|---|
| | | графическая часть | пояснительная записка |
| 1. | Введение | - | 1 ... 2 стр. |
| 3. | Литературно-патентный обзор | 1 ... 2 листа (А1) | 15 … 20 стр. |
| 4. | Основная часть | 2 ... 4 листа (А1) | 25 … 40 стр. |
| 5. | Экономико-техническое обоснование | | 9 … 12 стр. |
| 6. | Охрана труда и окружающей среды | | 5 … 7 стр. |
| ИТОГО: | | 4 … 6 листов (А1) | 60 … 80 страниц текста |

Графический материал служит для наглядного представления основных результатов работы при ее публичной защите. Состав, и содержание графического материала определяются вместе с руководителем в зависимости от характера разрабатываемой темы ВКР.

### 4.2. Титульный лист

Титульный лист является первой страницей работы (на нем номер 1 не проставляется, но учитывается), оформляется согласно Прил. 1 и содержит название темы; фамилию, имя, отчество, специальность и учебную группу студента; фамилию, имя, отчество, ученую степень и ученое звание (должность) руководителя работы.

### 4.3. Задание на выполнение выпускной квалификационной работы

Задание на ВКР оформляется на бланке (Прил. 2), который заполняется печатным способом и содержит необходимые подписи.

### 4.4. Реферат

Реферат - краткая (не более 1000 знаков) характеристика ВКР с точки зрения содержания, назначения и формы.

Реферат должен содержать:

- сведения об объеме пояснительной записки, количестве иллюстраций, таблиц, приложений, использованных источников, листов графического материала;
- перечень ключевых слов от 5 до 15 слов или словосочетаний из текста пояснительной записки, которые в наибольшей мере характеризуют ее содержание и раскрывают сущность работы. Ключевые слова приводятся в именительном падеже и записываются строчными буквами в строку через запятые;
- текст реферата, который должен отражать оформленные в виде структурных частей:
  - объект разработки;
  - цель и задачи работы;
  - методики проведения работы;
  - полученные результаты;
  - рекомендации или итоги внедрения результатов работы;
  - область применения;
  - прогнозные предположения о развитии объекта разработки.

Объем реферата не должен превышать одной страницы.

Пример составления реферата приведен в прил. 3.

### 4.5. Оглавление

Оглавление включает введение, заголовки всех разделов, подразделов, пунктов (если они имеют наименование), заключение, спи-

сок использованных источников и наименования приложений с указанием номеров страниц, с которых начинаются эти элементы.

Материалы, представляемые на технических носителях данных ЭВМ, должны быть перечислены в содержании с указанием вида носителя, обозначения и наименования документов, имен и форматов соответствующих файлов, а также места расположения носителя в пояснительной записке.

### 4.6. Обозначения и сокращения

Данный структурный элемент приводится, если в пояснительной записке необходимо использовать значительное количество (более пяти) обозначений и (или) сокращений.

Запись обозначений и сокращений приводят в порядке их появления в тексте с необходимой расшифровкой и пояснениями:

- сокращения в виде аббревиатур приводят после термина и отделяют от него точкой с запятой;
- сокращения в виде краткой формы термина приводят после термина в скобках и выделяют полужирным шрифтом;
- условные обозначения приводят после термина и выделяют полужирным шрифтом, при этом, после условных обозначений величин приводят обозначения единиц величин, которые отделяют запятой и выделяют полужирным шрифтом.

Допускается приводить без расшифровки общепринятые сокращения, установленные в национальных стандартах и правилами русской орфографии: ЭВМ, НИИ, АСУ, с. - страница, т. е. - то есть и др.

Сокращение русских слов и словосочетаний приводится по ГОСТ Р 7.0.12-2011.

Перечень допускаемых сокращений, используемых в текстовой конструкторской документации, приведен в ГОСТ 2.316.

### 4.7. Введение

Введение представляет краткое изложение основных задач и способов их решения, приводится общая характеристика ВКР.

Во введении:

- конкретизируется объект разработки, обозначенный тематикой ВКР, и область его применения;
- приводятся исходные данные для конструкторско-технологической проработки;
- раскрывается актуальность темы ВКР и характеризуется проблема, к которой относится тема;
- формулируется цель и конкретные задачи работы, намечаются пути и методы решения задач;
- излагаются в краткой форме полученные результаты - теоретическое и практическое значение темы ВКР.

Кроме того, во введении должны быть показаны логика и структура работы, назван объект, на примере которого выполнена работа.

## 4.8. Литературно-патентный обзор

В этом разделе отражается состояние развития техники (рассматриваемой в специальной части), дается ее краткий аналитический обзор.

В обзор необходимо включить известные конструкции механизмов и машин отечественного и зарубежного производства данного типа, анализ их достоинств и недостатков, включая сопоставление технико-экономических показателей, таких как производительность, весовые данные, металлоемкость, энерговооруженность, стоимость машины и себестоимость производства работ этой машиной.

Результат информационного поиска - материал, максимально возможно раскрывающий картину технического и технологического уровней достижений и разработок в области тематики выпускной работы либо смежных областях, а также позволяющий сделать вывод о наличии либо отсутствии подобных проблематике ВКР разработок.

На основе анализа делаются выводы об актуальности тематики ВКР, ставится цель работы, выявляется круг задач, решение которых имеет теоретическое и/или практическое значение, намечаются пути достижения этой цели.

В случае необходимости, результаты литературно-патентного обзора выносятся на плакаты.

## 4.9. Основная часть

Содержание основной части работы может содержать одно из направлений:

*Технологическое направление:*

*Конструкторское направление:*

В отличие от других разделов, полнота и степень детализации которых соответствует эскизно-техническому проекту, настоящий раздел должен выполняться значительно подробнее и соответствовать уровню технического проектирования.

*Конструкторское направление:*

- проектирование оснастки;
- проектирование сборочной единицы;
- модернизация узла.

*Технологическое направление:*

- разработка технологического процесса (изготовления, восстановления и ремонта);
- разработка технологии упрочнения деталей машин.

Разделы основной части включают в себя:

- разработку компоновочно-кинематической схемы проектируемого изделия (механизма, узла, устройства, станка). Разработка компоновочно-кинематической схемы устройств является важнейшим этапом проектирования, т. к. при этом формализуется модель задуманной конструкции, предопределяются общий вид устройства или механизма, компоновка, виды приводов, система управления, связь с внешними устройствами и т. п. На основе компоновочно-кинематической схемы разрабатывается концепция конструкции изделия, заканчивающаяся описанием конструкции и принципа действия изделия.
- Описание конструкции и принципа действия проектируемого изделия.
- Расчет силовых факторов, действующих на проектируемое изделие и возникающих во время его работы, необходим для определения технологических условий работы устройства. К данным факторам относят: движущие силы и моменты, вызванные работой двигателей приводов; силы резания, трения, тяжести, упругости деформируемых звеньев станка, силы взаимодействия в кинематических парах, силы

инерции и моменты инерционных сил и т. п. Данный расчет служит основой для проведения проектировочных и проверочных расчетов: диаметров валов, модулей и чисел зубьев зубчатых передач, шпоночных и шлицевых соединений, долговечности подшипников и т. д.

- Если основная часть предусматривает ремонт узла или детали, то подробно дается описание конструкции применяемых ремонтных приспособлений, их силовой расчет, технология существующего и предлагаемого ремонта. Здесь же делается расчет времени ремонта по существующей и предлагаемой технологии.
- В основной части работы студент по своему выбору или рекомендации руководителя описывает систему технического обслуживания и ремонта горных машин или технологию изготовления детали. Если в разделе разрабатывается система технического обслуживания и ремонта машин, то рассматривается организация технического обслуживания и ремонта технологического оборудования предприятия. Для плановой системы ремонтов рассчитываются графики технического обслуживания (ТО) технологического оборудования и планово-предупредительных ремонтов. Разрабатывается технология восстановления типовой детали.

Основой разработки технологического процесса является рабочий чертеж детали и сборочный чертеж узла, где данная деталь располагается, с указанными техническими требованиями.

Структура раздела включает в себя следующие подразделы:

- определение типа производства и величины партии деталей;
- анализ технологичности конструкции детали при её изготовлении или технического состояния при её восстановлении;
- выбор вида заготовки и способа ее получения или восстановления, разработка чертежа заготовки;
- выбор методов и последовательности обработки каждой поверхности детали (составление технологического маршрута);
- уточнение технологических баз и схем установки заготовки (базирование и закрепление);
- формирование технологических операций и уточнение содержания технологических переходов. Составление карт технологического процесса;
- размерный анализ спроектированного технологического процесса;
- расчет припусков на обработку, промежуточных технологических размеров, размеров заготовки и значений допусков на эти параметры;

- выбор оборудования;
- выбор режущего инструмента, выбор и расчет режимов обработки;
- выбор методов и средств технического контроля параметров детали;
- нормирование технологических переходов, операций;
- проектирование средств технологического оснащения, технологической оснастки;
- выводы;
- технологическая документация (приводится в приложении).

### 4.10. Экономико-техническое обоснование

В экономической части работы студентам предлагается осветить вопросы, касающиеся экономической целесообразности, экономической эффективности и конкурентоспособности разрабатываемого объекта, машины или процесса.

При выполнении ВКР важен вопрос экономической составляющей выполняемых работ. В рамках составления технико-экономического обоснования студенту предлагается выполнить следующие расчеты:

- оценить величину заработной платы и социальных отчислений участников работы;
- оценить затраты, связанные с приобретением необходимого сырья, материалов, комплектующих, полуфабрикатов;
- оценить затраты, связанные с оказанными сторонними организациями услугами;
- оценить затраты, связанные с содержанием и эксплуатацией оборудования используемого при разработке устройства;
- определить величину амортизационных отчислений используемых основных средств;
- оценить накладные расходы;
- рассчитать совокупную величину затрат, связанных с изготовлением изделия.

Для расчета затрат необходимо определить продолжительность каждой работы. Продолжительность работ определяется либо по нормативам (с использованием специальных справочников), либо по факту, либо расчетным путем.

Для расчета затрат продолжительность работ была определена по факту, то есть учитывалось время, фактически затраченное исполнителями на выполнение каждого этапа и работы, результаты представлены в таблице.

Расчеты должны быть основаны на действующих в Российской Федерации налогах и сборах, актуальных нормативах отчислений и стоимости материалов, работ, услуг.

### 4.11. Охрана труда и окружающей среды

В этом разделе рассматриваются вопросы безопасности, органично связанные с технологическими решениями, принятыми в основной части работы, приводится перечень требований к технике безопасности при работе с изделием (механизмом, устройством и т. п.) либо на изделии (на станке и т. д.);

Анализ безопасности и экологичности в процессе разработки, изготовления или эксплуатации (в соответствии с требованием ТЗ);

Раздел по безопасности и экологичности работы должен содержать соответствующий анализ применительно к производству или эксплуатации разрабатываемого узла, устройства, технологической машины или технологического процесса.

Кроме того, рассматриваются вопросы, связанные с созданием комфортных условий на рабочих местах, с разработкой технических решений по борьбе с вредными производственными факторами, имеющими место при работе машин (пыль, газ, шум, вибрация и др.).

В разделе рассматривается влияние проектных решений на загрязнение окружающей среды

### 4.12. Заключение

В заключении подводятся итоги работы, решения поставленных в ней задач и обобщаются полученные результаты. Рассматриваются направления и пути дальнейшего развития темы. Здесь же отмечается практическая ценность работы, область ее настоящего (или возможного) использования

Заключение должно основываться на итоговом качественном сравнении разработанного объекта с уже имеющимися образцами (при наличии таковых) либо на окончательном анализе эффективности внедрения спроектированного объекта.

.

### 4.13. Список используемых источников

Все заимствованные из литературы положения и фактические данные должны снабжаться ссылками на источник информации, полный перечень которых приводится в виде списка используемых источников.

Источники в списке располагают и нумеруют арабскими цифрами в порядке их упоминания в тексте пояснительной записки либо по алфавиту. Номер ссылки приводится в квадратных скобках.

Сведения об источниках приводят в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка». Библиографический список должен содержать, как правило, не менее – 20 наименований.

Библиографический список должен включать использованную в ВКР актуальную учебную литературу, в том числе из электронных и открытых источников, и содержать не менее 20% наименований нормативной документации.

### 4.14. Приложения

В приложения выносятся: техническая и технологическая документация, графический материал большого формата, таблицы большого формата, описания алгоритмов и программ, задач, решаемых на ЭВМ, акты внедрения и т. д.

Приложения размещают как продолжение пояснительной записки на последующих страницах и включают в общую с запиской сквозную нумерацию страниц.

Приложения обозначают в порядке ссылок на них в тексте арабскими цифрами. При наличии только одного приложения, оно обозначается «Приложение ».

Каждое приложение должно начинаться с нового листа и иметь тематический заголовок и обозначение.

В тексте ВКР на все приложения должны быть даны ссылки.
Все приложения должны быть перечислены в оглавлении.

# 5. ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Графическая часть данного раздела должна содержать основные результаты работы. Состав и содержание графического материала определяются вместе с руководителем в зависимости от характера разрабатываемой перечень графического материала:

- компоновочно-кинематическая схема, сборочный чертеж или чертеж общего вида нового узла;
- компоновочно-кинематическая схема, общий вид модернизированного узла, сборочный чертеж модернизированного узла;
- иллюстрации технологического процесса изготовления или восстановления детали;
- рабочий чертеж детали,
- иллюстрации технологического процесса повышения износостойкости детали;
- общий вид и сборочный чертеж технологической оснастки.

На чертежах должны быть даны все сечения и разрезы, по возможности, более полно отражающие все особенности конструкции, сформулированы технические условия, обеспечивающие необходимую точность сборки и правильную работу конструкции в целом.

Общий объем графической части, включая вид машины с расположением механизмов, должен быть в пределах см. п. 4.4.

# 6. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

## 6.1. Пояснительная записка

Реферат оформляется по ГОСТ 7.9-95 (ИСО 214-76) и размещается на отдельной странице. Заголовком служит слово «Реферат»,

расположенное симметрично тексту (прил. 4).

Желательно выполнение пояснительной записки с применением текстового редактора Microsoft Word.

Рекомендуется использовать:

- гарнитура шрифта – Times New Roman;
- размер шрифта – 14;
- межстрочный интервал текста – 1,5;
- выравнивание текста – по ширине.
- размеры полей: левое – 30 мм, правое, верхнее и нижнее – 20 мм;
- абзацный отступ – 1,25 мм.

Текст ВКР выполняет с использованием ПЭВМ на одной стороне листа белой бумаги формата А4, шрифт черного цвета. Пояснительная записка должна быть сшита (переплетена) и иметь обложку.

Номер страницы проставляют в середине верхнего поля листа. Страницы текстового материала следует нумеровать арабскими цифрами, соблюдая сквозную нумерацию по всему документу. Титульный лист текстового документа включается в общую нумерацию страниц. Номер страницы на титульном листе не проставляется.

### 6.2. Графический материал

Графический материал, представленный в виде чертежей, эскизов и схем, характеризующих основные выводы и предложения исполнителя, должен раскрывать и дополнять содержание пояснительной записки.

Состав и объем графического материала определяется заданием на ВКР.

Графический материал, предназначенный для демонстрации при публичной защите работы, оформляется в соответствии с требованиями ЕСКД.

Оформление чертежей деталей и сборочных чертежей должно соответствовать требованиям стандартов ЕСКД.

На сборочных чертежах должны быть указаны:

- габаритные размеры изделия;
- установочные и присоединительные размеры сборочной единицы (прибора, блока, узла и т. п.);
- посадки.

При этом должны быть указаны:

- технические требования, предъявляемые к сборке изделия;
- номера позиций, указанные в спецификации сборочной единицы;
- шифр документации ВКРБ …. ПЗ ВО СБ …

Готовые чертежи подписываются автором и научным руководителем и утверждаются заведующим кафедрой.

### 6.3. Спецификация изделия

Спецификация определяет состав сборочной единицы, комплекса или комплекта и необходима для его изготовления, комплектования конструкторских документов и планирования запуска в производство указанных изделий. Спецификация должна состоять из следующих разделов:

- документация;
- комплексы;
- сборочные единицы;
- детали;
- стандартные изделия;
- прочие изделия;
- материалы;
- комплекты.

Заполнение разделов спецификации - по ГОСТ 2.106.

### 6.4. Правила оформления технологических документов

Технологические документы, разрабатываемые в процессе ВКР, оформляются в соответствии с требованиями стандартов ЕСТД.

К технологическим документам, подлежащим разработке, относятся:

- титульный лист, оформленный в соответствии с прил. 9;
- маршрутная карта - по ГОСТ 3.1404;
- операционные карты механической обработки - по ГОСТ 3.1404;
- карты технологического процесса на изготовление или восстановление деталей;

- карты эскизов - по ГОСТ 3.1105;
- операционные карты технического контроля - по ГОСТ 3.1105;
- другие виды технологических документов (ГОСТ 3.1102-81).

Технологические документы, размещают в приложении и оформляют в виде самостоятельного документа на основе соответствующего стандарта.

### 6.5. Оформление демонстрационного материала

Демонстрационный материал оформляется в виде плакатов, либо в формате электронной презентации.

Демонстрационный материал оформляется в виде плакатов, выполненных карандашом либо с применением графических печатающих устройств. Плакаты выполняются на листах форматов А1-А2.

Электронная презентация оформляется в форматах ppt, jpg, pdf, с отношением сторон 4х3 и графическим разрешением иллюстраций не менее 200 dpi.

Демонстрационный плакат или лист электронной презентации материала должен содержать:

- заголовок;
- необходимые изображения и надписи (рисунки, схемы и т. д.);
- пояснительный текст (при необходимости).

При оформлении демонстрационного материала допускается применение цветных изображений и надписей. Принятые цифровые и цветовые обозначения должны быть расшифрованы.

Нужно согласовать с п. 8.2.

## 7. ЗАЩИТА ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

### 7.1. Подготовка выпускной квалификационной работы к защите

Законченная и оформленная пояснительная записка, и листы графических материалов, подписанные студентом, передаются руководителю на проверку и написания отзыва на ВКР.

Руководитель подтверждает результаты проверки подписью на ти-

тульном листке и готовит отзыв.

Студент должен быть ознакомлен с отзывом руководителя.

Для получения допуска к защите переплетенная пояснительная записка вместе с чертежами передается заведующему кафедрой. Заведующий кафедрой на основании рассмотрения степени соответствия работы требованиям, предъявляемым к ВКР, и письменного отзыва руководителя принимает решение о допуске работы к защите (либо ее отклонении), ставит подпись на титульном листе пояснительной записки.

Студент, не представивший без уважительной причины руководителю в установленный срок ВКР или не явившийся на защиту без уважительной причины, отчисляется из университета за невыполнение учебного плана.

### 7.2. Проверка на плагиат

ВКРб подлежит обязательной проверке на плагиат. Результаты проверки оформляются актом.

Значение слова «плагиат» интерпретируется как присвоение себе чужого результата творческой деятельности, которым может выступать и изобретение, и произведение, и научная работа, и даже идея. Плагиат это заимствования фрагментов из других текстов (произведений) без указания ссылки на автора и заключения чужих материалов в кавычки или иное графическое и синтаксическое выделение.

Чтобы быть допущенным к защите и успешно защитить свою работу, проверьте её перед этим. Для этого следует по приглашению руководителя, высланного на электронную почту студента, посетить сайт AntiPlagiat.ru, разместить файл с ВКР, затем скачать отчет, заполнить акт (приложение 6) и сдать научному руководителю.

Процент уникальности работы не должен быть ниже отметки в 65 % - при таком уровне можно соблюсти как оригинальную подачу текста, так и выполнить требования к оформлению.

### 7.3. Предварительная защита

Завершенная выпускная работа представляется на выпускающую кафедру для предварительной защиты. Руководитель представляет на кафедру письменный отзыв. По результатам этой защиты студент допускается к защите на государственную аттестационную комиссию (ГАК).

### 7.4. Необходимые документы

Документы, необходимые для защиты ВКРБ:

- Переплетенная пояснительная записка с бланком задания;
- отзыв руководителя;
- акт проверки на антиплагиат;
- графическая часть;
- презентация.

Все перечисленные документы сдаются на кафедру на бумажном носителе и в электронном виде (формат pdf).

В ГАК могут быть переданы также и другие материалы, характеризующие научную и практическую ценность выполненной ВКР: печатные статьи студента по теме, патенты, документы, свидетельствующие о практическом применении результатов ВКР, макеты и образцы изделий и т. п.

Рецензия на выпускную работу бакалавра не требуется.

ВКР со всеми подписями, отзывами сдается секретарю ГАК за 3 дня до установленного срока (даты) защиты.

### 7.4. Защита выпускной квалификационной работы

Защита ВКР проводится в установленное время на открытом заседании ГАК, на котором желательно присутствие руководителя ВКР, а также могут присутствовать профессорско-преподавательский состав кафедры, студенты и другие заинтересованные лица.

На защиту ВКР бакалавра отводится **20 минут**. Установлен следующий ориентировочный порядок защиты.

1. Приглашение выпускника на заседание комиссии - **1 минута.**
2. Объявление защиты с указанием ФИО выпускника и темы ВКР (председатель комиссии) - **1 минута**.
3. Доклад выпускника - **10 минут**.

4. Ответы выпускника на вопросы членов комиссии - **7 минут**.
5. Оглашение отзыва руководителя ВКР - **1 минута**.

# 8. ДОКЛАД И ПРЕЗЕНТАЦИЯ

## 8.1. Доклад

Доклад по результатам ВКРб является публичным выступлением перед членами ГАК и присутствующими на открытой защите. Содержание доклада должно быть логичным, последовательным и связанным с представленными наглядными графическими материалами.

Объем доклада должен быть рассчитан не более чем на пять минут выступления, что составляет около четырех страниц стандартного печатного текста.

В докладе должны найти отражение:

• название темы работы, представленной к защите

• цель и задачи исследования;

• актуальность и практическая ценность;

• основная идея работы и наиболее важные выводы с кратким обоснованием.

По структуре доклад можно разделить на три части. Каждая часть представляет собой самостоятельный смысловой блок, хотя в целом они логически взаимосвязаны и отражают содержание проведенного исследования.

В начале доклада студент должен представить работу: «Уважаемый председатель! Уважаемые члены государственной экзаменационной комиссии! Вашему вниманию представляются результаты ВКР на тему: «...».

Первая часть доклада опирается на введение и первую главу ВКР. В этой части характеризуется актуальность выбранной темы и, на основе проведенного анализа предметной области, формулируется цель и задачи исследования.

Вторая, самая большая по объему часть, раскрывает суть основного раздела работы, выносимой на защиту.

В третьей части отмечается экономические результаты, полученные в работе вопросы охраны труда и окружающей среды.

Заключительная часть, может начинаться следующим образом: «В заключение можно сделать следующие выводы 1) ..., 2) ..., 3) ...и т. д.». Таким образом, соискатель, не повторяя частные обобщения, сде-

ланные ранее во время доклада, останавливает свое внимание на принципиальных отличиях полученных им результатов от тех, которые уже известны.

Кроме этого, в заключительной части доклада следует отметить практическую значимость результатов ВКР: «Практическая значимость работы заключается в...», а также апробацию работы (при наличии): «Основные результаты работы доложены... используются... рекомендованы...».

Доклад заканчивается словами: «Доклад окончен. Спасибо за внимание».

## 8.2. Презентация

Презентация состоит из основных результатов работы, графиков, таблиц, чертежей в зависимости от тематики работы представленных на плакатах (формат А1) или в виде слайдов с использованием компьютерного сопровождения доклада в режиме презентации.

Графическая часть должна содержать 4 - 6 листов чертежей или плакатов формата А1.

Все чертежи (к плакатам это не относится) выполняются в соответствии со стандартами ЕСКД. Технологическая документация требует соблюдения стандартов ЕСТД и приводится в приложении. Готовые чертежи подписываются автором и научным руководителем и утверждаются заведующим кафедрой.

Допускается проведение защиты в форме компьютерной презентации с представлением комплектов графических материалов в формате А4 на бумажном носителе, оформленных в соответствие с требованиями ГОСТ. При этом число комплектов должно соответствовать количеству членов комиссии.

Ответы выпускника на вопросы членов комиссии - **7 минут**.

Члены ГАК имеют право задавать вопросы, связанные, как непосредственно с темой ВКР, так и с проверкой уровня усвоения выпускником учебного и практического материала по естественнонаучным, общепрофессиональным и специальным дисциплинам.

На вопросы следует давать четкие и краткие ответы, строго по содержанию вопроса.

Оглашение отзыва руководителя ВКР - **1 минута**.

## 8.3. Оценка результата защиты ВКР

Государственная экзаменационная комиссия формулирует комплексную оценку уровня подготовки выпускников и соответствия их подготовки требованиям ФГОС ВО; выносит решение об оценке выпускной квалификационной работы («отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно»); дает рекомендации по продолжению обучения в магистратуре; рекомендует выпускную квалификационную работу к внедрению и публикации результатов исследования.

Итоговая оценка выводится как среднеарифметическое оценок, за уровень доклада и степень раскрытия темы, за полноту ответов на вопросы, оценку руководителя ВКР бакалавра.

Результат защиты ВКР и решение о присвоении квалификации выпускнику оформляются в зачетную книжку. Результаты зашиты ВКР объявляются выпускникам в тот же день, после оформления протоколов.

Выпускник, не защитивший выпускную квалификационную работу (получивший на защите оценку «неудовлетворительно»), может быть допущен к защите повторно не ранее, чем через год. ГАК решает, может ли студент представить к повторной защите ту же работу с доработкой, определяемой комиссией, или же обязан выполнить работу по новой теме. Повторная защита допускается один раз.

Выпускнику, не прошедшему защиту ВКР по уважительной причине (по медицинским показаниям или в других исключительных случаях, документально подтвержденных), предоставляется возможность пройти защиту без отчисления из университета.

Выпускник, не прошедший защиту ВКР, отчисляется из университета и получает по личному заявлению академическую справку о неполном высшем образовании. Повторная защита ВКР назначается при восстановлении в университете.

## 8.4. Типичные ошибки при подготовке и оформлении работы

К наиболее типичным ошибкам при подготовке и оформлении ра-

боты следует отнести:

-цель и задачи не обоснованы критическим анализом литературы;

-на приводятся принятые при исследованиях допущения;

-отсутствуют данные по оценке достоверности полученных результатов наблюдений;

-отсутствуют или поверхностны выводы по отдельным главам диссертации;

-общие выводы не соответствуют поставленным цели и задачам работы;

-нарушается нумерация страниц, рисунков и таблиц;

-не всегда делаются ссылки на источники, из которых взята информация;

-отсутствуют ссылки на публикации автора работы;

-нет ссылок на Приложения;

-небрежное оформление (грамматические и стилистические ошибки.

Значительное количество недостатков и ошибок можно избежать, придерживаясь требований и рекомендаций, изложенных в предлагаемом пособии. Содержание пособия поможет магистранту ориентироваться в значительном числе вопросов, которые могут возникнуть в процессе подготовки, оформления и защиты диссертации, и позволит в должной мере реализовать свои знания и творческие возможности.

**Приложение 1**

**Пример оформления титульного листа на выполнение ВКРБ**

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Пример оформления титульного листа на выполнение ВКРБ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

Кафедра Эксплуатации горного оборудования

# ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

**по специальности** 15.03.01 – «Машиностроение»
**профиль** Производство и реновация машин и оборудования
**на тему**_____

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Заведующий кафедрой ЭГО _____ к.т.н. Д. И. Симисинов

Руководитель работы_____

Студент гр. МШС – _____

Екатеринбург 2018

**Приложение 2**

Министерство науки и высшего образования РФ
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

Кафедра эксплуатации горного оборудования

Факультет горно-механический
Специальность 15.03.01 «Машиностроение»
Профиль «Производство и реновация машин и оборудования»

«Утверждаю»
заведующий кафедрой ЭГО
_____Д. И. Симисинов
«____» _____20___г.

# ЗАДАНИЕ
# на выпускную квалификационную работу (ВКР) бакалавра

**Студенту**_____
(фамилия, имя, отчество полностью)

**Тема ВКР:** _____
_____
_____
_____

**2. Срок сдачи студентом ВКР бакалавра** «____»_____20___г.

**3. Исходные данные** _____
_____
_____
_____

**4. Содержание пояснительной записки:**
1) **Введение**: объект разработки; область его применения; исходные данные (источник информации); актуальность темы ВКР; цель и конкретные задачи работы, пути и методы решения задач
2) **Общая часть**
2.1) Литературно-аналитический обзор _____
_____
2.2) Специальный раздел _____
_____
_____
_____
_____
2.3) Техника безопасности _____
2.4) Экономическо-техническое обоснование _____
_____

_____

3) **Заключение**: в краткой форме излагаются полученные результаты

**5. Графические материалы**:_____
_____
_____
_____
_____
_____
_____

**6. Ф.И.О. руководителя ВКР**_____

**Ученая степень _____ ученое звание _____**

**7. График выполнения ВКР бакалавра**

| Наименование раздела | Срок выполнения |
|---|---|
| Литературно-аналитический обзор | |
| Специальный раздел | |
| Техника безопасности | |
| Экономическо-техническое обоснование | |

**Дата выдачи задания «_____»_____20_____г.**

**Руководитель ВКР бакалавра _____**

(подпись)

**Задание по ВКР бакалавр получил _____**

(подпись)

*Примечание:* Задание оформляется в двух экземплярах, один из которых хранится на кафедре, другой – выдается студенту и подшивается к пояснительной записке

*Примечание:* Задание оформляется в двух экземплярах, один из которых хранится на кафедре, другой – выдается студенту и подшивается к пояснительной записке

**Приложение 3**

**Пример оформления реферата**

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 65 с., 22 рисунка,
5 таблиц, 23 источника, 3 приложения, 5 л. графич. материала.

Ключевые слова: ЛЕНТОЧНЫЕ ПИЛЫ, ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ЗАТОЧКИ ПИЛ, ОБОРУДОВАНИЕ, КИНЕМАТИЧЕСКИЙ И СИЛОВОЙ РАСЧЕТЫ

Объектом исследования является оборудование для заточки ленточных пил.

Цель работы - разработка станка для заточки ленточных пил.

В процессе работы проведены теоретические исследования существующих конструкций заточных станков, сделан сравнительный анализ их достоинств и недостатков.

В результате исследования предложены оптимальные параметры проектируемого оборудования, разработана компоновочно-кинематическая схема, проведены кинематический и силовой расчеты приводов станка.

Эффективность спроектированного оборудования определяется высокой производительностью на основе полной автоматизации заточки ленточных пил и быстрой переналадки на другой профиль зуба пилы.

**Приложение 4**

**ОБРАЗЕЦ ЗАЯВКИ РУКОВОДИТЕЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ НА РАЗРАБОТКУ КОНКРЕТНОЙ ТЕМЫ ВКР**

*Фирменный бланк организации*
*с указанием номера и даты*
*исходящего документа*

Ректору СТИУ
доктору экон. наук профессору
Авакову С.Ю.

ООО «Ридан», (347900, Ростовская область, г.Таганрог, ул. Чехова, 112, тел. _____, факс _____) просит Вас направить в нашу организацию студента группы М-12 Иванова Ивана Ивановича для прохождения преддипломной практики и разработки выпускной квалификационной работы на тему «Направления совершенствования производительности труда на предприятии».
Руководителем практики от организации назначается заместитель директора Петрова Марина Павловна.

Директор В.М. Сидоров

Печать

**Приложение 5**

**Образец оформления первой страницы раздела основной части**

СОДЕРЖАНИЕ


1. Анализ технического состояния детали
2. Анализ дефектов и оценка пригодности детали
   2.1. Дефект №1
   2.2. Дефект №2
   2.3. Дефект №3
3. Выбор рациональных способов восстановления детали
   3.1. Выбор по технологическому критерию
   3.2. Выбор по техническому критерию
   3.3. Выбор по технико-экономическому критерию
   3.4. Окончательный выбор способа восстановления детали
4. Разработка технологического маршрута восстановления детали
5. Расчет припусков
6. Выбор оборудования, приспособлений, инструмента
   6.1. Выбор оборудования
   6.2. Выбор приспособлений
   6.3. Выбор инструмента
7. Расчет режимов обработки
   7.1. Предварительная механическая обработка
   7.2. Электрохимическое хромирование
   7.3. Механическая обработка
8. Нормирование операций
   8.1. Токарная обработка
   8.2. Наплавочная
   8.3. Токарная обработка
   8.4. Фрезерная обработка
9. Технологическая документация
10. Литература


| | | | | | ВКРБ МШС 012 025 ПЗ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | | | |
| Разработал | | Пушкин В.Л. | | | Разработка технологического процесса восстановления вала | Лит. | Лист | Листов |
| Руководитель | | Зверев Р.Г. | | | | | 2 | 36 |
| Консультант | | Волков А.С. | | | | УГГУ гр. МШС –12 | | |
| Н. Контр. | | Схиртладзе П.В. | | | | | | |
| Утвердил | | Симисинов Д.И. | | | | | | |

**Приложение 6**

**Пример оформления последующих листов пояснительной записки**

**1. Анализ технического состояния детали**

Заданная деталь представляет собой вал-шестерню.

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | ВКРБ МШС 012 025 ПЗ | Лист |
| Изм | Лист | №документа | Подпись | Дата | | |

**Приложение 7**
Утверждаю
Зав. кафедрой ЭГО
_____
«___»_____201__ г.

**АКТ**

**проверки материалов ВКРб на обнаружения заимствований в работе**

_____ на тему _____
фамилия и. о. студента бля наименование работы
нашел!:)

При проверке ВКРб на предмет заимствований, проведенной в системе AntiPlagiat.ru с аккаунтом _____, значение итоговой оценки
имя аккаунта
оригинальности текста диссертации составляет XX,X %.

По результатам физического сличения соответствующих текстов работы и выявленных источников заимствований, представленных в форме их первоначального опубликования, установлено, что установленные проверкой факты заимствования относятся к случаям:

- упоминания в тексте ВКРб определений различных понятий, являющихся в соответствующих отраслях наук обще употребляемыми, названий нормативных правовых актов и официальных документов, наименований государственных и иных официальных органов, и организаций, в том числе их официально установленных статусов и т. д. _____ %; -убрать? Все равно не посчитать!
- цитирования или использования автором в тексте ВКРб текстов нормативных правовых актов или официальных документов _____ %;
- цитирования автором в тексте ВКРб собственных работ, выполненных ранее, в том числе в соавторстве, работ иных исследователей с указанием источников заимствования _____ %.

Приложение: Сгенерированный системой отчет о результатах проверки документа.

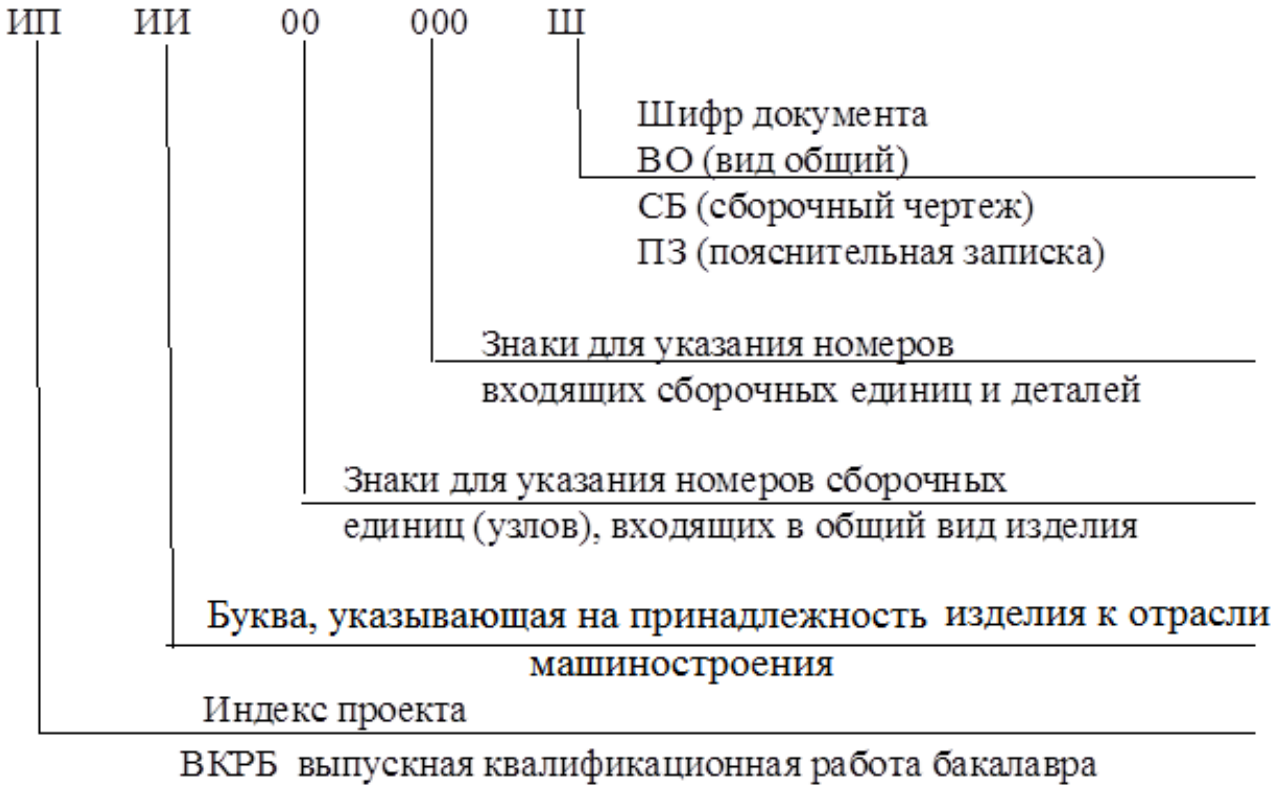
Дата проведения проверки «___»_____201__ г.

Студент _____ _____
подпись фамилия и. о.

Научный руководитель,
доцент к. т. н. _____ _____
подпись фамилия и. о.

**Приложение 8**

**Схема обозначения листов в ВКР**




Пример:

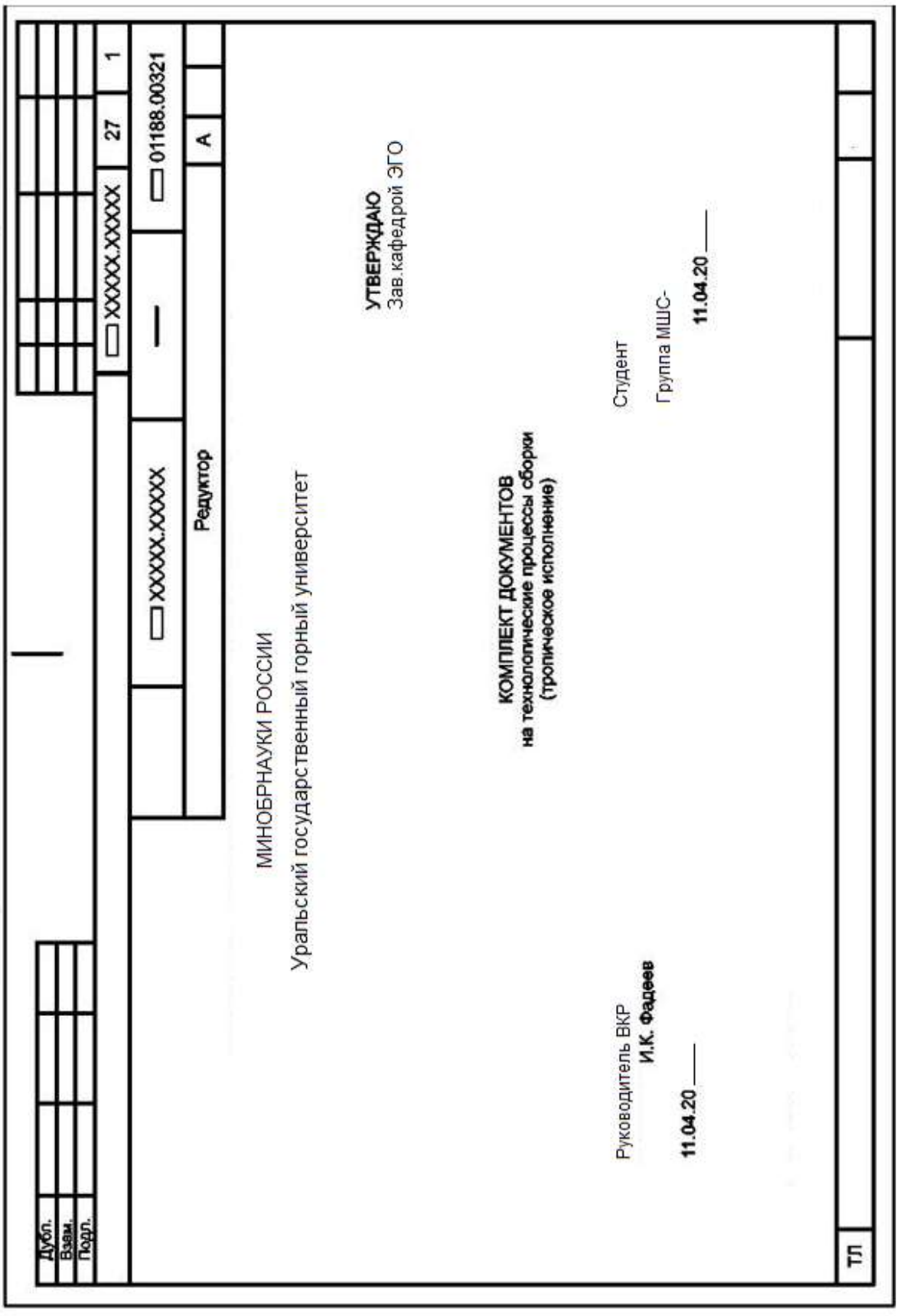
ВКРБ ЭО 00 000 СБ

ВКРБ выпускная квалификационная работа бакалавра
ЭО – Экскаваторы одноковшовые универсальные
СБ - Сборочный чертеж

А МШС откуда на предыдущей с.?

**Приложение 9**

**Титульный лист технологической документации**



**Приложение 9**

## Вопросы для самоподготовки к защите квалификационных работ

1. Принцип работы узла, машины.
2. Ваш вклад в рассматриваемой работе.
3. Что нового в организации ремонта?
4. Что является основанием для проведения ремонта?
5. Маркировка сталей и других конструкционных материалов.
6. Обозначение и расшифровка полей допусков и посадок.
7. Шероховатость *Rz, Ra* – в чем отличие.
8. Маркировка смазок, их свойства и их применимость - индекс вязкости.
9. Виды сварок назначение обмазки и флюса, их состав.
10. Обоснование рода тока при сварке и наплавке.
11. Обоснование выбора способа сварки, наплавки.
12. Системы ремонта их обоснование и выбор
13. Методы ремонта и их применимость
14. Обозначение твердости материала по Роквеллу и Бриннелю.
15. Виды термообработки и их назначение.
16. Предел выносливости.
17. Как определяется остаточный ресурс машины (детали)?
18. Что является основанием для текущего или капитального ремонтов?
19. Как и когда испытываются стропы?
20. Каким образом обосновывается эффективность внедрения новой техники?
21. Техника безопасности при обслуживании машины, рассматриваемой в проекте.
22. Обоснование выбора инструмента для резания металлов.
23. Обоснование выбора способа восстановления деталей машин.
24. Какие показатели надежности определены и улучшены в работе?
25. Какие виды термообработки механической обработки и упрочнения деталей применены в работе?
26. Как изменяется продолжительность ремонтных циклов с увеличением времени работы машины?
27. Как изменяется себестоимость капитального ремонта с увеличением срока службы машины?
28. Какие организационно-технические мероприятия необходимы для перехода от системы ППР к системе ремонта по фактическому состоянию?
29. Какие показатели эффективности ремонта наиболее полно отображает заинтересованность ремонтного персонала в повышение качества ремонта?
30. Для какой стадии эксплуатации машины устанавливают гарантийный срок службы, и какие данные необходимы для его определения?
31. Чем отличается технологический регламент эксплуатации машины с истекшим сроком службы от машины с неистекшим сроком службы?

32. Каким документом регламентируются ремонтные работы на опасных объектах технологического оборудования?
33. Какие сведения содержит ремонтный чертеж?
34. Как определены предельно допустимые размеры по износу ремонтируемой детали?
35. Какова кратность и периодичность применения ремонтируемой (изготавливаемой) детали и каков их расход за ремонтный цикл и за срок службы?
36. Каким способом подтверждено соответствие ресурса детали периодичности ремонтов в графике ППР?
37. Как изменяется периодичность ремонтов и фактический ресурс деталей с увеличением числа ремонтов?
38. В чем состоят недостатки оценки эффективности ремонтов по их абсолютной стоимости?
39. На какие физико-механические свойства металла восстанавливаемой (изготавливаемой) детали влияет каждый элемент маркировки?
40. К каким изменениям технологичности и ремонтопригодности приведет переход на другой способ получения заготовки?
41. Какие показатели ремонтопригодности улучшены в работе?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дмитриев В. Т., Боярских Г. А.* Проектирование технологических процессов восстановления деталей и ремонтных баз горных предприятий: (Учебное пособие) - 2-е изд., стереотипное - Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2001 - 140 с.

2. *Глинникова Т. П., Волегов С. А*. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ГОРНЫХ МАШИН Часть.1. Технологическая часть ВКРИ справочно-методическое пособие по выполнению технологической части КП и ВКРИ для студентов специальности 150402 - «Горные машины и оборудование» направления 150400 - «Технологические машины и оборудование» очного и заочного обучения Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2005 - 80 с.

3. *Симисинов Д. И., Куклин Л. Г.* ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ГОРНЫХ МАШИН. Часть 2: Справочно-методическое пособие по выполнению технологической части курсового проекта, ВКРИ и самостоятельной работы для студентов специальности 150402 - «Горные машины и оборудование» (ГМО) направления 150400 - «Технологические машины и оборудование» очное и заочное обучения. Екатеринбург: УГГУ, 2006. 24 с.

4. *Глинникова Т. П., Волегов С. А.* ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ БАКАЛАВРА, ИНЖЕНЕРА И КУРСОВОГО ПРОЕКТА: справочно-методическое пособие./ Т. П. Глинникова, С. А. Волегов. - Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2008 – 54 с.

5. *Хазин М. Л., Волегов С. А.* ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН: учебное пособие по курсовой работе Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2015. 80 с.

6. *Глинникова Т. П., Волегов С. А.* ИЗУЧЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И ВЫБОР РЕЖИМА РЕЗАНИЯ. Часть 1: Пособие по выполнению самостоятельных работ по дисциплине «Технология конструкционных материалов» для студентов специальности 150402 - «Горные машины и оборудование» и направления (ГМО) 150400 - «Технологические машины и оборудование» для студентов очного и заочного обучения. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2006. 112 с.

8. *Глинникова Т. П., Волегов С. А.* ИЗУЧЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И ВЫБОР РЕЖИМА РЕЗАНИЯ. Часть 2: Пособие по выполнению самостоятельных работ по дисциплине «Технология кон-

струкционных материалов» для студентов специальности 150402 - «Горные машины и оборудование» и направления (ГМО) 150400 - «Технологические машины и оборудование» для студентов очного и заочного обучения. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2006. 72 с.

10. ГОСТ 7.9-95 (ИСО 214-76). Система стандартов по информации библиотечному и издательскому делу (реферат и аннотация). Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 6 с.

Симисинов Д.И., Боярских Г.А. Технология машиностроения. Учебное пособие. Урал. гос. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2018. – 326 с.

# ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Методические указания
по подготовке выпускной квалификационной работы бакалавров, обучающихся
по направлению 15.03.01 «Машиностроение»
«Производство и реновация машин и оборудования»

Учебное пособие

Редактор В. В. Баклаева

Компьютерная верстка авторов
Подписано в печать Бумага писчая. Формат 60 х 84 1/16
Печать на ризографе. Печ. л. . Уч.-изд. Тираж 100. Заказ

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ