

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования**  
**«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»**

Кафедра металлорежущих станков и инструментов

Составитель  
С. А. Рябов

## **ОБОРУДОВАНИЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

### **Методические материалы**

Рекомендовано учебно-методической комиссией направления  
подготовки 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств  
в качестве электронного издания  
для использования в образовательном процессе

Кемерово 2020

**Рецензенты**

Коротков А. Н. – доктор технических наук, зав. кафедрой металлорежущих станков и инструментов;

Шатько Д. Б. – кандидат технических наук, доцент кафедры металлорежущих станков и инструментов

**Рябов Сергей Александрович**

**Оборудование машиностроительных производств** : методические материалы для обучающихся направления подготовки 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, профиль Технология машиностроения, всех форм обучения / сост. : С. А. Рябов ; Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева. – Кемерово, 2020. – Текст : электронный.

Приведено содержание лабораторных занятий по дисциплине, рекомендуемая литература.

© Кузбасский государственный  
технический университет

имени Т. Ф. Горбачева, 2020

© Рябов С. А., составление, 2020

## **Лабораторная работа № 1**

# **ТИПОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ**

### **1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Цель работы: научиться читать кинематические схемы металлорежущих станков.

Содержание: ознакомление с основными условными обозначениями для кинематических схем металлорежущих станков, изучение конструкций, принципов действия типовых механизмов металлорежущих станков и особенностей их применения в металлорежущих станках.

### **2. ПОРЯДОК РАБОТЫ**

1. Ознакомиться с основными условными обозначениями для кинематических схем.

2. Изучить принципы работы типовых приводов и механизмов металлорежущих станков:

- для регулирования бесступенчатого изменения скорости вращения;
- для регулирования ступенчатого изменения скорости вращения;
- для реверсирования движения;
- для прямолинейного поступательного движения;
- для получения прерывистых движений;
- для предохранения привода станка от перегрузок;
- планетарных механизмов.

### **3. ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ**

В металлорежущих станках движения формообразования, установочные, делительные и вспомогательные движения осуществляются посредством соответствующих механизмов.

Совокупность механизмов, передающих движение от задающего устройства к исполнительному называется кинематической цепью металлорежущего станка.

Условное изображение кинематической цепи металлорежущего станка на плоскости называется кинематической цепью металлорежущего станка.

На рис. 3.1 приведены наиболее употребительные в станкостроении условные обозначения кинематических схем:

- 1 – общее обозначение двигателя без уточнения типа;
- 2 – общее обозначение электродвигателя;
- 3 – электродвигатель на лапах;
- 4 – электродвигатель фланцевый;
- 5 – электродвигатель встроенный;
- 6 – вал, ось, стержень, шатун и т. п.;
- 7 – конец шпинделя для центровых работ;
- 8 – конец шпинделя для патронных работ;
- 9 – конец шпинделя для работ с цанговым патроном;
- 10 – конец шпинделя для сверлильных работ;
- 11 – конец шпинделя для расточных работ с планшайбой;
- 12 – конец шпинделя для фрезерных работ;
- 13 – конец шпинделя для кругло, плоско и резьбошлифовальных работ;
- 14 – ходовой винт для передачи движения;
- 15 – неразъемная маточная гайка скольжения;
- 16 – неразъемная маточная гайка с шариками;
- 17 – разъемная маточная гайка скольжения;
- 18 – радиальный подшипник без уточнения типа;
- 19 – радиально-упорный односторонний подшипник без уточнения типа;
- 20 – радиально-упорный двусторонний подшипник без уточнения типа;
- 21 – упорный односторонний подшипник без уточнения типа;
- 22 – упорный двусторонний подшипник без уточнения типа;
- 23 – радиальный подшипник скольжения;
- 24 – радиальный самоустанавливающийся подшипник скольжения;
- 25 – радиально-упорный односторонний подшипник скольжения;
- 26 – радиально-упорный двусторонний подшипник скольжения;
- 27 и 28 – упорные односторонние подшипники скольжения;
- 29 и 30 – упорные двусторонние подшипники скольжения;
- 31 – радиальный подшипник качения (общее обозначение);

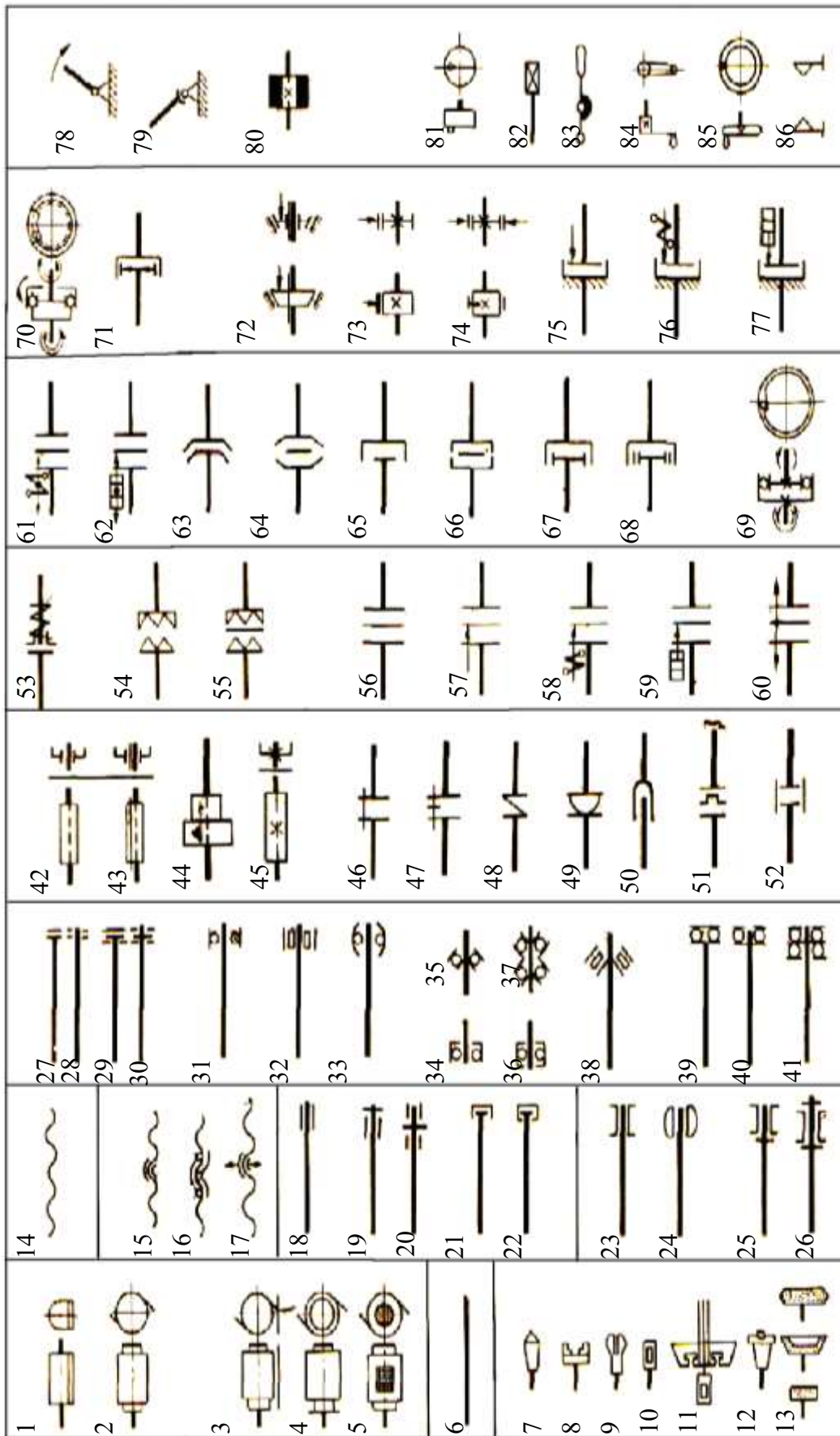


Рис. 3.1. Условные обозначения на кинематических схемах

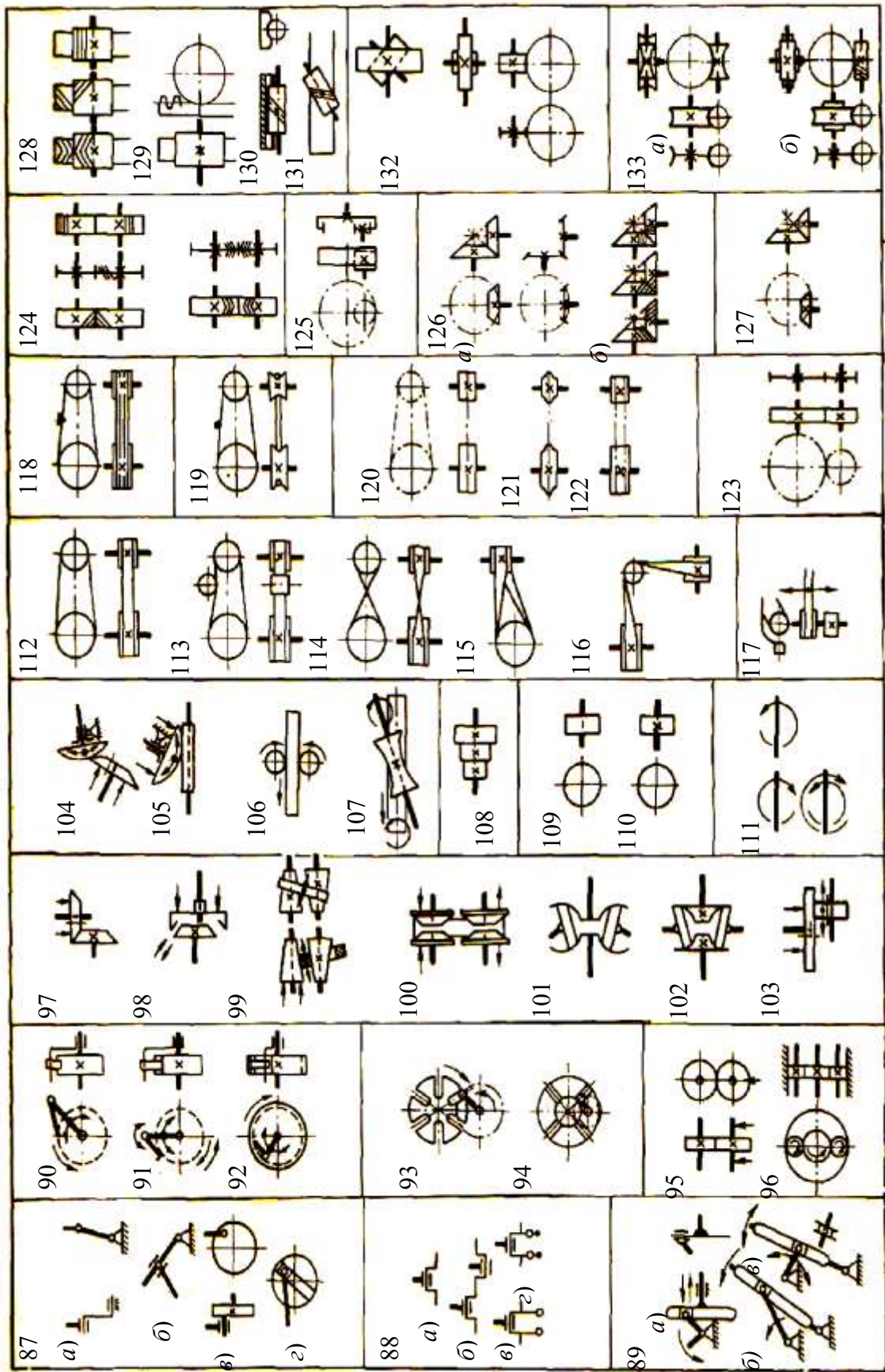


Рис. 3.1. Продолжение

- 32 – радиальный роликовый подшипник;
- 33 – радиальный самоустанавливающийся подшипник качения;
- 34 и 35 – радиально-упорные односторонние подшипники качения;
- 36 и 31 – радиально-упорные двусторонние подшипники качения;
- 38 – радиально-упорный роликовый односторонний подшипник;
- 39 и 40 – упорные односторонние подшипники качения;
- 41 – упорный двусторонний подшипник качения;
- 42 – свободное для вращения соединение детали с валом;
- 43 – подвижное вдоль оси соединение детали с валом;
- 44 – соединение детали с валом посредством вытяжной шпонки;
- 45 – глухое, неподвижное соединение детали с валом;
- 46 – глухое жесткое соединение двух соосных валов;
- 47 – глухое соединение валов с предохранением от перегрузки;
- 48 – эластичное соединение двух соосных валов;
- 49 – шарнирное соединение валов;
- 50 – телескопическое соединение валов;
- 51 – соединение двух валов посредством плавающей муфты;
- 52 – соединение двух валов посредством зубчатой муфты;
- 53 – соединение двух валов предохранительной муфтой;
- 54 – кулачковая односторонняя муфта сцепления;
- 55 – кулачковая двусторонняя муфта сцепления;
- 56 – фрикционная муфта сцепления (без уточнения вида и типа);
- 57 – фрикционная односторонняя муфта (общее обозначение);
- 58 – фрикционная односторонняя электромагнитная муфта;
- 59 – фрикционная односторонняя гидравлическая или пневматическая муфта (общее обозначение);
- 60 – фрикционная двусторонняя муфта (общее обозначение);
- 61 – фрикционная двусторонняя электромагнитная муфта;
- 62 – фрикционная двусторонняя гидравлическая или пневматическая муфта (общее обозначение);
- 63 – фрикционная конусная односторонняя муфта;
- 64 – фрикционная конусная двусторонняя муфта;
- 65 – фрикционная дисковая односторонняя муфта;
- 66 – фрикционная дисковая двусторонняя муфта;
- 67 – фрикционная муфта с колодками;
- 68 – фрикционная муфта с разжимным кольцом;
- 69 – самовыключающая односторонняя муфта обгона;
- 70 – самовыключающая двусторонняя муфта обгона;

- 71 – самовыключающая центробежная муфта;
- 72 – тормоз конусный;
- 73 – тормоз колодочный;
- 74 – тормоз ленточный;
- 75 – тормоз дисковый;
- 76 – тормоз дисковый электромагнитный;
- 77 – тормоз дисковый гидравлический или пневматический;
- 77 – тормоз дисковый гидравлический или пневматический;
- 78 – шарнирное соединение стержня с неподвижной опорой с движением только в плоскости чертежа;
- 79 – соединение стержня с опорой шаровым шарниром;
- 80 – маховик, жестко установленный на валу;
- 81 – эксцентрик, установленный на конце вала;
- 82 – конец вала под съемную рукоятку;
- 83 – рычаг переключения;
- 84 – рукоятка, закрепленная на конце вала;
- 85 – маховичок, закрепленный на конце вала;
- 86 – передвижные упоры;
- 87, *а* и 87, *в* – шарнирное соединение кривошипа постоянного радиуса с шатуном;
- 87, *б* и 81, *г* – шарнирное соединение кривошипа переменного радиуса с шатуном;
- 88, *а* – шарнирное соединение одноколейного вала с шатуном;
- 88, *б* – шарнирное соединение многоколенного вала с шатуном;
- 88, *в* – коленвал с жестким противовесом;
- 88, *г* – коленвал с маятниковым противовесом;
- 89, *а* – кривошипно-кулисный механизм с поступательно движущейся кулисой;
- 89, *б* – кривошипно-кулисный механизм с вращающейся кулисой;
- 89, *в* – кривошипно-кулисный механизм с качающейся кулисой;
- 90 – односторонний храповой зубчатый механизм с наружным зацеплением;
- 91 – двусторонний храповой зубчатый механизм с наружным зацеплением;
- 92 – односторонний храповой зубчатый механизм с внутренним зацеплением;
- 93 – мальтийский механизм с радиальным расположением пазов с наружным зацеплением;



- 94 – мальтийский механизм с радиальным расположением пазов с внутренним зацеплением;
- 95 – фрикционная передача с цилиндрическими роликами наружного зацепления (контакта);
- 96 – фрикционная передача с цилиндрическими роликами внутреннего зацепления (контакта);
- 97 – фрикционная передача с коническими роликами наружного зацепления;
- 98 – регулируемая фрикционная передача с коническими роликами внутреннего зацепления;
- 99 – регулируемая фрикционная передача с коническими шкивами и промежуточным кольцом;
- 100 – регулируемая фрикционная передача с подвижными коническими шкивами и клиновым ремнем;
- 101 – регулируемая фрикционная передача с тороидными шкивами и поворотными сферическими роликами;
- 102 – регулируемая фрикционная передача с полутороидными шкивами (типа Светозарова);
- 103 – регулируемая торцовая фрикционная передача;
- 104 – регулируемая фрикционная передача со сферическими и коническими роликами;
- 105 – регулируемая фрикционная передача со сферическими и цилиндрическими роликами;
- 106 – фрикционная передача с цилиндрическими роликами;
- 107 – фрикционная передача с гиперболоидными роликами;
- 108 – шкив ступенчатый, закрепленный на валу;
- 109 – шкив холостой на валу;
- 110 – шкив рабочий, закрепленный на валу;
- 111 – указатели вращения вала соответственно: по часовой стрелке, против часовой стрелки и в обе стороны;
- 112 – открытая передача плоским ремнем;
- 113 – открытая передача плоским ремнем с натяжным роликом;
- 114 – перекрестная передача плоским ремнем;
- 115 – полуперекрестная передача плоским ремнем;
- 116 – угловая передача плоским ремнем;
- 117 – отводка ремня плоскоременной передачи;
- 118 – передача клиновидными (текстурными) ремнями;
- 119 – передача круглым, ремнем или шнуром;
- 120 – общее обозначение цепной передачи без уточнения типа;

- 121 – роликовая цепная передача;
- 122 – бесшумная (зубчатая) цепная передача;
- 123 – цилиндрическая зубчатая передача с внешним зацеплением (общее обозначение);
- 124 – цилиндрическая зубчатая передача с внешним зацеплением между параллельными валами, соответственно с косыми, прямыми и шевронными зубьями;
- 125 – цилиндрическая зубчатая передача с внутренним зацеплением между параллельными валами (общее обозначение);
- 126, *a* – коническая зубчатая передача между пересекающимися валами (общее обозначение без уточнения типа);
- 126, *б* – коническая зубчатая передача соответственно с прямыми, спиральными и круговыми зубьями;
- 127 – коническая гипоидная зубчатая передача;
- 128 – зубчатая реечная передача, соответственно с шевронными, косыми и прямыми зубьями;
- 129 – общее обозначение зубчатой реечной передачи;
- 130 – реечная передача с червячной рейкой и червяком;
- 131 – реечная передача с зубчатой рейкой и червяком;
- 132 – винтовая зубчатая передача соответственно под прямым или острым углом;
- 133, *a* – червячная глобоидная передача;
- 133, *б* – червячная передача с цилиндрическим червяком.

## **4. ТИПОВЫЕ ПРИВОДЫ И МЕХАНИЗМЫ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ**

### **4.1. Приводы и механизмы для бесступенчатого изменения скорости вращения**

Для достижения максимальной производительности станка и удобства его обслуживания в станкостроении находят применение различного вида приводы и механизмы для бесступенчатого изменения скорости (рис. 4.1). Последние бывают механического (вариаторы), электрического и гидравлического типов.

**Вариатор с раздвижными конусами.** Этот тип вариатора (поз. 1) выполняется с различным видом связи *C*. В качестве связи *C* применяются стандартные или специальные клиновые ремни. Плавное изменение скорости выходного шкива III в диапазоне 4–8 достигается путем

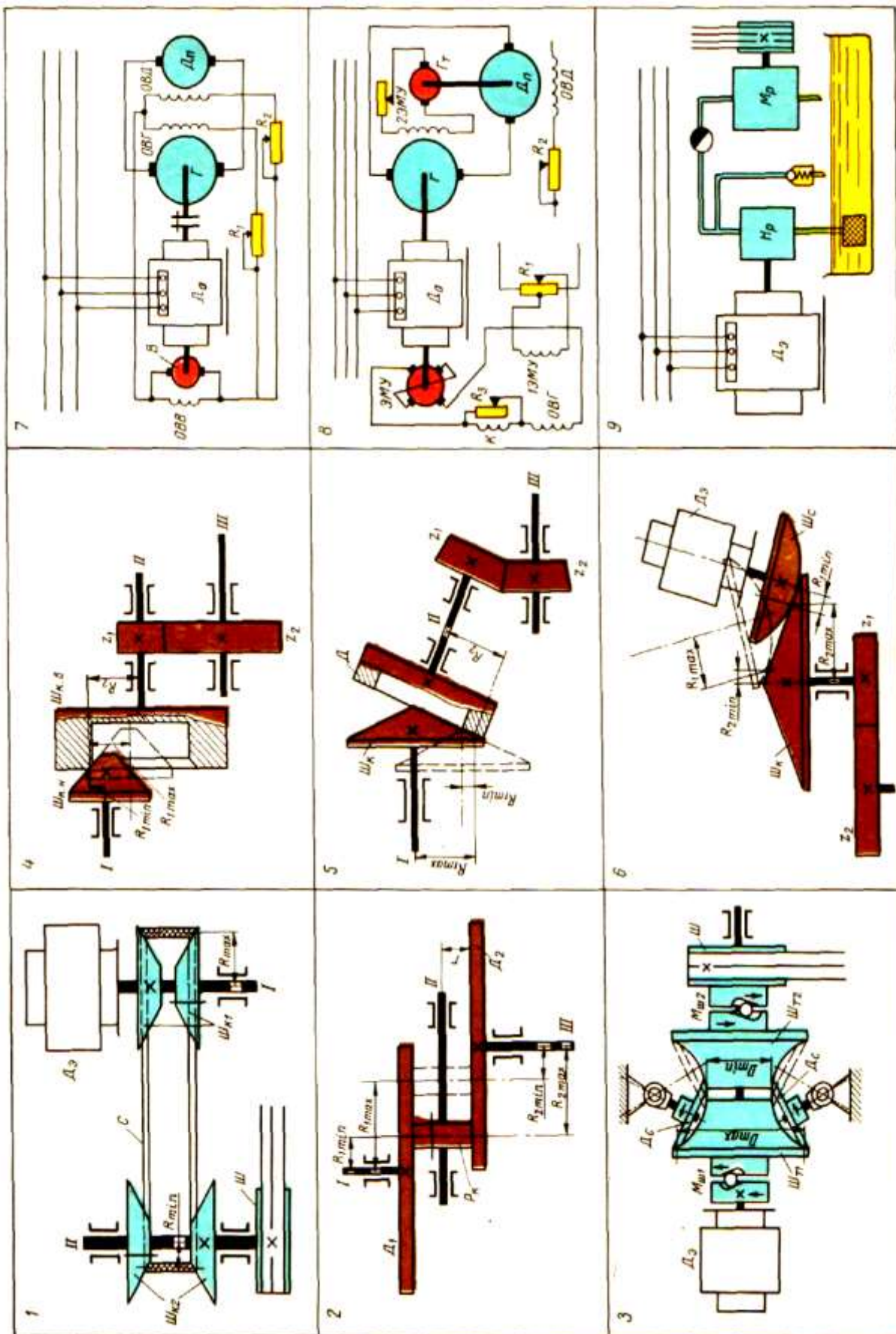


Рис. 4.1. Типовые приводы и механизмы для бесступенчатого изменения скоростей вращения шкива

одновременного раздвигания одной и сближения другой пары конусов. При этом изменяются диаметры рабочей части ведущих  $\text{Ш}_{к1}$  и ведомых  $\text{Ш}_{к2}$ , конусов.

**Сдвоенный торцовый вариатор.** В приводах вспомогательных движений применяются одинарные или сдвоенные (поз. 2) торцовые вариаторы. Движение от вала I через диск  $D_1$ , подвижной ролик  $P_k$  и диск  $D_2$  передается валу III. Бесступенчатое изменение скорости вращения вала III в диапазоне 20–25 и выше достигается за счет перемещения ролика  $P_k$  вдоль вала II.

**Тороидный вариатор.** Этот вариатор (поз. 3) имеет следующий принцип работы. На валу свободно насажены тороидные шкивы – ведущий  $\text{Ш}_{T1}$  и ведомый  $\text{Ш}_{T2}$ , связанные между собой сферическими дисками  $D_c$ . Последние свободно вращаются на поворотных цапфах. При указанном на схеме положении сферических дисков вращение от ведущего тороидного шкива на ведомый передается с большего диаметра  $D_{\max}$  меньшему диаметру  $D_{\min}$ . При повороте цапф со сферическими дисками  $D_c$  в положение, указанное на схеме штрихами, вращение будет передаваться с меньшего диаметра ведущего шкива большему диаметру ведомого шкива. Бесступенчатое изменение скорости вращения достигается поворотом цапф со сферическими дисками  $D_c$ .

**Вариатор с наружным и внутренним коническими шкивами.** Движение от вала I (поз. 4) через наружный конический шкив  $\text{Ш}_{кн}$  и шкив  $\text{Ш}_к$  в внутренней конической поверхности передается валу II и далее через передачу  $z_1-z_2$  валу III. Вал I совместно со шкивом  $\text{Ш}_{кн}$  может перемещаться вдоль образующей своего конуса, благодаря чему рабочий радиус шкива  $\text{Ш}_к$  в, меняется от  $R_{1\min}$  до  $R_{2\max}$ . При этом передаточное отношение вариатора изменяется в диапазоне 3–4.

**Торцоконический вариатор.** В этом вариаторе (поз. 5) вал I с коническим шкивом  $\text{Ш}_к$  находится в постоянном контакте с торцовой поверхностью диска  $D$ , который передает вращение валу II и через коническую передачу  $z_1-z_2$  ведомому валу III. Для бесступенчатого изменения скорости вращения вала III предусмотрена возможность перемещения вала I с коническим шкивом  $\text{Ш}_к$  вдоль его образующей, что позволяет изменять рабочий радиус конического шкива от  $R_{1\min}$  до  $R_{2\max}$ .

**Сфероконический вариатор.** Отличительным признаком этого вариатора (поз. 6) является применение шкива  $\text{Ш}_с$  со сферической рабочей поверхностью, которая имеет контакт с конической поверхностью шкива  $\text{Ш}_к$ . При изменении угла наклона оси электродвигателя  $D_3$  со сферическим шкивом  $\text{Ш}_с$  изменяются рабочие радиусы как сферического, так и

конического шкивов, что обеспечивает более широкий диапазон изменения передаточного отношения вариатора в пределах 9–16.

**Генератор-двигатель.** Система генератор-двигатель (поз. 7) состоит из асинхронного электродвигателя  $D_a$ , генератора  $\Gamma$ , возбудителя  $B$  и рабочего электродвигателя  $D_{\text{п}}$  постоянного тока. Возбудитель  $B$  представляет собой маломощный генератор с самовозбуждением, который предназначен для питания обмотки возбуждения ОВГ генератора  $\Gamma$  и обмотки возбуждения ОВД электродвигателя  $D_{\text{п}}$ . Диапазон изменения скорости равен 10–16.

**Электромашинный усилитель.** В станкостроении нашли также широкое применение системы электромашинного управления. За счет изменения сопротивления  $R_1$  (поз. 8) в обмотке 1ЭМУ можно менять величину и направление тока. На обмотку 2ЭМУ подается питание с тахогенератора  $\Gamma_T$ , установленного на валу электродвигателя  $D_{\text{п}}$ . Таким образом, в цепи создается напряжение пропорциональное разности потоков в обмотках возбуждения 1ЭМУ и 2ЭМУ. Это напряжение подается на обмотку возбуждения ОВГ генератора. ЭМУ обеспечивает возможность бесступенчатого изменения скорости движения рабочих органов станков в широком диапазоне (400–1000).

**Гидравлические приводы.** Асинхронный электродвигатель переменного тока  $D$  (поз. 9) соединен с гидравлическим насосом  $H_p$ . Последний подает масло в гидравлический двигатель  $M_p$ , соединенный с рабочими органами станка. Бесступенчатое изменение скорости осуществляется за счет изменения количества масла как подаваемого насосом, так и потребляемого гидравлическим двигателем на каждый его оборот.

## **4.2. Типовые механизмы для ступенчатого изменения скорости**

В зависимости от назначения станка, требуемого диапазона регулирования, величины передаваемых нагрузок и других условий работы в приводах металлорежущих станков используются различные механизмы для ступенчатого изменения скорости (рис. 4.2).

**Многоскоростные электродвигатели.** В современных конструкциях металлорежущих станков довольно часто встречаются двух-, трех- и даже четырехскоростные асинхронные электродвигатели (поз. 1). Двухскоростные электродвигатели выпускают с числом оборотов 3000/1500 или 1500/750, трехскоростные – с числом оборотов

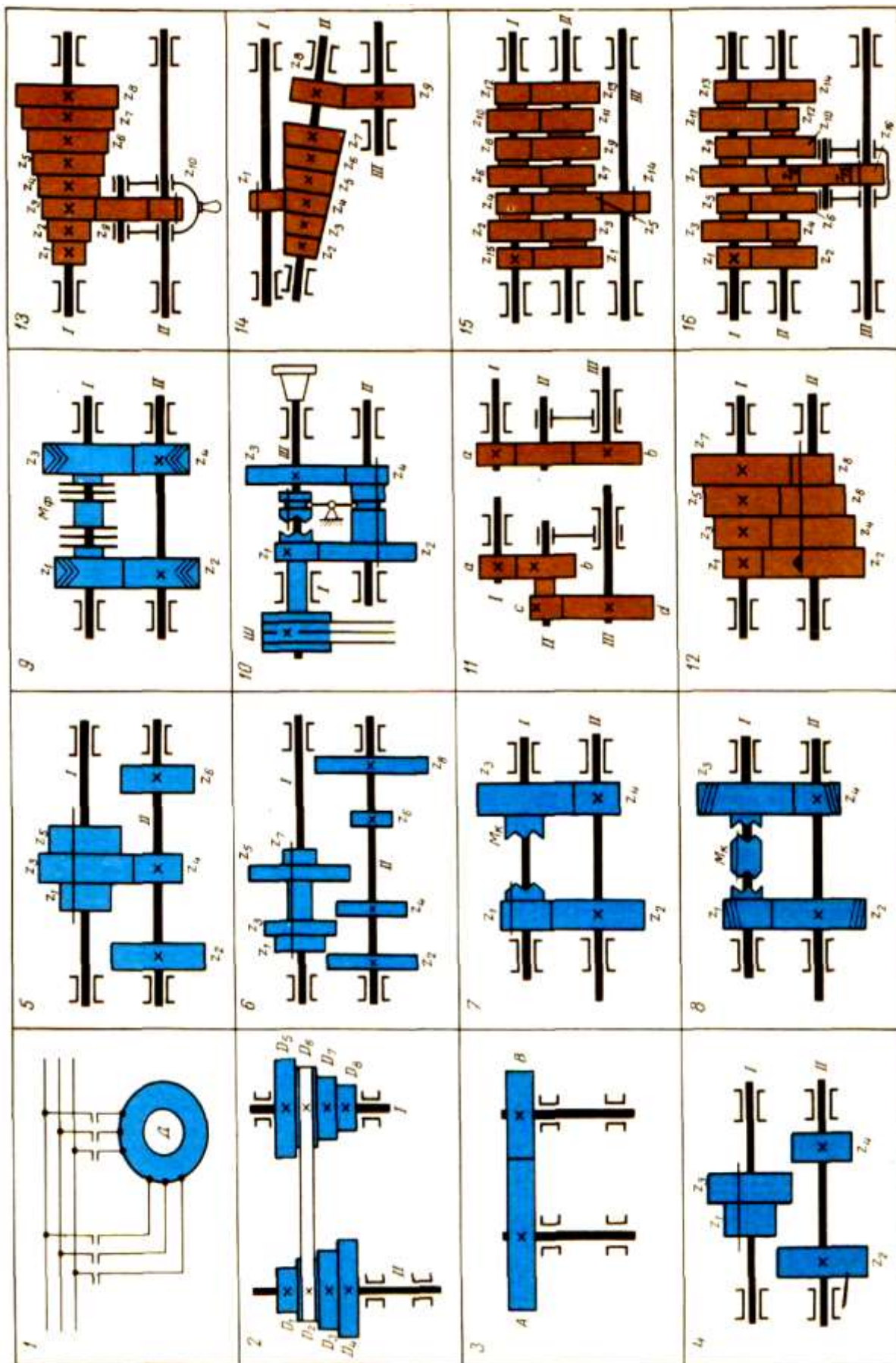


Рис. 4.2. Типовые механизмы для ступенчатого изменения скоростей вращения

3000/1500/1000 и четырехскоростные – с числом оборотов 3000/1500/1000/750.

**Ступенчатые шкивы (поз. 2).** Изменение скорости с помощью ступенчатых шкивов достигается перестановкой ремня с одной ступени на другую. Для того чтобы ремень без специального натяжного устройства мог передавать крутящий момент на любой из имеющихся скоростей, сумму диаметров сопряженных шкивов делают постоянной на всех ступенях, т. е.  $D_1 + D_5 = D_2 + D_6 = D_3 + D_7 = D_4 + D_8$ .

**Парносменные колеса.** В станках для массового и крупносерийного производства, а также в специализированных стайках для изменения скорости движения используются парносменные колеса *A* и *B* (поз. 5). В зависимости от желаемого количества скоростей к станку прилагается комплект сменных колес, пользуясь которыми получают геометрический ряд чисел оборотов шпинделя. Количество возможных скоростей равно количеству сменных колес.

**Шестеренные коробки скоростей.** Коробки применяются как самостоятельные узлы в станках с разделенным приводом и как составная часть шпиндельной бабки или механизма подачи (встроенные коробки). Последние имеют большее применение в станках вследствие их компактности, меньшей стоимости и удобства передачи вращения рабочим органам станка.

Изменение скорости вращения ведомого вала шестеренных коробок достигается за счет включения в работу той или иной комбинации шестерен. В коробках скоростей применяются различные способы включения зубчатых колес в работу: передвижением блоков шестерен вдоль оси валов (поз. 4, 5, 6, 14 и 15), кулачковыми муфтами  $M_k$  (поз. 7 и 8), фрикционными муфтами  $M_\phi$  (поз. 9), накидыванием шестерни (поз. 13 и 16) или выдвигной шпонкой (поз. 12). Каждый из указанных способов переключения скоростей коробок обладает своими достоинствами и недостатками.

Коробки скоростей с кулачковыми и фрикционными муфтами позволяют использовать зубчатые колеса с косыми и шевронными зубьями, обеспечивающими при прочих равных условиях большую прочность и долговечность, а также бесшумность в работе.

Однако пониженный КПД делает их менее пригодным для быстрходных приводов. Коробки скоростей с накидными шестернями, выдвигной шпонкой и множительного типа, в силу недостаточной их прочности и низкого КПД применяются исключительно в механизмах подачи и вспомогательных движений.

Для изменения скорости движения резания и подачи почти всегда используют не один тип коробки, а определенную комбинацию из типовых механизмов, являющуюся для данного привода станка наиболее оптимальной. Так, например, для специализированных и операционных станков используются парносменные колеса в сочетании с двух- или трехскоростной коробкой. Коробки подач токарно-винторезных станков обычно состоят из механизма с конусом I шестерен и множительно-го механизма. В коробках скоростей приводов движения резания обычно встречаются комбинации из механизмов с подвижными блоками шестерен, кулачковыми и фрикционными муфтами, переборными устройствами и т. д.

Принцип работы каждого из механизмов шестеренных коробок скоростей ясен из схемы.

**Переборные устройства (поз. 10).** В старых конструкциях станков ступенчатощкивные приводы обычно снабжались переборами, которые увеличивали количество скоростей и позволяли передавать шпинделю большой крутящий момент. В дальнейшем, в связи с применением шестеренных коробок скоростей, переборные устройства прежней конструкции потеряли свое значение. Однако в настоящее время вследствие повышения быстроходности станков и использования, так называемых разделенных приводов (когда коробка скоростей монтируется отдельно от шпиндельного узла) переборные устройства вновь находят себе применение. Перебор позволяет вдвое увеличить количество скоростей шпинделя и понизить его число оборотов до 16 раз (см. станки моделей 1А616, 6П80Г, 6Н81 и др.).

**Гитара сменных колес.** В тех случаях, когда необходимо обеспечить изменение скорости в широком диапазоне с большим количеством скоростей и при точном передаточном отношении, используют гитару сменных колес (поз. 11). Особенно широкое применение этот механизм нашел в приводах делительных цепей и обкатки, реже он встречается в приводах подачи.

Передаточное отношение для каждой настройки привода определяется соотношением чисел зубьев сменных колес.

К станкам, имеющим гитару, прилагаются наборы сменных колес. Наборы бывают пятковые, четные и универсальные. В пятковом наборе числа зубьев сменных колес от 20 до 100 чередуются через 5, в четном наборе – через 4 зуба.

Универсальный набор, разработанный ЭНИМСом, используется для ответственных делительных цепей.



### 4.3. Типовые механизмы для реверсирования движения

Большинство рабочих органов станков в процессе их работы должны изменять направление своего движения. Для этой цели служат различные виды реверсивных механизмов (рис. 4.3).

**Реверсирование электродвигателем.** Если допускается реверсирование всей цепи привода, то изменение направления движения рабочего органа может быть осуществлено реверсированием вращения ротора электродвигателя. Для асинхронного электродвигателя трехфазного тока в этом случае достаточно поменять местами две фазы (поз. 1, а), а для реверсирования электродвигателя постоянного тока изменить полярность тока поз. 1, б).

**Реверс с двумя паразитными колесами.** Этот реверс (поз. 2) представляет собой механизм, состоящий из четырех цилиндрических колес, смонтированных в подвижной рамке Р, которая может находиться в трех положениях. В первом положении (поз. 2, а) вращение от ведущего колеса  $z_1$  к ведомому колесу  $z_4$  передается через паразитные колеса  $z_2$  и  $z_3$  и поэтому колесо  $z_4$  вращается в направлении, противоположном направлению вращения колеса  $z_1$ . Во втором положении (поз. 2, б) ведущее колесо  $z_1$  не зацепляется ни с одним из паразитных колес и поэтому ведомое колесо  $z_4$  не вращается. В положении (поз. 2, в) паразитное колесо  $z_3$  непосредственно входит в зацепление с ведущим колесом  $z_1$ , а колесо  $z_2$  вращается вхолостую, не принимая участия в передаче движения. В этом случае ведущее и ведомое колеса вращаются в одну и ту же сторону. Реверс с составным зубчатым колесом. В современных зуборезных станках для нарезания конических зубчатых колес с круговыми зубьями (модели 525, 528 и др.) реверсирование обкатной люльки обеспечивается механизмом, имеющим составное зубчатое колесо  $z_5$  (поз. 3). При вращении шестерни  $z_1$  в одном направлении движение посредством вала I и конической передачи  $z_2-z_3$  передается приводному колесу  $z_4$ , которое также имеет постоянное направление вращения. При зацеплении колеса  $z_4$  с сектором внутреннего зацепления составного колеса  $z_5$  последнее получает вращение в одном направлении; далее при проходе колеса  $z_4$  через зацепление с одним из соединяющих участков составного колеса происходит процесс реверсирования; при зацеплении колеса  $z_4$  с сектором внешнего зацепления составного колеса последнее вращается в противоположную сторону. Для обеспечения возможности зацепления колеса  $z_4$  со всеми участками составного зубчатого колеса  $z_5$ , вал II с кареткой К, несущей на себе коническую передачу  $z_2-z_3$  и колесо  $z_4$ , может перемещаться в радиальном направлении.

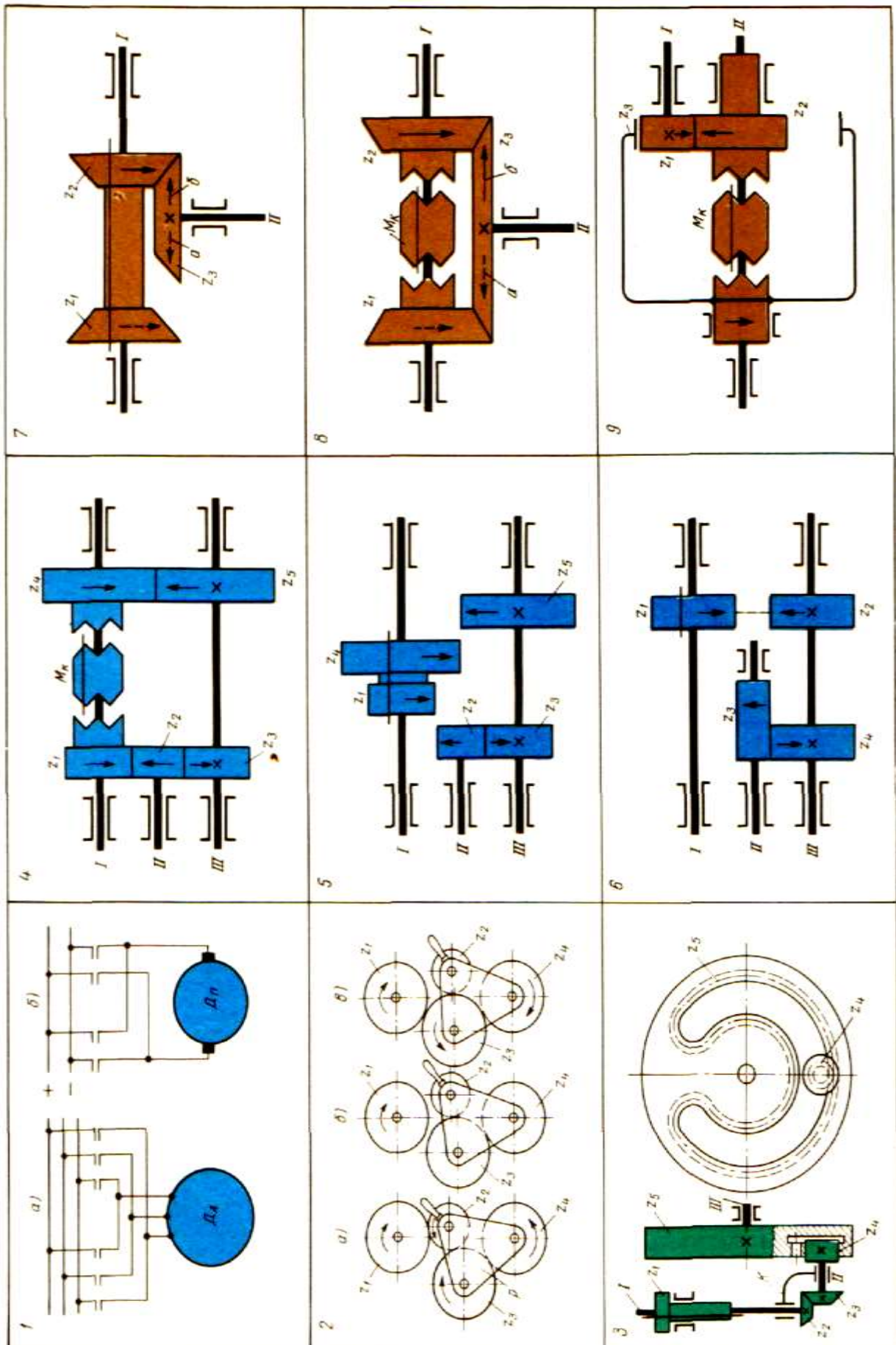


Рис. 4.3. Типовые механизмы для реверсирования движения

**Реверс с одним паразитным колесом.** Этот механизм конструктивно выполняется в различных вариантах (поз. 4, 5 и 6). Однако принцип его работы остается неизменным. В одном случае вращение от ведущего вала I к ведомому III передается зубчатыми колесами через паразитную шестерню и тогда направление вращения обоих валов совпадают, или вращение передается непосредственно – без участия паразитного колеса и тогда направление вращения ведущего и ведомого валов будет различным.

Реверс с одним паразитным колесом и двусторонней кулачковой муфтой (поз. 4) характерен тем, что все его цилиндрические зубчатые колеса могут быть выполнены как с прямыми, косыми, так и с шевронными зубьями. При включении кулачковой муфты  $M_k$  влево ведущий и ведомый валы имеют одинаковое направление вращения, при включении муфты  $M_k$  вправо – разные.

Реверс с одним паразитным колесом и двойным подвижным блоком шестерен (поз. 5) может быть выполнен только с цилиндрическими колесами, имеющими прямые зубья. Во всем остальном он не отличается от предыдущего механизма.

Реверс с одним широким паразитным колесом (поз. 6) отличается от предыдущих механизмов тем, что имеет четыре колеса вместо пяти и что колеса  $z_1$ ,  $z_2$  и  $z_4$  имеют равные числа зубьев, чем обуславливается одинаковая скорость вращения ведомого вала III как в одну, так и в другую сторону. В этом механизме все колеса также должны иметь прямые зубья.

**Конические реверсы.** Если в кинематической цепи привода от двигателя до рабочего органа имеются конические передачи под прямым углом, то бывает целесообразным применение конических реверсов.

У конического реверса с подвижным блоком конических колес (поз. 7) вал I имеет постоянное направление вращения. Когда блок конических колес, связанный с валом I направляющей шпонкой, находится (как показано на схеме) в левом крайнем положении, в зацеплении участвуют колеса  $z_2$ – $z_3$  и вал II вращается по стрелке  $\bar{b}$ . При перемещении блока конических колес вправо зацепляются колеса  $z_1$ – $z_3$  и вал II начинает вращаться по стрелке  $a$ .

Конический реверс с двусторонней кулачковой муфтой  $M_k$  (поз. 8) работает по аналогичному принципу, только в этом механизме изменение направления вращения вала II достигается переключением муфты  $M_k$ .

**Реверс с колесом внутреннего зацепления.** Принципиальным отличием этого механизма (поз. 9) является применение зубчатого колеса  $z$ , с внутренним зацеплением. Вал I с колесом  $z_1$  вращается в одном постоянном направлении, приводя в движение колеса  $z_2$  и  $z_3$ , которые при этом вращаются в разных направлениях. Перемещением двусторонней кулачковой муфты  $M_k$  вправо или влево можно сообщить валу II вращение в ту или иную сторону.

#### **4.4. Типовые механизмы прямолинейного поступательного движения**

Для преобразования на последней ступени привода вращательного движения в поступательное в станкостроении используются различные типовые механизмы, показанные на рис. 4.4.

**Винтовая передача.** Наиболее распространенным механизмом для преобразования вращательного движения в поступательное являются винтовые передачи (поз. 1). При этом могут быть различные варианты преобразования движения:

1) винт вращается, а гайка совместно с рабочим органом  $P_0$  движется поступательно – поз. 1, *a* (перемещение продольных салазок суппорта токарного станка при нарезании резьб);

2) винт вращается, а гайка совместно с рабочим органом  $P_0$  движется поступательно – поз. 1, *a* (перемещение продольных салазок суппорта токарного станка при нарезании резьб);

3) винт неподвижный, гайка вращается и совместно с рабочим органом  $P_0$  совершает поступательное движение – поз. 1, *b* (стол продольно-фрезерного станка модели А662);

4) гайка неподвижная, винт вращается и одновременно совместно с рабочим органом  $P_0$  совершает поступательное движение – поз. 1, *b* (продольная подача стола в консольно-фрезерных станках);

5) гайка вращается, а винт совместно с рабочим органом  $P_0$  имеет поступательное движение – поз. 1, *z* (суппорт строгального станка).

**Реечная передача.** По варианту (поз. 2, *a*) реечная шестерня только вращается, а поступательное движение получает рейка совместно с рабочим органом  $P_0$  (подача шпинделя сверлильных станков). По варианту (поз. 2, *b*) рейка неподвижна, а реечная шестерня  $z$  вращается и двигается поступательно совместно с рабочим органом  $P_0$  (продольная подача суппорта токарного станка при обтачивании).

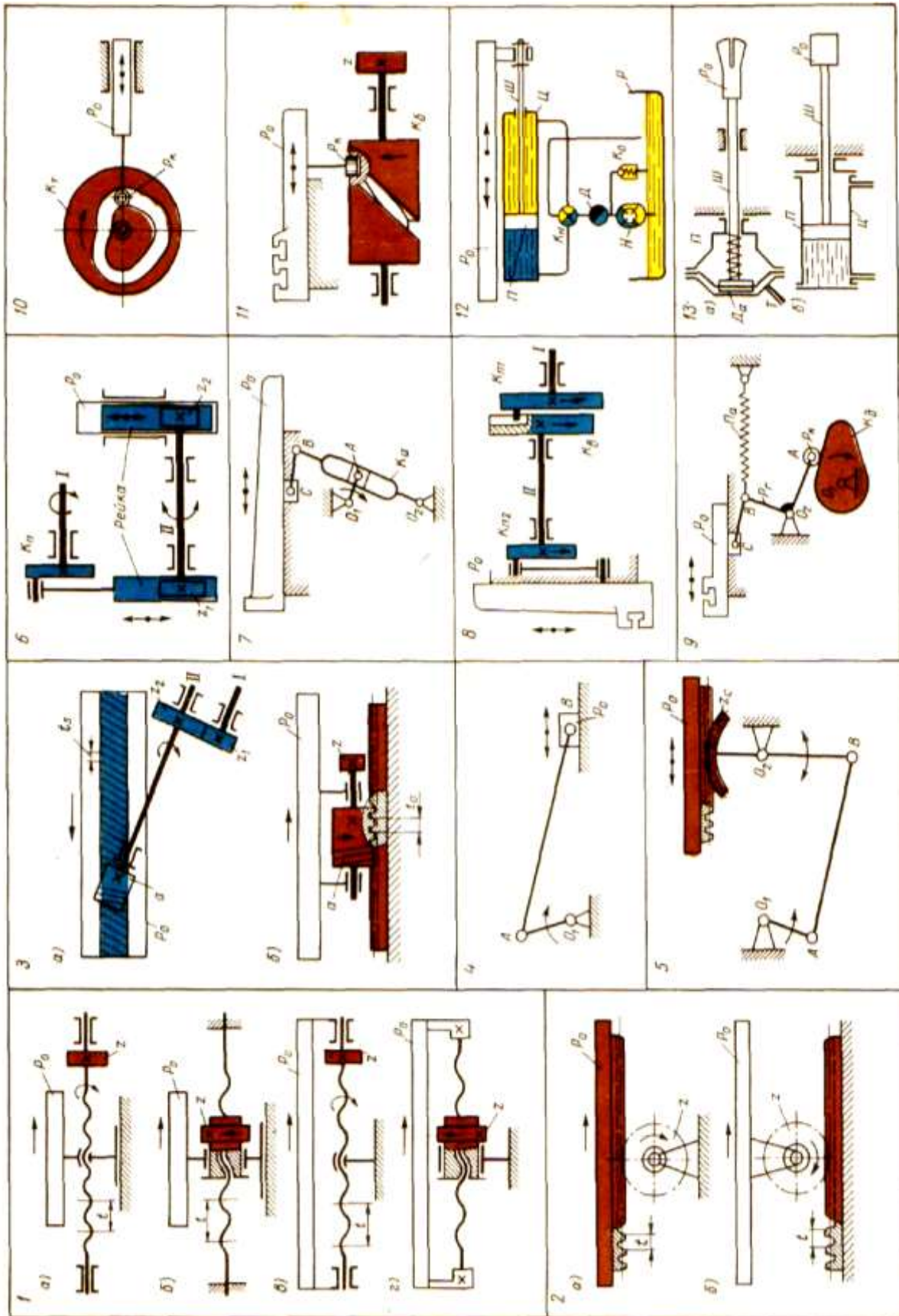


Рис. 4.4. Типовые механизмы для преобразования вращательного движения в прямолинейное поступательное движение

**Червячно-реечная передача.** Среднее положение между винтовой и реечной передачей занимает червячно-реечная передача (поз. 3). Она обладает большей жесткостью и достаточно высоким КПД, что обеспечивает ей широкое применение в приводах движения резания современных продольно-строгальных станков (поз. 3, а) и в приводе подачи тяжелых фрезерных и горизонтально-расточных станков (поз. 3, б).

**Кривошипно-шатунный механизм.** Этот механизм при равномерном вращении кривошипа  $O_1A$  (поз. 4) обеспечивает прямолинейное возвратно-поступательное движение ползуна  $B$ , но с переменной скоростью. Причем скорость ползуна при прямом и обратном ходе для каждого его положения будет одинаковой.

**Кривошипно-реечный механизм.** Этот механизм (поз. 5) состоит из четырехзвенника с кривошипом  $O_1A$ , сектора  $z_c$  и рейки, закрепленной на рабочем органе  $P_o$ . При непрерывном вращении кривошипа  $O_1A$  рабочий орган  $P_o$  будет совершать прямолинейное возвратно-поступательное движение.

**Двойной кривошипно-реечный механизм.** В зубодолбежном станке модели 514 для сообщения возвратно-поступательного движения штосселю с долбяком применен двойной кривошипно-реечный механизм (поз. 6). При вращении кривошипа  $K_n$  шатун-рейка приводит в возвратно-вращательное движение шестерню  $z_1$ , вал II и шестерню  $z_2$ . Последняя сообщает прямолинейное возвратно-поступательное движение рабочему органу  $P_o$ .

**Кривошипно-кулисный механизм.** При вращении кривошипа  $O_1A$  (поз. 7) кулиса  $K_a$  совершает возвратно-качательное движение и через шатун  $BC$  сообщает рабочему органу  $P_o$  прямолинейное возвратно-поступательное движение.

Кривошипно-кулисный механизм до последнего времени применялся в приводах движения резания поперечно-строгальных и долбежных станков.

**Механизм с вращающейся кулисой.** Палец кривошипа  $K_{п1}$  (поз. 8) входит в радиальный паз вращающейся кулисы  $K_{п2}$  закрепленной на валу II. Кривошип  $K_b$  посредством шатуна соединен с рабочим органом  $P_o$ . При равномерном вращении вала I вследствие смещения осей валов I и II вал II получает неравномерное вращение, что обеспечивает более равномерную скорость движения рабочего органа  $P_o$  на заданном участке его пути. Механизм с вращающейся кулисой находит применение в долбежных станках.

**Кулачковые механизмы.** Эти механизмы позволяют обеспечить любой закон изменения скорости рабочего органа, получать необходи-

мое соотношение скорости рабочего и обратного ходов и в отличие от других механизмов могут одновременно выполнять функции командно-распределительного устройства. Благодаря этим преимуществам кулачковые механизмы с дисковыми (поз. 9), торцовыми (поз. 10) и цилиндрическими (поз. 11) кулачками нашли широкое применение в станках-автоматах и полуавтоматах для осуществления автоматического цикла работы.

**Гидропривод.** Для преобразования вращательного движения в прямолинейно-поступательное движение в современных станках особенно широко используется гидропривод (поз. 12). Принцип работы гидропривода заключается в следующем: масло из резервуара  $P$  подается насосом  $H$  под давлением через дроссель  $D$  к золотниковому крану  $K_H$ . В зависимости от положения крана масло подается по правому или левому маслопроводам в соответствующую полость цилиндра и заставляет перемещаться поршень  $П$  со штоком  $Ш$  и связанный с ними рабочий орган  $P_0$ .

**Пневмопривод.** В современных станках для сообщения рабочим органам поступательных перемещений находят также широкое применение пневмоприводы. Для коротких перемещений используются пневмокамеры (поз. 13, *а*), а для больших ходов – пневмоцилиндры (поз. 13, *б*).

#### 4.5. Типовые механизмы для получения прерывистых движений

Для получения прерывистого движения в станкостроении используют различные типовые механизмы (рис. 4.5), каждый из которых имеет свою область применения.

**Храповые механизмы.** Эти механизмы позволяют весьма тонко и в широком диапазоне изменять величину периодических перемещений рабочих органов станков.

Механизм с наружным храповым колесом (поз. 1) находит применение в поперечно-строгальных станках. При равномерном вращении кривошипа  $K$ , связанный с ним шатуном  $Ш_n$  рычаг  $P$ , получает непрерывное качательное движение относительно точки  $O_2$ . С рычагом  $P$ , связана собачка  $C$ , упирающаяся в зубья колеса  $z$ . При качании рычага  $P_T$  в направлении стрелки *а*, собачка, упираясь в один из зубьев колеса, увлекает его и поворачивает на некоторый угол. При качании коромысла по стрелке *б* собачка приподнимается, скользит по спинкам зубьев и колесо не поворачивается.

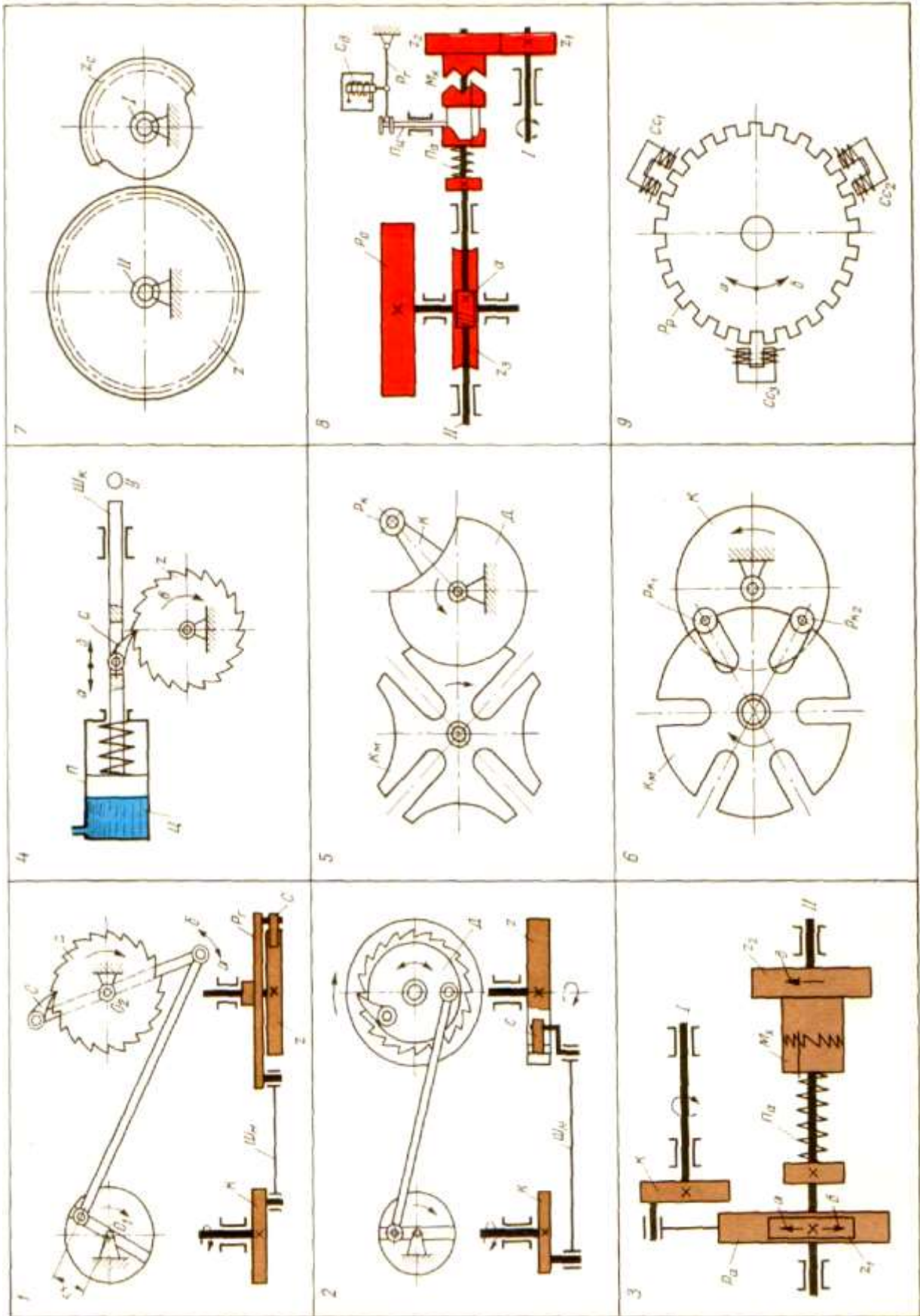


Рис. 4.5. Типовые механизмы для получения прерывистого движения



Механизм с внутренним храповым колесом (поз. 2) отличается от предыдущего только лишь тем, что храповое колесо  $z$  выполнено, внутренними зубьями, а вместо рычага внутри храпового колеса установлен диск  $D$ . При вращении кривошипа  $K$  диск  $D$  посредством шатуна  $III$  получает возвратно-вращательное движение и через собачку  $C$  сообщает колесу  $z$  периодическое вращательное движение.

Механизм с торцевой храповой муфтой (поз. 3) нашел применение в приводе подач продольно-строгальных станков (см. станок модели 7231 А).

При непрерывном и равномерном вращении вала  $I$  с кривошипом  $K$  зубчатое колесо  $z_1$  и вал  $II$  получают через шатун-рейку  $P_a$  возвратно-вращательное движение. На валу  $II$  на направляющей шпонке установлена храповая муфта  $M_x$ , которая пружиной  $II_a$  поджимается к зубчатому колесу  $z_2$ , имеющему храповые зубья на торце своей ступицы. При вращении вала  $II$  по стрелке  $b$  храповая муфта  $M_x$  преодолевая сопротивление пружины  $II_a$ , отходит влево и не передает вращение колесу  $z_2$ . Во время вращения вала  $II$  по стрелке  $a$  храповая муфта  $M_x$  находится в зацеплении со ступицей колеса  $z_2$  и передает ему вращение по стрелке  $b$ .

Храповой механизм с поршневым приводом (поз. 4) применен в приводе радиальных подач круглошлифовального станка модели 3151. В этом механизме собачка  $C$ , находящаяся в зацеплении с храповым колесом  $2$ , установлена в пазу штока  $III_k$ . Последний связан с поршнем  $П$ . Когда в цилиндр  $Ц$  подается сжатый воздух или жидкость, то поршень  $П$  со штоком  $III_k$  и собачкой  $C$  перемещается по стрелке  $b$  до упора  $У$ , поворачивая храповое колесо  $z$  на один или несколько зубьев по стрелке  $b$ . При обратном ходе штока с собачкой по стрелке  $a$  храповое колесо  $z$  вращение не получает.

Аналогичный храповой механизм, но только с приводом от соленоида, применен на внутришлифовальном станке модели 2А252.

**Мальтийские механизмы.** В станкостроении для поворота многопозиционных рабочих органов из одной позиции в другую чаще всего применяются мальтийские механизмы.

Четырехпозиционный мальтийский механизм с одним кривошипом (поз. 5) используется для поворота шпиндельного блока в четырехшпиндельных токарных автоматах. При равномерном вращении кривошипа  $K$  закрепленный на нем ролик  $P_k$ , в определенный момент входит в один из четырех пазов мальтийского креста  $K_m$  и поворачивает его на  $90^\circ$ . Таким образом, за каждый полный оборот кривошипа  $K$  вал, на котором закреплен мальтийский крест, сделает только  $1/4$  оборота.

Диск Д, жестко связанный с кривошипом К, служит для фиксации положения мальтийского креста в каждом из его четырех позиций.

Шестипозиционный мальтийский механизм с одним или двумя роликами (поз. 6) используется, например, для поворота револьверной головки одношпиндельного токарно-револьверного автомата модели 1А136. Установка второго ролика на кривошипном диске К позволяет в случае необходимости увеличить угол поворота мальтийского креста в два раза.

**Секторный механизм.** Зубчатый сектор  $z_c$  (поз. 7), закрепленный на валу I, периодически поворачивается только в течение того времени, когда его зубья находятся в зацеплении с зубьями колеса  $z$ , установленного на валу II. В этом механизме не представляется возможным регулировать величину угла поворота колеса  $z$ , поэтому он, как и мальтийские механизмы, используется в основном в многопозиционных устройствах.

**Механизм с однооборотной муфтой.** Рабочий орган  $P_0$  (поз. 8) в нужный момент получает периодический поворот на определенный угол от непрерывно вращающегося вала I через колеса  $z_1-z_2$ , однооборотную муфту  $M_k$  и червячную передачу  $z_2-z_3$ . Однооборотная муфта  $M_k$  срабатывает под действием соленоида  $C_d$  который через рычаг  $P_r$  поднимает палец  $P_{ц}$ .

**Шаговый электродвигатель.** Ротор  $P_p$  одного из шаговых электродвигателей (поз. 9) имеет ряд полюсов, а статор состоит из трех независимых секций  $C_{c1}$ ,  $C_{c2}$  и  $C_{c3}$ , которые расположены так, что если одна из них совпадает с полюсами ротора  $P_p$ , то две другие секции оказываются смещенными относительно полюсов, причем в разные стороны.

При включении обмотки секции  $C_{c1}$  ротор повернется на некоторый угол по стрелке  $a$ , а при включении обмотки секций  $C_{c2}$  он повернется на тот же угол, но по стрелке  $b$ .

#### 4.6. Прочие типовые механизмы металлорежущих станков

**Предохранительные устройства.** Во избежание поломок деталей станков в приводах последних устанавливаются всевозможные предохранительные устройства (рис. 4.6).

Механизм падающего червяка, (поз. 1) применяется для автоматического выключения подачи при перегрузках. Выключение осуществляется тогда, когда суппорт доходит до какого-нибудь препятствия, например, до неподвижного упора, установленного на станке, и дальше не может перемещаться.

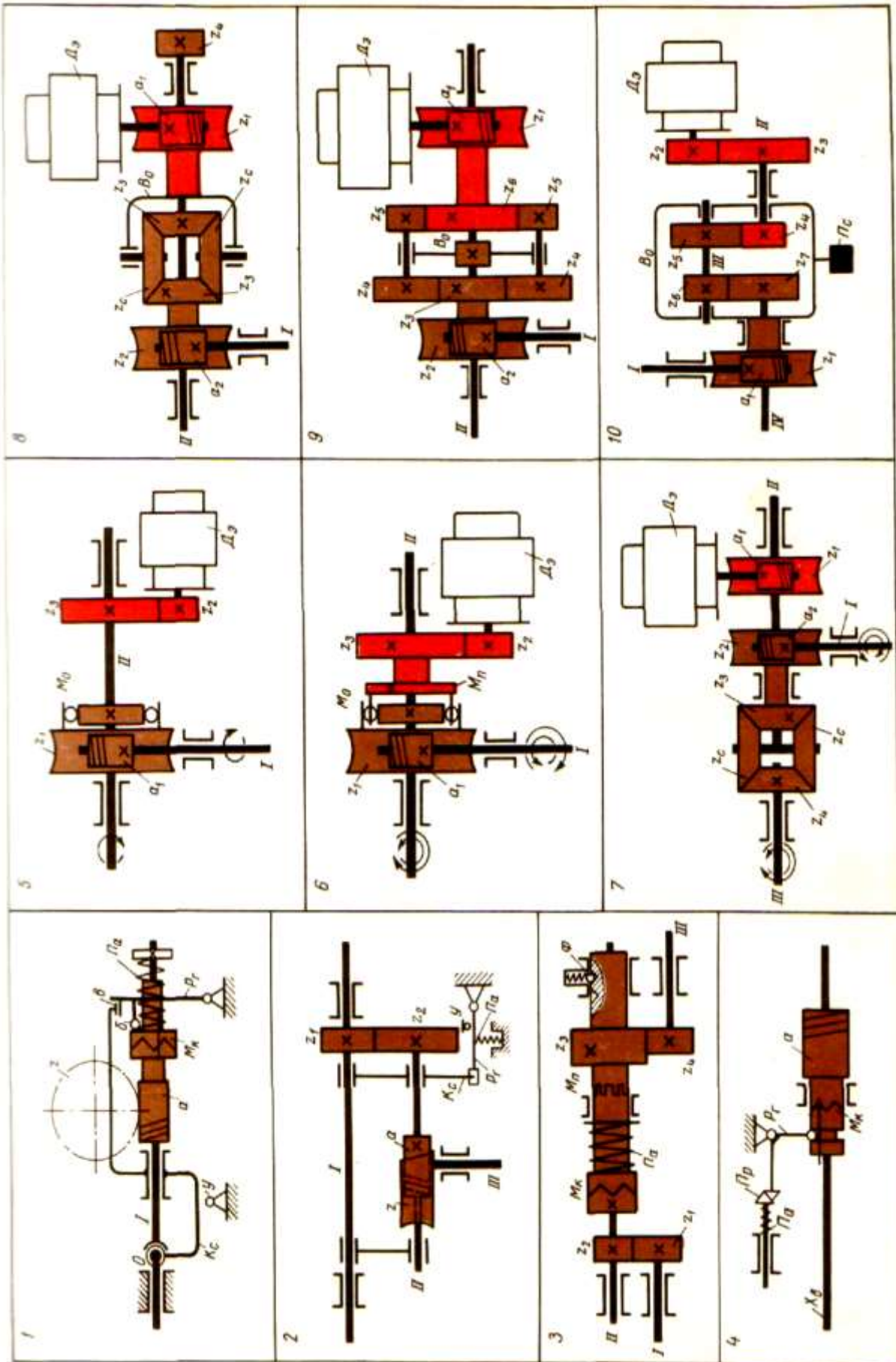


Рис. 4.6. Прочие механизмы станков

При этом приводной вал I продолжает передавать вращение червяку  $a$  через кулачковую муфту  $M_k$ . Последняя благодаря скошенным зубьям отходит назад, преодолевая сопротивление пружины  $P_a$ , и нажимает через упор  $b$  на рычаг  $P_r$ , который при помощи выступа  $B$  поддерживает червяк  $a$  в зацеплении с червячным колесом  $z$ . В определенный момент, когда муфта  $M_k$  отодвинется назад и выступ  $B$  не будет поддерживать червяк  $a$ , последний под действием собственного веса упадет вниз и, поворачиваясь относительно оси  $O$ , выйдет из зацепления с червячным колесом  $z$ .

В другой конструкции падающего червяка (поз. 2) вращение от вала I через колеса  $z_1-z_2$ , вал II и червячную передачу  $a-z$  передается валу III и далее механизму подачи.

Когда упор  $U$  нажмет на рычаг  $P_r$ , корпус  $K_c$  лишится опоры и упадет вниз вместе с валом II и червяком  $a$ , расцепив его с колесом  $z$ .

Самовыключающиеся кулачковые муфты служат тем же целям, что и падающие червяки. Рассмотрим работу муфты (поз. 3), установленную в цепи подач станка модели 262Г.

Движение от вала I валу III передается шестернями  $z_1-z_2$ , валом II, кулачковыми муфтами  $M_k$  и  $M_n$  и зубчатыми колесами  $z_3-z_4$ . Когда в цепи подач станка возникает перегрузка, правая часть кулачковой муфты  $M_k$  благодаря наличию скошенных зубьев перемещается вправо совместно с кулачковой муфтой  $M_k$  и зубчатым колесом  $z_3$ .

В определенный момент фиксатор  $\Phi$  зафиксирует ступицу с колесом  $z_3$  в крайнем правом положении. Далее, когда вал II совместно с левой частью муфты  $M_k$  повернется на один зуб, правая ее часть под действием пружины  $P_a$  переместится влево в свое первоначальное положение, расцепив при этом кулачки муфты  $M_k$ . Передача движения прекратится.

Несколько иначе работает самовыключающаяся кулачковая муфта (поз. 4), установленная на токарно-винторезном станке модели 1616. При соприкосновении суппорта с упором возрастает крутящий момент, передаваемый от ходового валика  $X_b$  через посредство муфты  $M_y$  червяку  $a$ . Благодаря наличию скосов на кулачках муфты  $M_k$  осевое усилие, действующее на муфту, стремится переместить ее влево и разъединить с червяком  $a$ . Этому препятствует двуплечий рычаг  $P_r$ , один конец которого упирается в скос плунжера  $P_p$ . При определенной, заранее отрегулированной нагрузке плунжер  $P_p$ , преодолевая сопротивление пружины  $P_a$  утапливается, рычаг  $P_r$  поворачивается и муфта  $M_k$  отходит влево, разрывая цепь механической подачи суппорта.

**Обгонные муфты.** Обычная односторонняя обгонная муфта (поз. 5) позволяет осуществлять рабочее и быстрое движение только в одном направлении. При рабочем движении вал I через червячную передачу  $a_1-z_1$  и обгонную муфту  $M_o$  передает вращение валу II и далее рабочему органу станка. Для осуществления быстрых перемещений рабочего органа включается электродвигатель  $D_3$ , который через зубчатую передачу  $z_2-z_3$  сообщает быстрое вращение валу II. Наличие обгонной муфты  $M_{и}$  допускает быстрое вращение вала II при медленном вращении или полной остановке червячного колеса  $z_1$ .

Двусторонние обгонные муфты (поз. 6) позволяют осуществлять быстрое вращение вала II в обоих направлениях. В этом случае электродвигатель  $D_3$  быстрых перемещений связан зубчатыми колесами  $z_2-z_3$  не с валом II, а с поводковой муфтой  $M_{п}$ , торцовые пальцы которой входят в соответствующие вырезы обгонной муфтой  $M_o$ .

В зависимости от конструкции двусторонней обгонной муфты рабочее движение валу II может быть сообщено только в одном или обоих направлениях.

**Планетарные механизмы.** В металлорежущих станках находят широкое применение различные типы планетарных механизмов.

В планетарном механизме (поз. 7) привода быстрых перемещений стола и бабки бесконсольного фрезерного станка модели 6A54 рабочие перемещения осуществляются от вала I через червячную передачу  $a_2-z_1$  и коническую передачу  $z_3-z_c-z_4$ . Быстрые перемещения производятся электродвигателем  $D_3$  через червячную передачу  $a_2-z_3$  Т-образный вал II и планетарную коническую передачу  $z_c-z_4-z_3$ . Несколько иной вариант привода быстрых перемещений с аналогичным планетарным механизмом показан на поз. 8.

В продольно-фрезерных станках моделей А662 и 6652 в приводах подач и быстрых перемещений применен планетарный механизм с центральным водилом и цилиндрическими колесами (поз. 9). Рабочая подача сообщается от вала I через червячную передачу  $a_2-z_2$  и планетарную передачу  $z_3-z_4-V_o$  и далее через вал II рабочему органу станка. Колесо  $z_6$  в это время неподвижно.

При быстрых перемещениях вращение от электродвигателя  $D_3$  передается валу II через червячную передачу  $a_1-z_1$  и планетарную передачу  $z_6-z_5-V_o$ .

Вариант планетарного механизма с цилиндрическими колесами, но с вращающимся корпусом показан на поз. 10.

## **5. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ**

Отчет оформляется в соответствии с требованиями к текстовым документам (ГОСТ 2.105–95) и должен содержать:

- начерченную кинематическую схему токарно-винторезного станка (по указанию преподавателя);
- перечень механизмов, применяемых в приведенной кинематической схеме с описанием их назначения.

## **6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какие механизмы применяются для регулирования скорости вращения валов?

2. Какие механизмы применяются для реверсирования движения? Их преимущества и недостатки.

3. Какие механизмы применяются для получения поступательного движения? Их преимущества и недостатки.

4. Какие механизмы применяются для осуществления периодических (прерывистых) движений? Их преимущества и недостатки.

5. Какие механизмы применяются для осуществления быстрых перемещений и предохранения привода станков от перегрузки?

## Лабораторная работа № 2

### ИЗУЧЕНИЕ И НАСТРОЙКА ОДНОШПИНДЕЛЬНОГО АВТОМАТА ПРОДОЛЬНОГО ТОЧЕНИЯ 1Б10В

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить конструкцию, кинематику и наладку одношпиндельного автомата продольного точения.

#### 2. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Одношпиндельный автомат продольного точения мод. 1Б10В предназначен для изготовления деталей высокой точности из холоднотянутого прутка до 6 мм.

На автомате производятся следующие операции: обточка, подрезка, отрезка, нарезание резьбы (наружной и внутренней), центрирование, сверление. При применении сменных приспособлений технологические возможности автомата расширяются.

#### 3. ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СТАНКА

##### 1. Основные данные

1. Диаметр отверстия шпинделя, мм	8
2. Расстояние от торца шпинделя до опорной плоскости резцов, мм	наибольшее 113 наименьшее 2
3. Пределы чисел оборотов шпинделя, об/мин.	1400–10000
4. Число ступеней оборотов шпинделя	18
5. Пределы чисел оборотов распределительного вала, об/мин	0,22–51,5
6. Пределы времени изготовления одной детали, мин	4,55–0,0194
7. Наибольшая подача прутка, мм	60
8. Наименьший остаток прутка, мм	
при работе с люнетом	78
при работе без люнета	17
9. Наибольшие размеры прутка, мм	
диаметр	6
длина	2000

10. Способ подачи прутка – под грузом
11. Размеры обрабатываемых изделий, мм  
наибольший диаметр 6  
наибольшая длина проточки 60
12. Диаметр нарезаемой резьбы  
наибольший по стали М3  
наибольший по латуни М4  
наименьший М0,4
13. Наибольшая длина нарезаемой резьбы, мм 30
14. Диаметр сверления, мм  
наибольший по стали 3  
наибольший по латуни 4  
наименьший 0,4
15. Наибольшая глубина сверления, мм 30

## 2. Блокировки

1. Автоматическое выключение после окончания прутка - есть
2. Автоматическое выключение после обрыва ремня - есть
3. Автоматическое выключение при заедании  
плашки или метчика - есть

## 3. Суппорты

	№ супорта	Величина поперечного хода, мм	Величина регулировки, мм		Цена деления лимба, мм	
			Продольное перемещение	Поперечное перемещение	Продольное перемещение	Поперечное перемещение
Балансир	№1	8	6	6	0,01	0,005
Балансир	№2	8	6	6	0,01	0,005
Суппортная стойка	№3	20	6	6	0,005	0,01
Суппортная стойка	№4	10	6	6	0,005	0,01
Суппортная стойка	№5	10	6	6	0,005	0,01



#### 4. Привод

Род привода			Индивидуальный электродвигатель		
Электродвигатель					
Место установки	Назначение	Тип	Вид тока	Мощность и напряжение	Об/мин
Основание	Привод всех рабочих механизмов	A02-22-4	Переменный	1,5 кВт 220/380 В	1420

#### 5. Ремни

Место нахождения	Тип, размер, ГОСТ	Количество
От трансмиссионного вала на главный шпиндель	Ремень плоский синтетический 1×30×2230	1
От электродвигателя к трансмиссионному валу	Ремень плоский кожаный 4×45×1080	1
К редуктору основания от трансмиссионного вала	Ремень клиновой A900 ГОСТ 1284-45	1
От редуктора к поперечному валу	Ремень клиновой A1250 ГОСТ 1284-45	1
От электродвигателя к насосу	Ремень круглый кожаный	1

#### 6. Подшипники шпинделя

	Тип	Размер	Материал	К-во
Передний	Спец. игольчатый	$d = 22; l = 50$		1
Задний	Радиально-упорный С 46303	17×47×14		2

### 7. Данные о кулачках

Назначение	Тип	Наибольший диаметр, мм	Наименьший радиус, мм	Диаметр отверстия, мм	Толщина, мм	Ширина паза, мм	Передаточное отношение
Перемещение суппорта в 1,2	дисковый	120	30	20А	8	17	1:3
Перемещение суппорта 3	дисковый	120	30	28А	8	24	1:1
Перемещение суппорта 4	дисковый	120	35	28А	8	24	1:2
Перемещение суппорта 5	дисковый	180	35	28А	8	24	1:2
Перемещение шпиндельной бабки	дисковый	180	30	20А	8	–	1:1 1:3

#### 4. СХЕМА РАСПОЛОЖЕНИЯ И РАБОТЫ СУППОРТОВ

(Переднее крайнее положение)

Обработка деталей на автоматах продольного точения осуществляется инструментами, закрепленными на суппортной стойке. В основании суппортной стойки на оси установлен балансир, в резцедержателях которого закреплены резцы 1 и 2. От кулачка балансир получает качательное движение и поочерёдно подводит резцы 1 и 2 в зону обработки. Выше балансира – на суппортной стойке – расположены вертикальные суппорты, имеющие возвратно-поступательные перемещения. В резцедержателях суппортной стойки закрепляются резцы 3, 4 и 5. Схема расположения резцов суппортной стойки и балансира показаны на рис. 4.1.

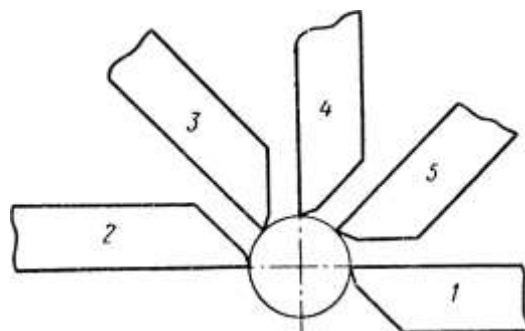


Рис. 4.1. Схема расположения резцов суппортной стойки автомата продольного точения

#### 5. ЧАСТОТА ВРАЩЕНИЯ ШПИНДЕЛЯ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

В отличие от токарно-револьверных автоматов производительность автоматов продольного точения определяется не числом оборотов шпинделя, необходимым для изготовления одной детали, а частотой вращения распределительного вала, т. е. в этом случае время одного оборота распределительного вала соответствует количеству деталей, изготавливаемых за одну минуту.

#### 6. ОРГАНЫ УПРАВЛЕНИЯ СТАНКА

Органы управления станка приведены на рис. 6.1. Специфика органов управления представлена в табл. 6.1.

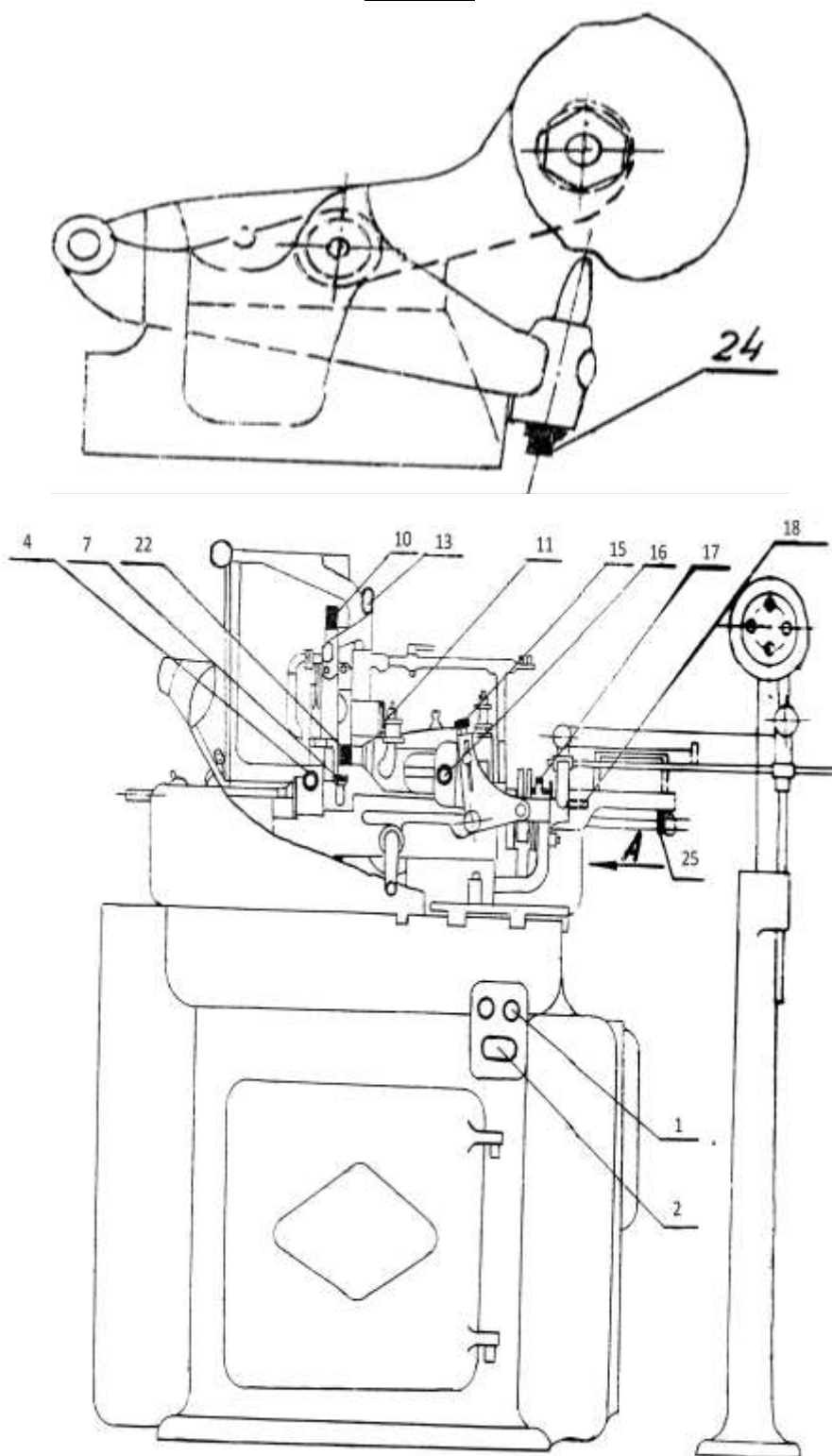
**Вид А**

Рис. 6.1. Органы управления станка

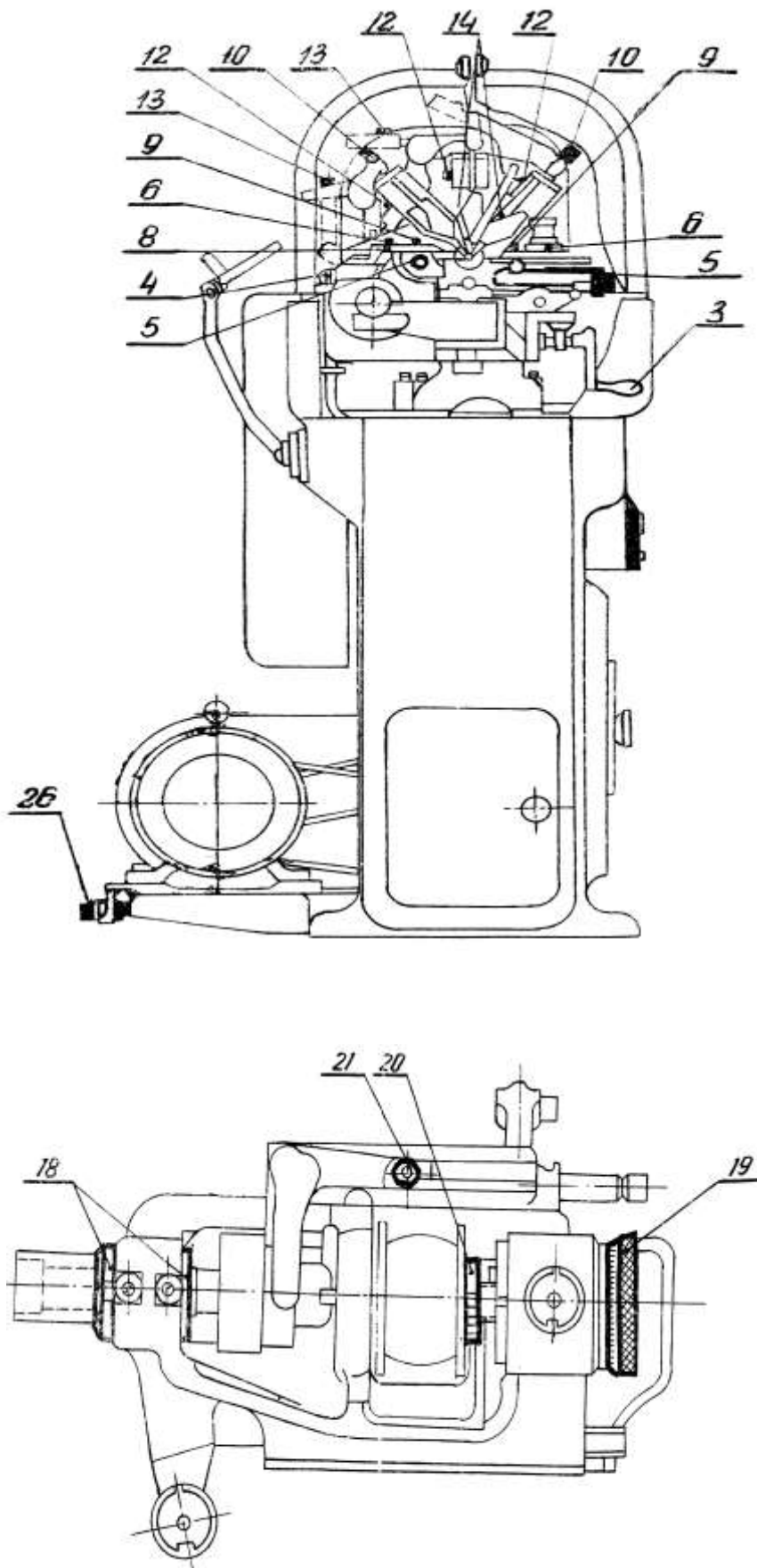


Рис. 6.1. Продолжение



### Спецификация органов управления

Номер по схеме	Содержание
1	Кнопки «Пуск» и «Стоп»
2	Выключатель освещения
3	Рукоятка ручного вращения распределительного вала
4	Винты регулировки поперечного перемещения суппортов балансира
5	Винты регулировки продольного перемещения суппортов балансира
6	Винты установки резцедержателей балансира относительно оси изделия
7	Регулировка упора балансира
8	Винты регулировки призм балансира
9	Винты крепления резцов балансира в резцедержателях
10	Винты регулировки поперечного перемещения резцов суппортов стойки
11	Винты регулировки продольного перемещения резцов суппортов стойки
12	Винты установки резцов суппортов по центру детали
13	Гайки для установки соотношения плеч рычагов стойки
14	Винты крепления резцов суппортной стойки
15	Винт установки соотношения плеч рычагов шпиндельной бабки
16	Винт крепления упорной плиты шпиндельной бабки
17	Регулировка упора шпиндельной бабки
18	Гайки регулировки переднего подшипника
19	Гайка регулировки зазора в задних подшипниках
20	Регулировка усилия зажима цанги
21	Палец регулировки зажима цанги
22	Гайка шпинделя
23	Рукоятка зажима кронштейна загрузочного устройства
24	Винты регулировки призм ШБ
25	Регулировка натяжения пружины обратного хода шпиндельной бабки
26	Винт для натяжения ремня

## 7. ПРИНЦИП РАБОТЫ АВТОМАТА И КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СХЕМА

Точение происходит при вращении прутка и его продольной подаче вместе со шпиндельной бабкой. Резцы имеют поперечное, по отношению оси заготовки, движение. Цикл движений режущего инструмента и прутка задается кулачками, рассчитанными на определенную деталь и установленными на главный шпиндель, редуктор вращения распределительном валу.

Основанием автомата являются литой коробчатой формы корпус 1Б10В–01011.

Снаружи на кронштейне, повернутом к задней стенке основания на подвижной плите установлен электродвигатель. Вращение от электродвигателя через шкивы А и Б передается на трансмиссионный вал 1А10П–01101 и на вал насоса. Натяжение ремня, идущего от электродвигателя на трансмиссионный вал, производится перемещением плиты. От трансмиссионного вала вращение передается на главный шпиндель, редуктор вращения распределителя и сменное приспособление. На валу насоса находится шкив 1А10П–01190 для вращения приспособления для многократного вывода сверла (1А10П–15).

В основании также находятся резервуар для охлаждающей жидкости, шкаф электрооборудования и пульт управления.

Натяжение ремней от трансмиссионного вала к приспособлению, главному шпинделю и редуктору производится при помощи натяжных роликов.

В корпусе станины смонтированы узлы и механизмы непосредственно связанные с изготовлением детали, т. е. распределительный вал, шпиндельная бабка (ШБ), суппортная стойка. На левой части станины находятся горизонтальные и вертикальные площадки для сменных приспособлений.

Подача ШБ вперед осуществляется при помощи кулачка, через рычаг 1Б10В–02013 и кулису 1Б10В–02012. Отход ШБ назад осуществляется пружиной.

Отношение плеч механизма подачи ШБ может быть изменено от 1:1 до 3:1 при помощи перемещения упора. 1103А–01–08 винтом. 1Б10В–02103.

Образующихся в результате износа зазор в червячной паре выбирается разворотом половинок червячного колеса 1Б10В–02061 эксцентриком 1А10П–02132.



Ручное вращение распределителя осуществляется рукояткой Ш Н84–64 при положении ее «от себя» и вращением против часовой стрелки. Включение автоматического цикла производится перемещением рукоятки «на себя».

Шпиндельная бабка предназначена для вращения и подачи прутка. Внутри корпуса бабки смонтирована на двух опорах полный шпиндель. Пруток проходит внутри шпинделя и зажимается цангой. Цанга зажимается и разжимается при помощи кулачков, установленных на распределителе рычажной системы и зажимной втулки.

На передней стенке корпуса стойки размещены три суппорта которых крепятся резцы. Перемещение их вниз осуществляется рычажной системой, в исходное положение суппорта возвращаются при помощи пружин.

На верхних рычагах системы имеются микрометрические винты для точной остановки резцов по диаметру обрабатываемой детали.

В центре корпуса стойки находится неподвижный люнет, являющийся опорой при обработке детали.

При обработке коротких деталей люнет может быть вынут. В этом случае передний конец ШБ вводится в отверстие стойки так, чтобы расстояние между торцом гайки шпинделя и плоскостью резцов равнялась 0,2–0,5 мм.

В продольном направлении по отношению обрабатываемой детали резцы перемещаются при помощи лимбов.

Балансир с двумя суппортами установлен на конусной оси закрепленной в суппортной стойке. Ручная подача резцов с помощью лимбов в них более тонкая, чем суппортной стойке. Поэтому резцы балансира рекомендуется использовать на самые точные работы.

Подача резцов производится качанием балансира относительно оси и осуществляется за счет контакта призмы, закрепленной в кронштейне балансира с кулачком на распределительном валу.

Загрузочное устройство предназначено для направления прутка и удержания его во время отхода ШБ, при разжатой цанге назад. Во время обточки т. е. когда ШБ идет перед, толкатель под действием груза не отстает от торца прутка, тем самым его поддерживая. По окончании материала флажок зацепляется за деталь, закрепленную на оси, и подает ее вперед. Благодаря этому освобождается палец и деталь с микропереключателем МП-3 подается вперед. В конце рабочего цикла рычаг нажимает на кнопку микропереключателя и размыкает цепь питания

электродвигателя, тем самым останавливается вращение ШБ и распределительного вала.

Подача охлаждающей жидкости в зону обработки производится через трубопровод шестеренчатым насосом Г11–11.

## **8. СВЕДЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА НАЛАДОК АВТОМАТОВ**

Точение деталей на автоматах продольного точения осуществляется резцами при продольном движении шпиндельной бабки с закрепленным в ней вращающимся прутком. Резцы расположены в резцедержателях суппортов, перемещающихся в плоскости, перпендикулярной оси шпинделя. Все перемещения суппорты и шпиндельная бабка автомата получают через систему рычагов от кулачков, устанавливаемых на распределительном валу станка. Конструкция системы рычагов позволяет преобразовать вращательное движение кулачка в поступательное перемещение суппорта или шпиндельной бабки. При этом имеется возможность изменения длины хода инструмента или обрабатываемой детали за счет изменения плеч рычагов. Профиль кулачков рассчитывается в зависимости от конфигурации обрабатываемой детали и обеспечивает изготовление партии однотипных деталей.

## **9. ИНСТРУКЦИЯ ПО РАСЧЕТУ НАЛАДКИ АВТОМАТА**

Расчет наладки станка должен производиться по заранее разработанной форме операционной карты наладки. В карте должны быть: номер и название детали, эскиз детали после обработки на автомате, с указанием допусков на размеры и шероховатости обработки, размер и профиль заготовки, наименование и марка материала, схема наладки, по переходам, расположение и назначение режущего и вспомогательного инструмента, порядок обработки, расчет режимов резания и производительность станка. Операционная карта является основным технологическим документом для наладчика.

При определении последовательности переходов рекомендуется:

- а) наиболее тяжелые и точные работы выполнять резцами балансира;
- б) фасонную обточку производить резцами балансира;
- в) во избежание увода сверла производить предварительную зацентровку детали центровочным сверлом;

г) сверление глубоких отверстий малых диаметров производить за несколько вводов сверла (применяются приспособление для многократного ввода и вывода сверла);

д) при сверлении диаметр отверстия тонкостенных изделий увеличивается, поэтому чистовую наружную обточку надо выполнять после сверления;

е) при точных работах не следует совмещать сверление с чистовой обточкой.

Весь цикл обработки детали на автомате делится на рабочие и холостые ходы и паузы.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХОДОВ ИНСТРУМЕНТА И ШПИНДЕЛЬНОЙ БАБКИ

Величина хода отрезного резца определяется как сумма половины обрабатываемого диаметра, величины зазора между прутком и резцом и величины перебега за центр.

$$L = L \text{ зазор} + L \text{ резания} + L \text{ перебег.}$$

Например, в переходе № 1 ход отрезного резца № 4.

$$4 = 0,475 + \frac{1,75}{2} + 0,1 \text{ мм.}$$

где 1,75 – диаметр обрабатываемого прутка;

0,475 – величина зазора между отрезным резцом и обрабатываемым прутком;

0,1 – величина перебега резца за центр.

Величина хода при врезании равна сумме полуразности начального и конечного диаметров обработки и величины зазора между резцом и обрабатываемым прутком.

$$L = L \text{ зазор} + L \text{ резания.}$$

Например, в переходе № 19.

$$L_{19} = \frac{1,75 - 0,78}{2} + 0,025 = 0,51 \text{ мм.}$$

где 1,75 – диаметр обрабатываемого материала;

0,78 – диаметр обработки;

0,25 – величина зазора между резцом и обрабатываемым прутком.

Величина хода шпиндельной бабки при отводе (переход 43) равна сумме длины детали и ширины отрезного резца.

$$L = L \text{ детали} + L \text{ отрезки;}$$

$$L_{43} = 3,25 + 0,2 = 3,45 \text{ мм.}$$

где 3,25 – длина детали;

0,2 – величина отрезка.

При нарезании резьбы ход инструмента равен сумме длины нарезаемой резьбы и величины подвода, равного длине 2–3 ниток нарезаемой резьбы.

$$L = L \text{ резьбы} + L \text{ подвода.}$$

При сверлении зацентрированных отверстий величина хода инструмента равна сумме длины цилиндрической части отверстия и величины подвода сверла, равной 1 мм.

$$L = L \text{ отверстия} + L \text{ подвода.}$$

Величина спуска и подъема на кулачках определяется путем умножения соответствующих величин ходов инструмента на отношения плеч рычагов.

$$H = L \cdot i.$$

Например, переход № 5.

$$H = 0,135 \cdot 3 = 0,405 \text{ мм.}$$

где  $H$  – подъем на кулачке балансира;

0,135 – величина отвода резца;

3 – отношение плеч рычага балансира.

Обточка конуса производится сложным движением резца и шпиндельной бабки. Например, при величине хода шпиндельной бабки, (переход 25) равной  $2,55 - 1,51 = 1,04$  мм, резец № 2 врезается на величину (переход № 26), равную:  $1,04 \cdot \operatorname{tg} 0^\circ 23' = 0,008$  мм.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ОБОРОТОВ ШПИНДЕЛЯ ПО ПЕРЕХОДАМ

Выбрав подачи, определяем количество оборотов шпинделя на каждый рабочий переход по формуле

$$n \text{ переход} = \frac{Z_p}{S} \text{ об,}$$

где  $Z$  – длина хода инструмента;

$S$  – величина подачи.

Например, переход 3

$$n_3 = \frac{0,35}{0,003} = 117 \text{ об.}$$

Количество оборотов шпинделя на совмещенные переходы также записывается в карту наладки, но заключается в скобки.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВ ХОЛОСТЫХ ХОДОВ

Предварительно определяется продолжительность всех не совмещенных рабочих переходов по формуле

$$t_p = \frac{\Pi_p}{\Pi_o} \cdot 60 \text{ с.}$$

где  $\Pi_p$  – сумма чисел оборотов шпинделя на не совмещенные рабочие переходы;

$\Pi_o$  – основное число оборотов шпинделя в минуту. Для данной детали

$$t_p = \frac{2033}{5000} \cdot 60 = 24 \text{ с.}$$

Ориентировочное время на холостые ходы определяется в зависимости от сложности изготовления и конфигурации детали и составляет от 20 до 40 % от времени на рабочие ходы.

$$t_x = (0,2-0,4) t_p.$$

Для данной детали  $t_x = 24 \times 0,35 = 8,4 \text{ с.}$

Предложенное время на изготовление одной детали

$$T = 24 + 8,4 = 32,4 \text{ с.}$$

Используя шаблон соответствующей производительности данной детали, определяют углы, необходимые для выполнения каждого из холостых ходов, и проставляют в графу «Холостые ходы». Число градусов на совмещенные переходы заключается в скобки.

Для зажима цанги отводится угол равный  $15^\circ$  для разжима –  $10^\circ$ . Кроме того, для обеспечения точного начала или окончания отдельных переходов следует проектировать гарантийные паузы в  $2-3^\circ$ , компенсирующие возможные неточности изготовления кулачков.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВ РАБОЧИХ ХОДОВ

Количество градусов на совмещенные холостые ходы записывается в графу «Для расчета», суммируется и используется для определения количества градусов на несовмещенные рабочие ходы.

$$L_p = 360^\circ - L_x,$$

где  $L_p$  – сумма углов в градусах на несовмещенные рабочие ходы;

$L_x$  – сумма углов в градусах на несовмещенные холостые ходы.

Для данного примера  $L_p = 360^\circ - 89^\circ = 271^\circ$ .

Величина угла на каждый рабочий переход определяется по формуле

$$L_{\text{пер}} = \frac{L_p}{\Pi_p} \cdot n_{\text{пер}}$$

Например, переход 13

$$L_{\text{пер}} 13 = \frac{271 \cdot 134}{2033} = 18^\circ.$$

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Определяется число оборотов шпинделя в минутах, необходимое для обработки данной детали.

$$\eta_{\text{ш}} = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot d}, \text{ об/мин}$$

где  $V$  – ориентировочно выбранная скорость резания;

$d$  – диаметр заготовки.

Для данной детали

$$\eta_{\text{ш}} = \frac{1000 \cdot 28}{3,14 \cdot 1,75} = 5100 \text{ об/мин.}$$

По таблице производительности автомата выбирается ближайшее число оборотов шпинделя и записывается в карту наладки. Для данной детали оно равно 5000 об/мин.

Количество оборотов шпинделя для изготовления одной детали определяется по формуле

$$\eta_a = \frac{\Pi_p \cdot 360}{L_p} \text{ оборотов}$$

В приведенном примере

$$\eta_a = \frac{2033 \cdot 360}{271} = 2700 \text{ оборотов}$$

Производительность автомата равна количеству деталей, изготавливаемых в одну минуту

$$A = \frac{\Pi_{\text{ш}}}{\Pi_a} \text{ шт./мин.}$$

Для данной детали

$$A = \frac{5000}{2700} = 1,84 \text{ шт./мин.}$$

В карту наладки записываем ближайшее значение из таблицы производительности (равное 1,71 шт./мин).

Время изготовления одной детали (одного оборота распределительного вала) определяется по формуле

$$T = \frac{60}{A} \text{ с.}$$

Например,

$$T = \frac{60}{1,71} = 35 \text{ с.}$$

### ВЫЧЕРЧИВАНИЕ КУЛАЧКОВ

В приведенном примере первым переходом считается отвод отрезного резца, который начинается от  $0^\circ$ . Далее в нарастающей последовательности, кончая  $360^\circ$ , соответственно технологическому процессу записываются в графу карты «углы – от и до» – углы учитываемых рабочих и холостых ходов. Соответствующие им радиусы записываются в графе «радиусы – от и до».

Например, учитываемый переход 10 занимает по продолжительности угол, равный  $4^\circ$ , на участке кулачка балансира от  $38^\circ$  до  $12^\circ$  от радиуса, равного 53,145 мм, до радиуса – 56,295 мм.

Затем проставляются углы не учитываемых совмещенных переходов, которые заключаются в скобки.

Например, переход № 11, совмещенный с переходом № 10, занимает на кулачке № 3 угол  $3^\circ$  на участке от  $39^\circ$  до  $42^\circ$ .

Полученные данные и данные таблицы используются для вычерчивания кулачков. На чертеже заготовки кулачка углы в градусах откладываются против часовой стрелки, наносятся дуги и находятся точки пересечения их с соответствующими радиусами.

Полученные точки соединяются кривыми.

Кривые спусков и подъемов вычерчивают по шаблону. Кривые рабочих ходов – это участки архимедовых спиралей.

При вычерчивании кулачков шпиндельной бабки проводится дуга радиусом 120 мм из центров, лежащих на окружности, радиус которой равен 128 мм, кулачка балансира – радиусом 126 мм из центров, лежащих на окружности, радиус которой равен 134 мм, 3, 4, 5 суппортов – радиусом 116 мм из центров, лежащих на окружности, радиус которой равен 125 мм.

Радиусы дуг соответствуют длинам плеч рычагов. Длина плеча равна расстоянию от оси качания до точки соприкосновения с кулачком. Радиусы окружности на которых лежат центры проводимых дуг,

соответствуют расстояниям осей качания рычагов от оси распределительного вала, на котором установлены кулачки.

Минимально необходимая пауза при работе смежных резцов одного за другим представлена в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Производительность до 20 шт./мин

Отход	Подход резца				
	№	№	№	№	№
№ 1					8°
№ 2			12	18°	
№ 3		15			
№ 4			12		18°
№ 5	8°			12°	

Производительность свыше 20 шт./мин

Отход	Подход резца				
	№ 1	№	№	№	№
№ 1					12
№ 2			18		
№ 3		20		20	
№ 4			16	20	26
№ 5	12°				

## 10. НАЛАДКА АВТОМАТА

Принцип обработки деталей на одношпиндельном автомате продольного точения основан на подаче вращающегося прутка через неподвижный люнет с расположенными около него резцами суппортной стойки (рис. 10.1).

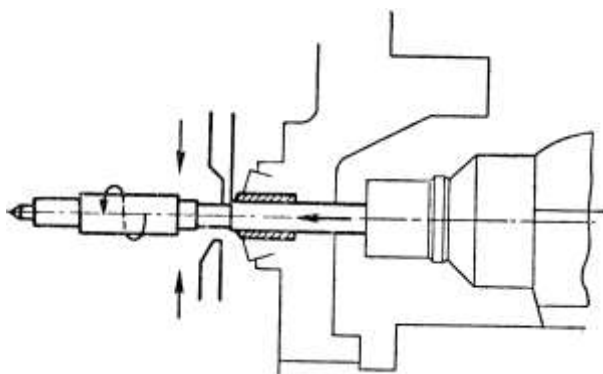


Рис. 10.1. Схема работы автомата продольного точения



Это позволяет с высокой точностью и качеством обрабатывать детали с соотношением длины к диаметру до 10 и более.

## 11. ТРЕБОВАНИЯ К ПРУТКОВОМУ МАТЕРИАЛУ

Разработку технологического процесса обработки деталей на автоматах нужно начинать с выбора прутков, так как точность обработки на автомате зависит от качества заготовки. Прутковый материал, предназначенный для обработки на автомате, должен быть чистым, не иметь забоин, заусенцев и следов коррозии. Шероховатость поверхности прутков должна быть не ниже  $Rz = 6,3 \div 10$  мкм. Для получения более точных деталей обрабатываемый прутки должны быть также более точными. Кроме того, на точность изготавливаемых деталей и шероховатость поверхности при их обработке на автоматах продольного точения влияют следующие факторы:

1) величина и постоянство зазора между внутренней поверхностью люнетной втулки и прутком [слишком большое отклонение диаметра очередного прутка в сторону «плюс» может вызвать заедание в люнете, а отклонение в сторону «минус» – потерю точности изделий как по диаметру (в сторону «плюс»), так и по длине];

2) постоянство отклонений диаметров в данной партии обрабатываемых прутков, поэтому прутки должны подбираться партиями по фактическим размерам;

3) неточность геометрической формы прутка (волнистость, конусность, овальность, граненность); следствием волнистости и конусности является разброс точности диаметральных параметров детали, а овальности и граненности – овальность на детали: неточность формы не должна превышать предельных отклонений диаметров в партии;

4) непрямолинейность прутка (искривление оси), этот фактор вызывает разброс по диаметру и длине.

Для того чтобы исправить неточности формы пруткового материала, необходима дополнительная его обработка: калибровка через фильеру волочением или бесцентровое шлифование. Для прутков, у которых прямолинейность не соответствует норме, необходима дополнительная правка.

## 12. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Автоматы продольного точения даже без применения дополнительных устройств обладают широкими технологическими возможностями. Так, на автоматах можно производить обтачивание большого количества ступеней, прямых и обратных конусов, обработку за буртом, подрезку торцов, протачивание торцовых углублений и поднутрений, растачивание неглубоких отверстий, зацентровку торца, протачивание канавок, снятие фасок и притупление кромок, обработку фасонных поверхностей как фасонными резцами, так и методом совмещения продольной и поперечной подачи режущего инструмента (сложным движением), а также накатывание рифлений различной формы.

С применением различных дополнительных устройств технологические возможности обработки деталей на автоматах продольного точения увеличиваются.

Если к поверхности отверстия или его концентричности относительно наружного диаметра предъявляются повышенные требования, то отверстие растачивают резцами. Преимуществом растачивания резцами является возможность обработки отверстия независимо от диаметра режущего инструмента, причем наивысшая точность достигается при растачивании отверстия резцом 1, закрепленным в резцедержателе балансира, поставленном на упор. В этом случае точность обрабатываемого отверстия не зависит от точности изготовления кулачка. При растачивании отверстий резцом необходимо, чтобы глубина отверстия была не больше двух диаметров. Более глубокие отверстия рекомендуется растачивать с малой глубиной резания.

Для создания оптимальных условий при отрезке детали используют по возможности узкий отрезной резец. Перемещение резца, как правило, продолжается до оси детали, за исключением деталей, имеющих сквозное отверстие. Оставшийся на торце прутка после отрезки детали остаток (грат) подрезают отрезным резцом с большей подачей. Для улучшения условий резания режущая кромка отрезного резца должна иметь наклон к оси вращения. Значения угла наклона  $\alpha$  зависят от обрабатываемого материала и требуемой шероховатости поверхности и находятся в пределах от 15 до 25°. Ширину отрезного резца выбирают в зависимости от диаметра обработки по приложению 5. При выборе ширины отрезного резца нужно учитывать еще его стойкость и вынужденные потери материала при отрезке. В некоторых случаях при обработке

на автоматах продольного точения деталей приборов или часов рекомендуется длину рабочего хода при отрезке детали разбить на несколько участков, имеющих различные подачи.

При составлении технологического процесса обработки детали на автомате продольного точения рекомендуется следующее.

1. Обработку поверхности детали, имеющей повышенные требования к точности, производить резцом 1 балансира, имеющим регулируемый упор. При этом радиус участка кулачка балансира, на котором происходит обработка точной поверхности детали, должен быть несколько меньше расчетного. В случае последовательной обработки резцом 1 нескольких ступеней упором можно воспользоваться только при обтачивании ступени, имеющей наименьший диаметр.

2. Поперечная подача резца 1 осуществляется пружиной. При работе с поперечной подачей этот резец целесообразно использовать только для легких работ (протачивание канавок, обтачивание фасок).

3. Резец 2 балансира подается к оси шпинделя кулачком. Этот резец, как правило, используют для работ, требующих больших усилий резания (отрезка, накатывание рифлений, фасонное обтачивание).

4. Конструктивные особенности балансира не позволяют совмещать работу резцов 1 и 2. Поэтому при составлении технологического процесса обработки детали необходимо предусматривать поочередную их работу.

5. В деталях со сквозным отверстием глубину сверления следует увеличивать с учетом отрезного резца.

6. В случае обтачивания детали за буртиком при расчете длины рабочего хода шпиндельной бабки следует учитывать ширину отрезного резца.

7. При обточке деталей, имеющих повышенные требования к шероховатости поверхности торцов, необходимо применять после подрезки торцов небольшой отвод шпиндельной бабки (0,3–0,5 мм) с последующим быстрым отводом подрезного резца.

8. В деталях с повышенными требованиями к соосности отверстия и наружного диаметра зацентровку прутка следует производить центровочным резцом, закрепленным в суппортной стойке.

9. Совмещать работу осевого инструмента с резцами суппортной стойки только при условии достаточной жесткости детали: в случае сверления и обтачивания тонкостенных деталей сверление отверстия производить в первую очередь; совмещение работы инструментов вертикальных суппортов и балансира производить в соответствии с

рис. 12.1, а значения углов поворота кулачков, необходимые для отвода и подвода смежно расположенных резцов, выбирать из табл. 12.1.

	1	2	3	4	5
1			○	○	
2				○	○
3	○				○
4	○	○			
5		○	○		

○ — Совмещение возможно

Рис. 12.1. Варианты совмещения работы суппортов

Значение углов, необходимые для подвода  
и отвода смежно расположенных резцов

Модель автомата	Производительность, шт./мин	Отвод резца	Угол (...°), необходимый для подвода резца					
			1	2	3	4	5	
1	2	3	4	5	6	7	8	
1103, 1103А, 1А10П, 1М10В, Tornos М7, Tornos М10, Tornos R10	До 20	1					8	
		2						
		3			12			18
		4		15				
		5	8			12		12
	Св. 20	1						12
		2					18	
		3			20			20
		4				16		26
		5	12				18	
1Д25В	До 12	1					12	
		2						
		3			12			18
		4		15				
		5	8			12		12
	Св. 12	1						12
		2					18	
		3			20			20
		4				16		18
		5	12				18	
1П16, Tornos R16, Tornos R20	До 5	1					14	
		2						
		3			12			12
		4						
		5						
	От 5 до 12	1						18
		2						
		3			13			
		4			15			
		5	12					
	Св 12	1						27
		2					16	
		3			18			26
		4				18		26
		5	12				22	

## 13. РАСЧЕТ НАЛАДКИ АТОМАТА

### 13.1. Определение технологической последовательности обработки

В соответствующие графы операционной карты заносят данные о детали: наименование материала заготовки; марку материала, его твердость; профиль и размер заготовки с указанием допусковых отклонений; ГОСТы на сортамент и материал прутка; смазочно-охлаждающую жидкость.

Пользуясь «Рекомендациями по разработке технологического процесса», устанавливают следующую технологическую последовательность обработки триба:

Резец 1 – обтачивание  $\varnothing 0,9$  мм,  $\varnothing 1,3$  мм,  $\varnothing 2,2$  мм;

Резец 2 – обтачивание правой стороны детали:  $\varnothing 3,8$  мм,  $\varnothing 2,2$  мм,  $\varnothing 0,9$  мм;

Резец 4 – обтачивание поднутрения;

Резец 3 – отрезка детали.

Рабочие переходы в порядке выбранной обработки триба (рис. 13.1) заносят в операционную технологическую карту.

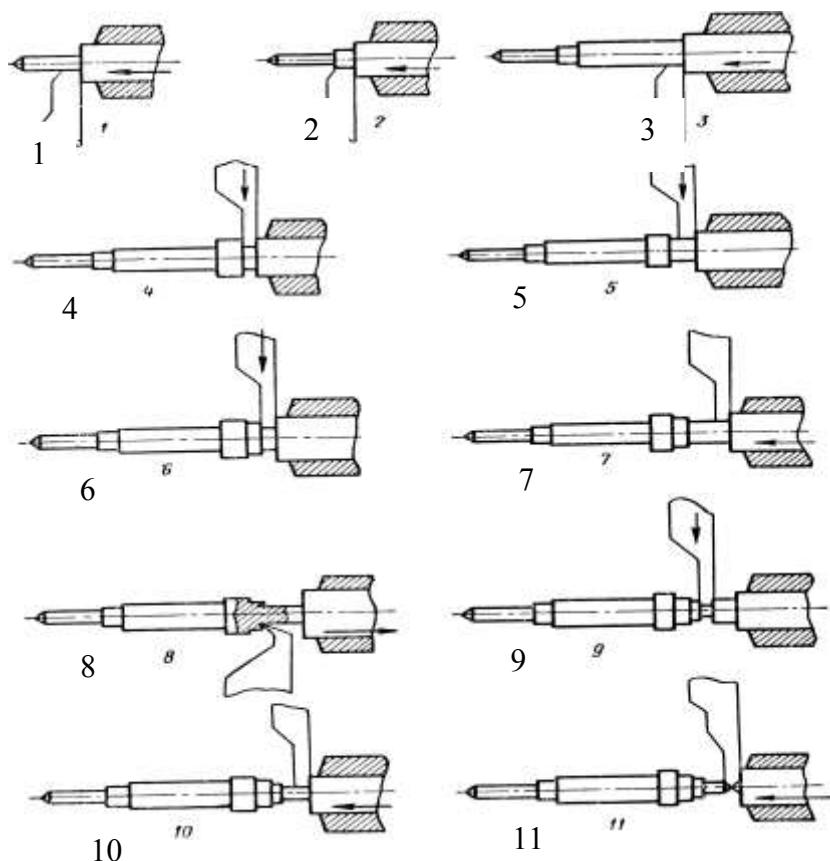


Рис. 13.1. Последовательность рабочих переходов при обработке триба

Далее вычерчивают чертеж детали с указанием всех необходимых размеров, допускаемых отклонений, шероховатости поверхностей и технических требований к детали. Если это необходимо, деталь вычерчивают в увеличенном масштабе. Рекомендуется деталь вычерчивать в том же положении по направлению обработки, в каком она обрабатывается на автомате. Здесь же вычерчивают положение режущего инструмента относительно отрезного резца с указанием номеров резцов и необходимых размеров (ширина отрезного резца, расстояние резцов и режущих инструментов дополнительных устройств от линии отрезки).

Кроме перечисленного, проставляют числовые значения исходных положений режущих кромок резцов балансира от обрабатываемого прутка.

### 13.2. Определение длины перемещения режущего инструмента или шпиндельной бабки

При обтачивании цилиндрических поверхностей методом продольной подачи (рис. 13.2) подвод резца  $l_{\text{и}}^1$ , и длину рабочего хода шпиндельной бабки  $l_{\text{ш}}^1$ , определяют соответственно по формулам

$$l_{\text{и}} = (D - D_1)/2 \text{ и } l_{\text{ш}} = l_1 + \Delta,$$

где  $D$  – диаметр, определяющий исходное положение резца, мм;  $D_1$  – обрабатываемый диаметр, мм;  $l_1$  – длина обтачиваемой поверхности по чертежу, мм;  $\Delta$  – подвод резца, мм (при точении, подрезании, зенкерование и развертывании длина подвода принимается равной 0,1–0,5 мм; при отрезке с образованием конуса на обоих концах детали – равной 0,03–0,2 мм);

$l_{\text{и}}$  – длина рабочего хода при всех перемещениях инструментов;

$l_{\text{ш}}$  – длина рабочего хода при всех перемещениях шпиндельной бабки.

Длина отвода резца из одного рабочего положения в другое при обтачивании ступенчатых деталей одним резцом определяется по формуле  $l_{\text{и}} = (D_2 - D_1)/2$ ,

где  $l_{\text{и}}$  – длина отвода резца, мм;  $D_1$  – диаметр детали, обрабатываемый в предыдущем переходе, мм;  $D_2$  – обтачиваемый диаметр, мм.

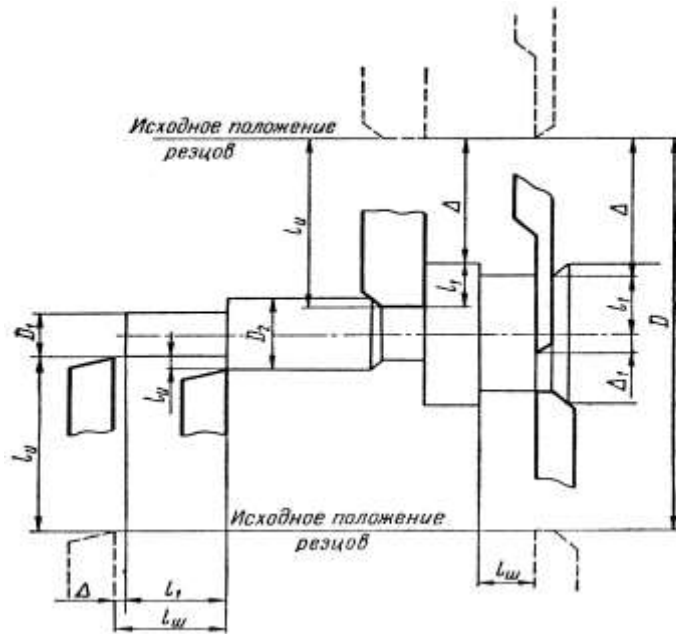


Рис. 13.2. Рабочий ход инструмента и шпиндельной бабки при обработке детали на автомате продольного точения

При определении длины рабочих ходов резцов в расчет принимают обрабатываемые диаметры с учетом половины поля допуска.

Детали с коническими поверхностями обрабатывают сложным движением, т. е. одновременным перемещением шпиндельной бабки с обрабатываемым прутком и одного из резцов. Если перемещение резца направлено к оси детали, то получают конус, вершина которого ближе к отрезному резцу (рис. 13.3).

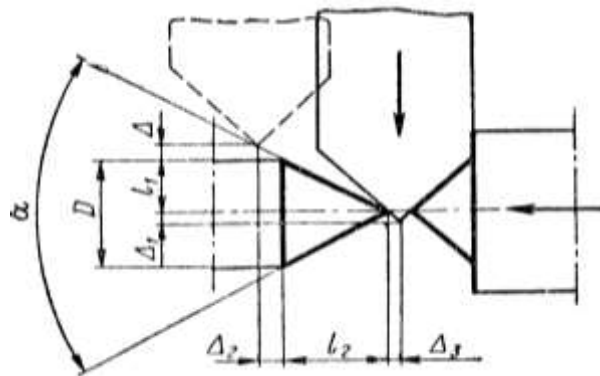


Рис. 13.3. Обтачивание конуса отрезным резцом

Если перемещение резца направлено от оси детали, то получают конус, своим основанием расположенный ближе к отрезному резцу (рис. 13.4).



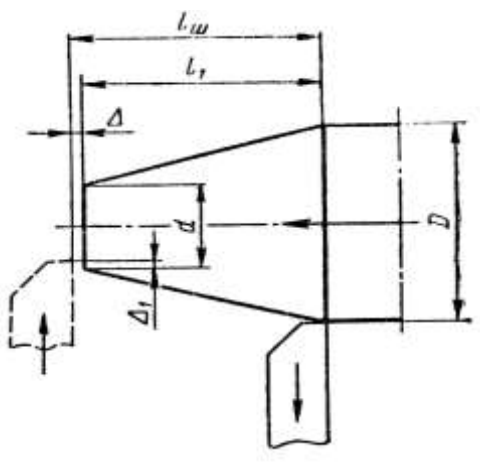


Рис. 13.4. Обтачивание проходным резцом

Для обтачивания конусной части детали от диаметра  $d$  до диаметра  $D$  необходимо, чтобы во время продольного перемещения прутка на длину  $l_1$  резец переместился на величину  $(D - d)/2$ . Длина рабочего хода шпиндельной бабки  $l_{ш}$  и длина рабочего хода резца  $l_{и}$  определяются в этом случае по формулам:

$$l_{ш} = l_1 + \Delta \text{ и } l_{и} = D/2 + \Delta_1$$

где  $l_1$  – длина конуса, мм;  $\Delta$  – подвод шпиндельной бабки, мм;  $\Delta_1$  – перебеж резца.

При центрировании торца резцом (рис. 13.5) длина рабочего хода шпиндельной бабки может быть определена по формуле  $l_{ш} = l_1 + \Delta$ , где  $l_1$  – глубина зацентровки, мм;  $\Delta$  – длина подвода резца, мм. Глубина зацентровки зависит от диаметра и угла конуса центрового отверстия.

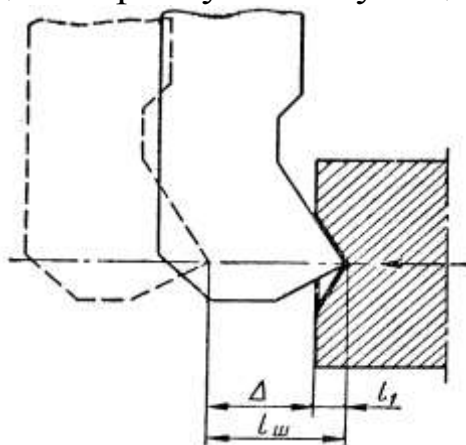


Рис. 13.5. Растачивание отверстий поднутрений резцом

При обтачивании поднутрений (рис. 13.6) длина рабочего хода шпиндельной бабки  $l_{ш}$  определяется по формуле  $l_{ш} = l_1 + \Delta$ , где  $l_1$  –

глубина поднутрения, мм;  $\Delta$  – длина подвода резца, мм. Обтачивание поднутрений аналогично операции центrovания торца.

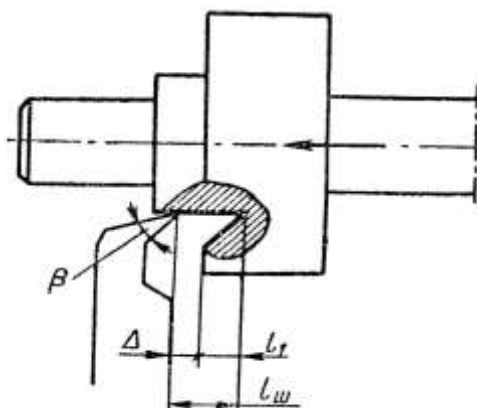


Рис. 13.6. Обтачивание резцом

При растачивании отверстий (рис. 13.7) длина рабочего хода шпиндельной бабки может быть определена по формуле  $l_{ш} = l_1 + \Delta$ , где  $l_1$  – глубина растачивания, мм;  $\Delta$  – длина подвода резца, мм.

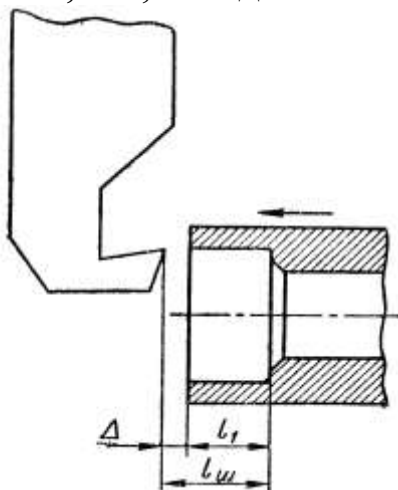


Рис. 13.7. Растачивание отверстий резцом

При отрезке с образованием конусов на обоих концах детали длина рабочего хода (рис. 13.8) резца определяется по формуле

$$l_{и} = \Delta + \frac{D}{2} + \Delta_1,$$

где  $l_{и}$  – длина рабочего хода резца, мм;  $D$  – диаметр конуса, мм;  $\Delta$  – длина подвода резца, мм;  $\Delta_1$  – перебеж резца, мм. Длина рабочего хода шпиндельной бабки в этом случае может быть определена по формуле

$l_{\text{ш}} = \Delta_2 + l_2 + \Delta_3$ , где  $l_2$  – длина конуса, мм;  $\Delta_2$  – длина подвода резца, мм;  $\Delta_3$  – перебег резца, мм ( $\Delta_2 = \frac{\Delta}{\text{tg} \frac{\alpha}{2}}$ ;  $\Delta_3 = \frac{\Delta_1}{\text{tg} \frac{\alpha}{2}}$ , где  $\alpha$  – угол конуса, °).

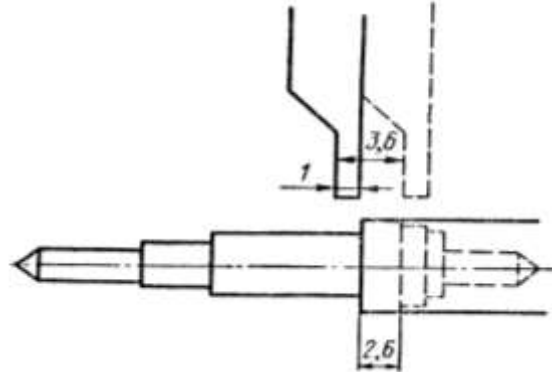


Рис. 13.8. Определение длины рабочего хода шпиндельной бабки для перехода 17

Для резцов балансира в качестве исходного положения выбирают средний радиус кулачка. В этом случае режущие кромки резцов 1 и 2 находятся в горизонтальной плоскости. Расстояние от прутка до режущих кромок резцов 1 и 2 должно быть, как правило, одинаковым, за исключением тех случаев, когда по условиям особенности геометрических параметров детали или ее габаритных размеров эти расстояния могут быть различными.

При обработке триба эти резцы отстоят от прутка на расстоянии 0,5 мм каждый, что обеспечивает его беспрепятственное прохождение между ними.

На основании вышеприведенных формул определяем длины рабочих ходов инструментов и шпиндельной бабки при обработке триба:

$$\text{переход 5 – подвод резца 1 – } l_{\text{и}} = \frac{(6 - 0,9)}{2} = 2,55 \text{ мм};$$

$$\text{переход 6 – обточка } \varnothing 0,9 \text{ мм – } l_{\text{ш}} = 6,4 \text{ мм (по чертежу детали);}$$

$$\text{переход 8 – отвод резца 1 до } \varnothing 1,3 \text{ мм – } l_{\text{и}} = \frac{(1,3 - 0,9)}{2} = 0,2 \text{ мм};$$

$$\text{переход 10 – обточка } \varnothing 1,3 \text{ мм – } l_{\text{ш}} = 1,8 \text{ мм (по чертежу детали);}$$

$$\text{переход 12 – отвод резца 1 до } \varnothing 2,2 \text{ мм – } l_{\text{ш}} = \frac{(2,2 - 1,3)}{2} = 0,45 \text{ мм};$$

$$\text{переход 14 – обточка до } \varnothing 2,2 \text{ мм – } l_{\text{ш}} = 11,2 \text{ мм (по чертежу детали);}$$

переход 16 – отвод резца 1 –  $l_{и} = 2,55 - (0,2 + 0,45) = 1,9$  мм;

переход 17 – ход шпиндельной бабки. Из рис. 12 видно, что длина хода шпиндельной бабки в этом переходе складывается из длины буртика (2,6 мм) и ширины резца 2 (1 мм), т. е.  $l_{ш} = 2,6 + 1 = 3,6$  мм; пере-

ход 18 – подвод резца 2 –  $l_{и} = \frac{(6-5)}{2} - 0,1 = 0,4$  мм;

переход 19 – врезание резцом 2 до  $\varnothing 3,8$  мм –  $l_{и} = (5 - 3,8) \cdot 2 + 0,1 = 0,7$  мм;

переход 21 – обточка  $\varnothing 3,8$  мм –  $l_{ш} = 0,6$  мм (по чертежу детали);

переход 23 – врезание резцом 2 до  $\varnothing 2,2$  мм –  $l_{и} = \frac{(3,8 - 2,2)}{2} = 0,8$  мм;

переход 25 – обточка  $\varnothing 2,2$  мм –  $l_{ш} = 3,7 - 1 = 2,7$  мм.

Из рис. 13.9 видно, что при обтачивании  $\varnothing 2,2$  мм длину рабочего хода шпиндельной бабки необходимо увеличить с таким расчетом, чтобы дать возможность резцу 4 подойти к  $\varnothing 2,2$  мм и обточить поднутрение;

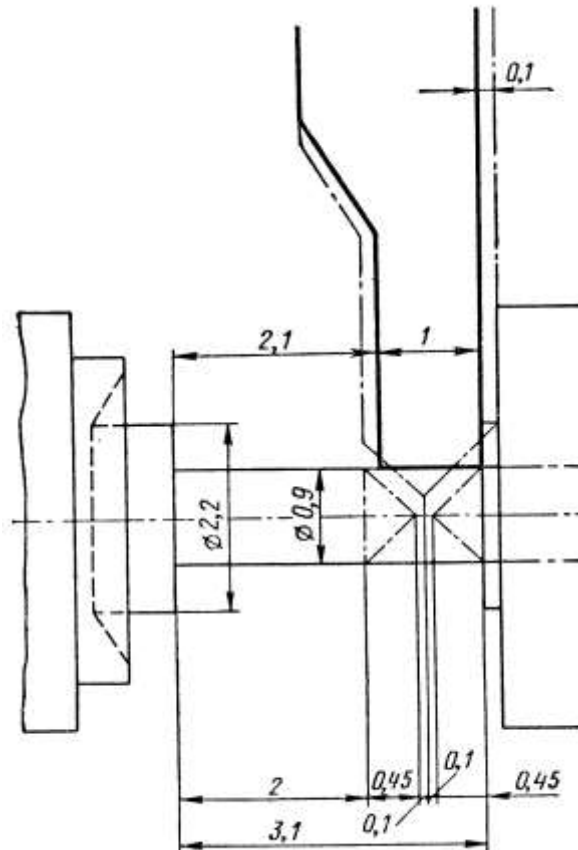


Рис. 13.9. Определение длины рабочего отвода хода шпиндельной бабки для перехода 25

переход 27 – отвод резца 2 –  $l_{\text{и}} = 0,4 + 0,7 + 0,8 = 1,9$  мм;

переход 29 – обточка поднутрения –  $l_{\text{ш}} = 0,4 + 0,3 = 0,7$  мм;

переход 31 – ход шпиндельной бабки. Ход шпиндельной бабки в этом случае равен отводу ее при обточке поднутрения  $l_{\text{ш}} = 0,7$  мм;

переход 33 – отвод шпиндельной бабки. На рис. 13.10 видно, что для врезания резца 2 до  $\varnothing 0,9$  мм шпиндельную бабку необходимо отвести на 2,2 мм, т. е.  $l_{\text{ш}} = 3,2 - 1 = 2,2$  мм;

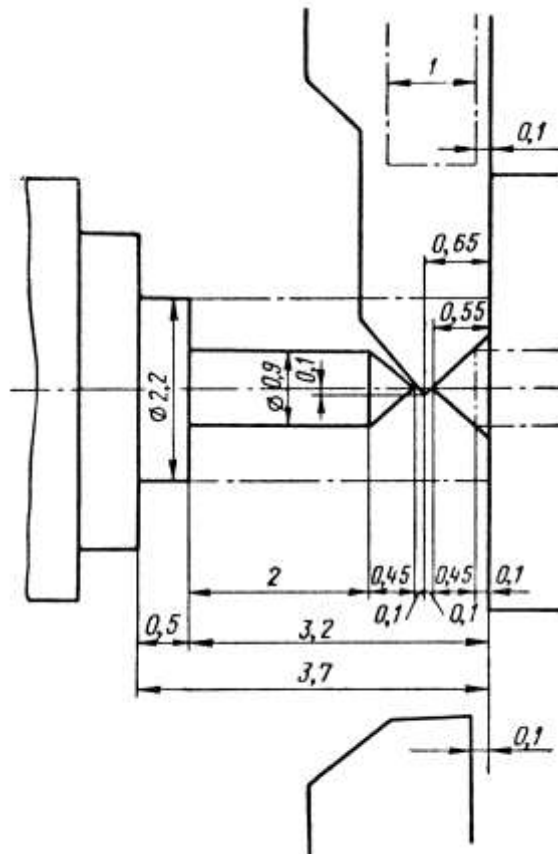


Рис. 13.10. Определение длины шпиндельной бабки для перехода 33

переход 35 – подвод резца 2 –  $l_{\text{и}} = \frac{(6-1,3)}{2} - 0,1 = 2,25$  мм;

переход 36 – врезание резцом 2 до  $\varnothing 0,9$  мм –  $l_{\text{и}} = (1,3 - 0,9) \times 724 - 0,1 = 0,75$  мм;

переход 38 – обточка  $\varnothing 0,9$  мм –  $l_{\text{ш}} = 3,1 - 1 = 2,1$  мм;

переход 40 – отвод резца 2 –  $l_{\text{и}} = 2,25 + 0,75 = 3$  мм;

переход 41 – отвод шпиндельной бабки. Из рис. 14 видно, что шпиндельная бабка должна отойти на 0,65 мм, чтобы вершина отрезного резца оказалась в положении начала отрезки, т. е.  $l_{\text{ш}} = 0,1 + 0,45 + 0,1 = 0,65$  мм;

переход 43 – отрезка детали. Угол конуса на концах детали равен  $45^\circ$ , поэтому ход резца 3 и ход шпиндельной бабки равен  $0,65$  мм, т. е.  $l_{ш} = 0,1 + 0,45 + 0,1 = 0,65$  мм;

переход 2 – отвод шпиндельной бабки. Отвод шпиндельной бабки равен длине детали плюс  $0,2$  мм (потери при перебеге отрезного резца за ось детали – рис. 13.11), т. е.  $l_{ш} = 26 + 0,2 = 26,2$  мм.

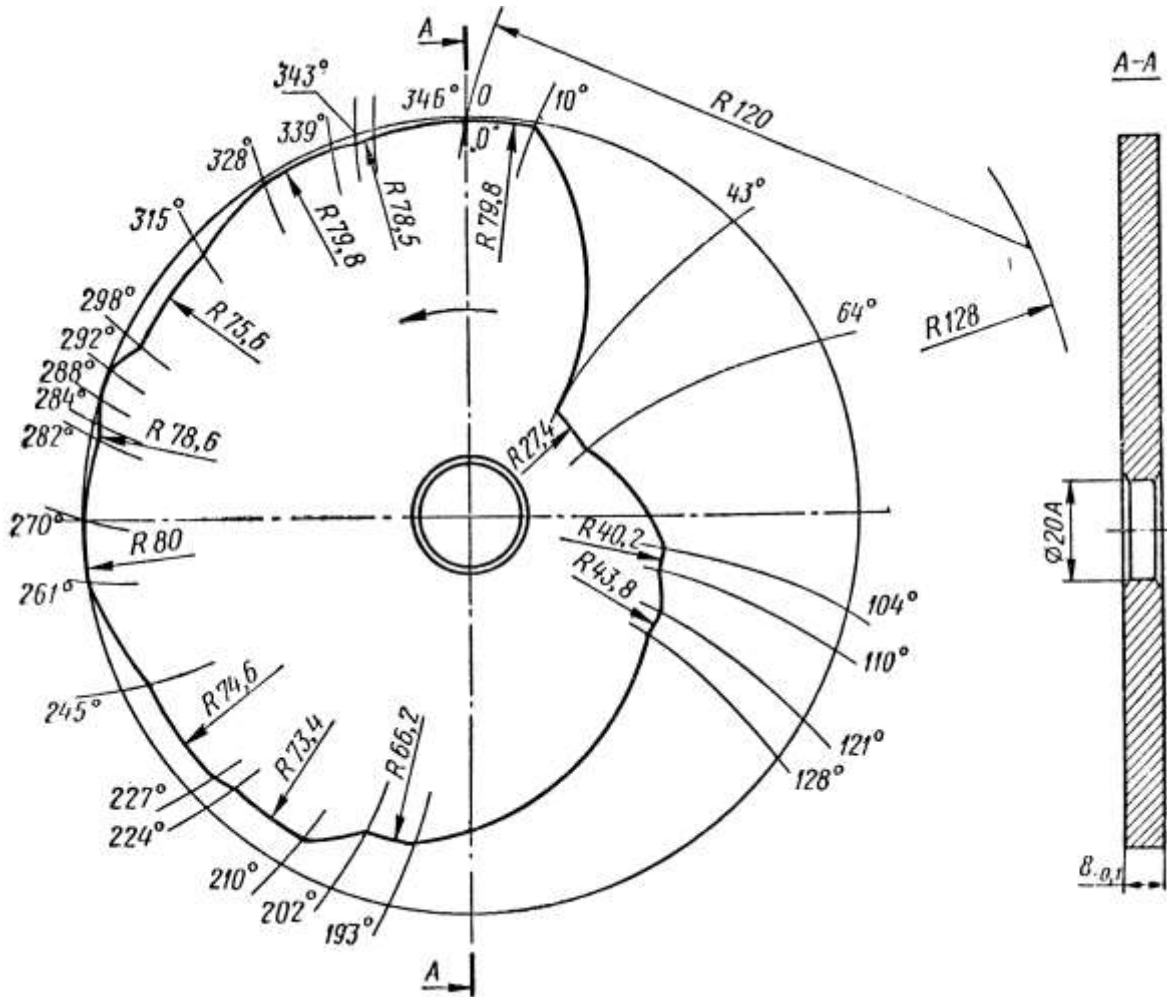


Рис. 13.11. Кулачок шпиндельной бабки

Рассчитанные длины рабочих и холостых перемещений заносят в операционную технологическую карту в графу «Ход инструмента или шпиндельной бабки».

Значения передаточных отношений хода инструмента или шпиндельной бабки к перепаду кулачка выбирают из паспорта станка, где приведены размеры дисковых кулачков и рычагов подачи суппортов.

Затем определяют значения подъемов и спадов на кулачках с учетом отношений плеч рычагов. Полученные данные позволяют определить радиусы переходов. После определения углов рабочих и холостых

ходов при помощи шаблонов вычерчивают профили кулачков. На рис. 15, 16, 17 приведены размеры кулачков: шпиндельной бабки, вертикального суппорта 3, вертикального суппорта 4.

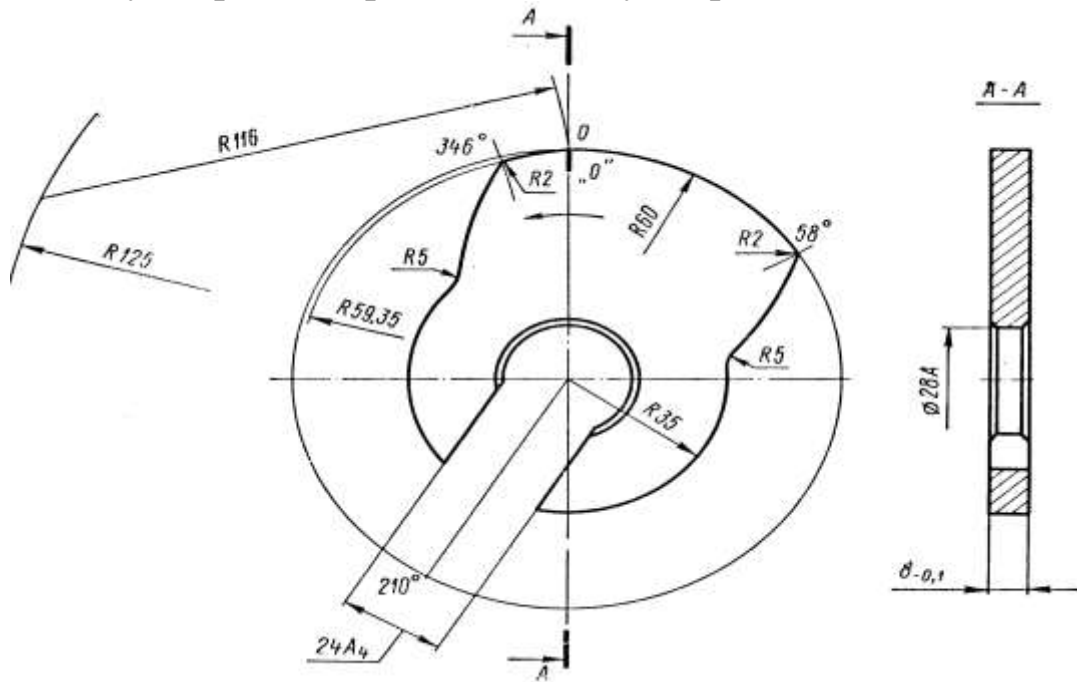


Рис. 13.11. Кулачок вертикального суппорта 3

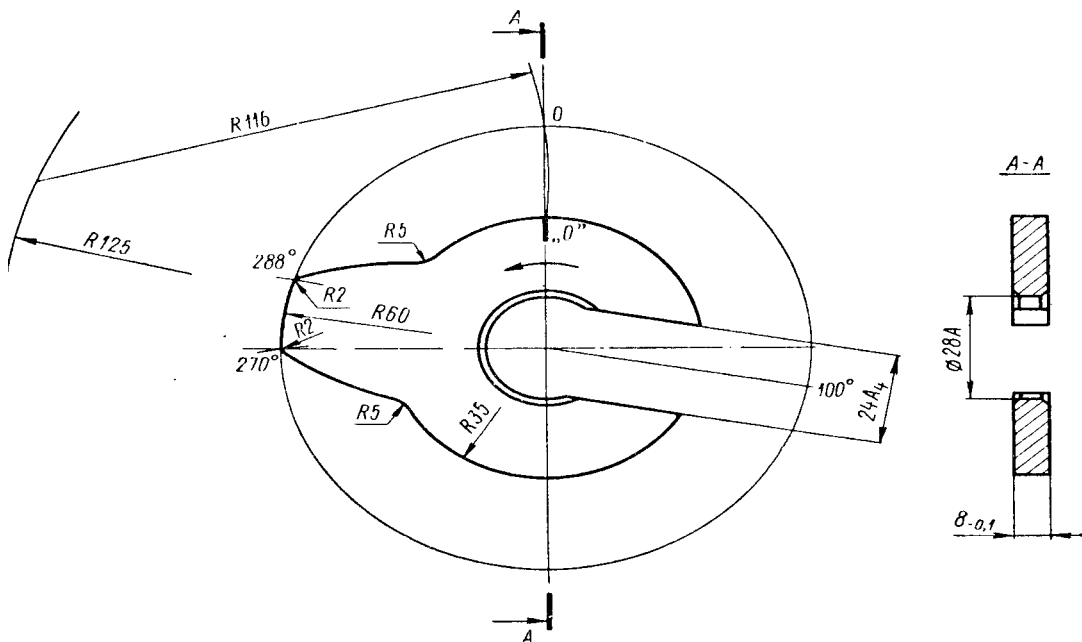


Рис. 13.12. Кулачок вертикального суппорта

### 13.3. Выбор режимов резания

При выборе режимов резания следует учитывать экономический фактор – стойкость режущих инструментов. Поэтому режимы резания

следует выбирать с таким расчетом, чтобы переналадка инструмента производилась не раньше, чем через 4 или 8 ч работы автомата.

В случае, когда на автомате обрабатывают сложные детали с использованием большого количества режущего инструмента, режимы резания должны быть такими, чтобы стойкость режущего инструмента обеспечивала работу автомата в течение более длительного времени.

Основными критериями выбора режимов резания являются: точность и шероховатость обрабатываемых поверхностей, припуск на обработку, обрабатываемый материал, материал режущего инструмента, охлаждающая жидкость, жесткость системы технологической, состояние оборудования. Режимы резания выбирают по общемашиностроительным нормативам времени и режимов резания на токарно-автоматные работы (М., Машиностроение, 1970). В соответствии с этими факторами режимы резания выбирают по специальным таблицам, рекомендуемым заводами-изготовителями в руководствах станков.

Значение скорости резания для обработки триба выбирают из табл. 4. При этом необходимо учитывать, что скорости резания, применяемые на автоматах продольного точения, значительно отличаются от скоростей резания, применяемых для обработки деталей на универсальных станках. Уменьшая в определенных пределах скорость резания при обработке деталей на автоматах продольного точения, тем самым повышают стойкость инструмента, сокращают частые остановки автомата для переточки и переналадки режущего инструмента.

Для обработки триба из углеродистой инструментальной стали марки У7АВ выбирают скорость резания, равную 30 м/мин. При применении твердосплавного инструмента марки ВК6М скорость резания можно увеличить в 1,5–2 раза. С учетом выбранного коэффициента увеличения получают скорость резания, равную  $30 \cdot 1,7 = 51$  м/мин.

По формуле

$$n = 1000v/(\pi D) \quad (13.1)$$

определяют частоту вращения шпинделя, необходимую для получения выбранной скорости резания  $n = (1000 \cdot 51)/(3,14 \cdot 5) = 3250$  об/мин. По таблице находят ближайшее значение частоты вращения шпинделя автомата модели 1Б10В, равное 3150 об/мин, и по формуле

$$v = \pi Dn/1000. \quad (13.2)$$

Ориентировочные значения подач (мм/об), рекомендуемые при работе инструментами из быстрорежущей стали для различных видов обработки корректируют скорость резания:  $v = (3 \cdot 5 \cdot 3150)/1000 = 49,5$  м/мин. Откорректированную скорость резания и частоту вращения



шпинделя вписывают в соответствующие графы операционной технологической карты.

Ориентировочные значения подач могут быть выбраны из табл. 13.2, а поправочные коэффициенты в зависимости от вида обрабатываемого материала – из табл. 13.3.

Так как к трибу предъявляются высокие технические требования, то подачи выбирают из графы «Шероховатость поверхности  $R_z = 6,3–10$  мкм». Поправочный коэффициент из табл. 13.1 для углеродистой стали равен 0,8. Однако, принимая во внимание особенности обработки данной детали, на отдельных переходах подачи назначают ниже рекомендуемых (табл. 13.1).

Таблица 13.1

Ориентировочные значения скоростей резания (м/мин),  
рекомендуемые при работе инструментом из быстрорежущей стали  
для различных видов обработки

Обрабатываемый материал	Продольная фасонная обточка и отрезка	Сверление	Зенкерование	Развертывание	Накатывание рифлений	Нарезание резьбы	
						метчиками	плашками
1	2	3	4	5	6	7	8
Сталь 20, $\sigma_B = 40 \div 50 \text{ кгс/мм}^2$	45–55	30–40	25–30	8–12	30–35	3–6	1,8–3,5
Сталь 35 $\sigma_B = 50 \div 60 \text{ кгс/мм}^2$	35–45	25–35	20–25	6–10	25–32	2,5–5,5	1,8–3,5
Сталь 45 $\sigma_B = 60 \div 70 \text{ кгс/мм}^2$	25–35	20–25	18–20	6–8	20–30	2–5	1,5–3
Сталь А12 $\sigma_B = 75 \text{ кгс/мм}^2$	50–70	30–50	20–35	10–15	35–45	3–8	2,8–5
Стали У7 – У13А	18–25	15–20	10–15	5–8	15–20	1,5–3,5	1–2,5
Хромистая и нержавеющая стали	15–25	10–15	8–12	4–6	15–20	1,5–3	0,8–2
Латунь	60–180	50–100	45–80	20–40	70–100	4,5–20	4–18
Бронза	35–60	30–40	25–35	15–30	35–50	4–12	3,5–10
Алюминий	150–200	90–180	60–80	20–50	90–120	6–20	5,5–20

Таблица 13.2

Ориентировочные значения подач (мм/об), рекомендуемые при работе инструментами из быстрорежущей стали для различных видов обработки

Диаметр обработки, мм	Вид обработки	Глубина резания, мм	Диаметр сверла, мм	Глубина сверления, мм	Шероховатость поверхности					
					$R_z = 6,3-10$ мкм		$R_z = 10-20$ мкм		$R_z = 40$ мкм при большой производительности	
					Сталь 45	Латунь	Сталь 45	Латунь	Сталь 45	Латунь
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	Продольное обтачивание	0,8			0,01	0,03	0,015	0,05	0,02	0,08
		0,4			0,012	0,038	0,018	0,06	0,025	0,01
	Врезание и отрезка			0,003	0,019	0,005	0,03	0,006	0,05	
	Сверление		1,0	3	0,0055	0,025	0,008	0,04	0,011	0,065
			1,0	6	0,0035	0,016	0,005	0,025	0,007	0,04
			1,5	5	0,007	0,03	0,01	0,045	0,0013	0,08
			1,5	10	0,005	0,019	0,007	0,031	0,0009	0,05
4	Продольное обтачивание	1,5			0,01	0,05	0,014	0,08	0,018	0,12
		1,0			0,012	0,063	0,017	0,1	0,022	0,15
		0,5			0,014	0,075	0,02	0,12	0,026	0,18
	Врезание и отрезка			0,004	0,03	0,055	0,048	0,008	0,072	
	Сверление		2,0	5	0,014	0,045	0,02	0,07	0,026	0,11
			2,0	20	0,007	0,022	0,01	0,034	0,013	0,055

			2,5	5	0,016	0,06	0,022	0,095	0,028	0,15		
			2,5	25	0,008	0,03	0,011	0,047	0,014	0,075		
			3,0	6	0,018	0,07	0,025	0,11	0,032	0,18		
			3,0	30	0,009	0,035	0,012	0,055	0,016	0,09		
			3,5	7	0,02	0,7	0,028	0,11	0,036	0,18		
			3,5	35	0,01	0,35	0,014	0,055	0,018	0,09		
7	Продольное об- тачивание	2,5			0,016	0,08	0,022	0,12	0,028	0,18		
		2,0			0,018	0,087	0,025	0,13	0,032	0,19		
		1,5			0,02	0,093	0,028	0,14	0,036	0,2		
		1,0			0,022	0,1	0,031	0,15	0,04	0,21		
		0,5			0,025	0,107	0,034	0,16	0,044	0,22		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
	Сверление				0,006	0,044	0,009	0,066	0,012	0,01		
					4,0	8	0,022	0,07	0,03	0,11	0,039	0,16
					4,0	40	0,01	0,035	0,013	0,055	0,017	0,08
					4,5	10	0,023	0,07	0,032	0,11	0,042	0,16
					4,5	40	0,01	0,035	0,013	0,055	0,017	0,08
					5,0	10	0,24	0,075	0,034	0,115	0,044	0,17
					5,0	40	0,01	0,035	0,013	0,055	0,017	0,08
					5,5	10	0,025	0,075	0,035	0,115	0,045	0,17
					5,5	40	0,01	0,032	0,013	0,052	0,017	0,07
					6,0	10	0,026	0,08	0,036	0,12	0,046	0,17
6,0	40	0,01	0,03	0,013	0,05	0,017	0,065					
10	Продольное об- тачивание	3,5			0,02	0,082	0,027	0,12	0,035	0,165		
		3,0			0,022	0,09	0,03	0,13	0,038	0,17		
		2,5			0,024	0,096	0,032	0,14	0,042	0,19		
		1,5			0,027	0,103	0,037	0,15	0,048	0,205		

		0,8			0,03	0,112	0,04	0,16	0,052	0,22	
	Врезание и отрезка				0,007	0,047	0,01	0,068	0,013	0,01	
	Сверление		6,0	10	0,026	0,08	0,036	0,12	0,046	0,17	
			6,0	40	0,01	0,03	0,013	0,05	0,017	0,067	
			6,5	10	0,026	0,08	0,036	0,12	0,046	0,17	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
			6,5	40	0,01	0,03	0,013	0,05	0,017	0,067	
			7,0	10	0,026	0,08	0,037	0,12	0,048	0,17	
			7,0	40	0,01	0,03	0,016	0,05	0,021	0,065	
			7,5	10	0,027	0,08	0,038	0,12	0,049	0,17	
			7,5	40	0,011	0,03	0,017	0,05	0,021	0,067	
	Продольное об- тачивание	5,0			0,023	0,085	0,032	0,12	0,042	0,15	
			4,0			0,025	0,093	0,035	0,13	0,046	0,16
			3,0			0,028	0,1	0,039	0,14	0,051	0,18
			2,0			0,031	0,107	0,043	0,15	0,056	0,2
			1,0			0,034	0,115	0,046	0,16	0,06	0,22
	Врезание и отрезка				0,008	0,05	0,011	0,07	0,015	0,1	
	Сверление		7,0	10	0,026	0,08	0,037	0,12	0,048	0,17	
				7,0	40	0,01	0,03	0,016	0,05	0,021	0,065
				8,0	10	0,027	0,08	0,038	0,12	0,049	0,17
				8,0	40	0,011	0,03	0,017	0,05	0,021	0,065
				9,0	10	0,028	0,08	0,039	0,12	0,05	0,17
				9,0	30	0,012	0,035	0,017	0,052	0,0215	0,07

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
			10,0	10	0,029	0,08	0,04	0,12	0,052	0,17
			30,0	30	0,013	0,035	0,0175	0,052	0,022	0,07
16	Продольное об- тачивание	6,0			0,016	0,065	0,029	0,09	0,03	0,12
		4,0			0,026	0,095	0,037	0,135	0,048	0,165
		2,0			0,033	0,108	0,045	0,16	0,059	0,21
	Врезание и отрезка				0,009	0,055	0,0125	0,075	0,016	0,105
		Сверление		7,0	10	0,027	0,085	0,038	0,125	0,05
			7,0	40	0,01	0,035	0,016	0,055	0,021	0,07
			9,0	10	0,028	0,09	0,04	0,125	0,052	0,175
			9,0	40	0,011	0,03	0,0165	0,05	0,02	0,065
	20 и 25	Продольное об- тачивание	8,0			0,014	0,06	0,0195	0,085	0,026
6,0					0,019	0,071	0,0265	0,1	0,0345	0,13
4,0					0,025	0,093	0,035	0,14	0,046	0,17
2,0					0,033	0,107	0,045	0,165	0,059	0,215
Врезание и отрезка					0,009	0,006	0,0125	0,075	0,016	0,105
		Сверление		7,0	10	0,027	0,095	0,038	0,125	0,05
			7,0	40	0,01	0,035	0,016	0,055	0,021	0,07
			9,0	10	0,028	0,095	0,04	0,13	0,052	0,18
			9,0	40	0,011	0,03	0,0165	0,055	0,02	0,065
	10,0		10	0,03	0,095	0,04	0,13	0,055	0,18	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
			10,0	30	0,013	0,035	0,017	0,055	0,025	0,07
			11,0	10	0,027	0,08	0,038	0,12	0,049	0,17
			11,0	40	0,011	0,032	0,0165	0,053	0,021	0,067
			12,0	10	0,028	0,08	0,039	0,12	0,05	0,17
			12,0	40	0,012	0,032	0,017	0,053	0,0215	0,07

	13,0	10	0,029	0,08	0,04	0,12	0,052	0,17
	13,0	40	0,0125	0,032	0,0175	0,053	0,022	0,07
	14,0	10	0,027	0,08	0,038	0,012	0,049	0,17
	14,0	40	0,011	0,032	0,0165	0,053	0,21	0,07
	15,0	10	0,027	0,08	0,038	0,12	0,049	0,17
	15,0	40	0,011	0,033	0,0165	0,055	0,021	0,07
	16,0	10	0,028	0,08	0,039	0,12	0,05	0,17
	16,0	40	0,012	0,033	0,017	0,055	0,0215	0,07
	17,0	10	0,029	0,08	0,04	0,12	0,052	0,17
	17,0	40	0,0125	0,033	0,0175	0,055	0,022	0,07

Примечания. 1. При накатывании рифлений с поперечной подачей накатного ролика на деталях из стали подачи выбирают равными  $1/3-1/4$ , а на деталях из латуни –  $1/2-1/3$  от подачи при врезании; при накатывании рифлений с продольной подачей накатного ролика на деталях из стали подачи выбирают равными  $1/3$ , а на деталях из латуни –  $2/3-1/2$  от подачи при продольном обтачивании. 2. Применять значения подач для большой производительности не рекомендуется.

Таблица 13.3

Поправочные коэффициенты к значениям подач, выбранных в табл.13.2 в зависимости от обрабатываемого материала

Обрабатываемый материал	Коэффициент
Сталь с $\sigma_B = 40-50$ кгс/мм <sup>2</sup>	1,2–1,5
Сталь автоматная А12	1,5–2,0
» А20	1,3–1,8
Серебрянка (У7А, У10, А75)	0,8
Нержавеющие стали	0,6–0,8
Алюминий и его сплавы	0,9–1,0
Бронза	0,5

**Примечание.** При изготовлении деталей из приведенных в таблице марок сталей поправочные коэффициенты умножаются на численные значения подач, выбранных по табл. 5 для обработки стали; при изготовлении деталей из алюминия, его сплавов и бронзы – на численные значения подач, выбранных для обработки латуни

Таблица 13.4

Подачи для режущего инструмента при обработке триба

Номер перехода	Наименование перехода	Глубина резания, мм	Подача, мм/об
1	2	3	4
6	Обтачивание $\varnothing 0,9$ мм	2,05	$0,018 \cdot 0,08 = 0,014$
10	Обтачивание $\varnothing 1,3$ мм	1,85	0,014
14	Обтачивание $\varnothing 2,2$ мм	1,4	$0,019 \cdot 0,8 = 0,015$
19	Врезание резцом 2 до $\varnothing 3,8$ мм		0,005
21	Обтачивание $\varnothing 3,8$ мм	0,6	$0,024 \cdot 0,8 = 0,019$
23	Врезание резцом 2 до $\varnothing 2,2$ мм		0,005
25	Обтачивание $\varnothing 2,2$ мм	1,4	0,015
29	Обтачивание поднутрения		0,005
36	Врезание резцом 2 до $\varnothing 0,9$ мм		0,005
38	Обтачивание $\varnothing 0,9$ мм	0,65	0,004
43; 44	Отрезка детали		0,004

Подачу для обтачивания поднутрений рассчитывают путем умножения значения подачи при поперечном врезании на коэффициент  $K$ , зависящий от угла заточки резца  $\beta$  (см. рис. 13.6). Значения коэффициента  $K$  приведены ниже.



$\beta, \dots^\circ$ .....	К
25–45.....	0,7
45–60.....	0,8
60–80.....	0,9.

Значения подач заносят против соответствующих переходов в графу «Подача» операционной технологической карты.

Определение числа оборотов шпинделя по переходам. Число оборотов шпинделя, необходимое для выполнения рабочего перехода, определяют по формуле

$$n_p = l/s,$$

где  $n_p$  – число оборотов, необходимое для выполнения рабочего перехода;

$l$  – длина рабочего хода, мм;

$s$  – подача, мм/об.

Получаемые при этом дробные значения чисел оборотов следует округлять.

Переход	$n_p$ , обороты
6	$6,4/0,014 = 457$
10	$1,8/0,014 = 128$
14	$11,2/0,015 = 746$
19	$0,7/0,005 = 140$
21	$0,6/0,019 = 32$
23	$0,8/0,005 = 160$
25	$2,7/0,015 = 180$
29	$0,7/0,005 = 140$
36	$0,75/0,005 = 150$
38	$2,1/0,014 = 150$
43	$0,65/0,004 = 162$

Сумму чисел оборотов шпинделя (2445 оборотов), необходимых для выполнения не совмещенных рабочих переходов при изготовлении триба, вносят в операционную технологическую карту. Числа оборотов шпинделя совмещенных переходов заключают в скобки и при определении суммы чисел оборотов, необходимых для выполнения рабочих переходов, их не учитывают.

Следует помнить, что в дальнейшем, после определения времени цикла изготовления детали будет произведен пропорциональный перерасчет чисел оборотов каждого рабочего перехода и значений подач. Эти данные заносят в операционную технологическую карту взамен определённых ранее.

## 14. НАЛАДКА АВТОМАТА

Наладку автомата, как правило, начинают с удаления оснастки и режущего инструмента, используемого при обработке предыдущей детали. Если дополнительные устройства не предусмотрены технологическим процессом и не мешают при обработке детали, то их оставляют на станке, сняв предварительно приводные натяжные пружины.

Ознакомившись с чертежом детали и технологическим процессом ее обработки и получив инструктаж мастера или технолога цеха, наладчик приступает к наладке автомата. Для этого в соответствии с картой наладки, устанавливают на станок сменные зубчатые колеса и шкивы главного привода и коробки подачи. Во втулку шпинделя станка вставляют зажимную цангу и затягивают зажимную гайку до упора. В суппортную стойку устанавливают люнетную втулку и наворачивают на нее гайку. Зажимную цангу и люнетную втулку следует поставить до установки кулачков, так как шпиндельная бабка, приблизившись к суппортной стойке, не оставит достаточного пространства для введения зажимных элементов. На распределительный вал закрепляют кулачки шпиндельной бабки, балансира и вертикальных суппортов. Для координации всех движений механизмов кулачки устанавливают таким образом, чтобы нулевая риска находилась против контактирующего пальца или ролика рычага подачи механизма. В некоторых моделях зарубежных станков и в автомате модели 1Д25В предусмотрена установка кулачков на распределительный вал с фиксацией их на штифт. В этом случае отверстие под штифт в кулачках выполняется так, чтобы при установке кулачка на распределительный вал нулевая риска оказалась под пальцем или роликом подающего рычага.

Вращая распределительный вал, проверяют координацию движений всех механизмов автомата и затягивают крепежные гайки до упора. Далее в зависимости от цикла на барабане распределительного вала устанавливают кулачки зажима и разжима цанги. Вращая вручную распределительный вал, устанавливают кулачок, управляющий отрезным резцом в положение конца отрезки. В этом положении распределительного вала кулачок разжима цанги должен прижиматься к пальцу рычага разжима. После закрепления кулачка разжима продолжают вращать распределительный вал до отвода шпиндельной бабки с разжатой цангой в крайнее заднее положение. В этом положении устанавливают кулачок зажима цанги, который прижимают к пальцу рычага зажима, перемещенному вниз предыдущим действием, и закрепляют его.

После этого тщательно очищенный от смазки и заправленный с обоих концов прутки пропускают через шпиндель автомата и суппортную стойку и регулируют усилие зажима зажимной цанги и зазор между неподвижной люнетной втулкой и прутком. При этом следует помнить, что вручную при помощи рычага цанга должна зажиматься с небольшим усилием, а регулирование зазора в люнетной втулке должно обеспечивать вращение прутка в последней без усилий. Вращая распределительный вал, устанавливают кулачок, управляющий отрезным суппортом в положение начала отрезки, после чего подводят отрезной резец к прутку с небольшим зазором и закрепляют его в резцедержателе. Продвинув прутки вперед с таким расчетом, чтобы отрезной резец смог подрезать торец, зажимают ручную цангу и нажатием кнопки приводят шпиндель автомата во вращение. Медленно вращая распределительный вал, подрезают торец прутка и, когда контактирующий палец падающего рычага окажется на максимальном радиусе кулачка, регулируют отрезной резец по центру. В случае обработки деталей, имеющих с обеих сторон конус, прутки пропускают чуть дальше отрезного резца, зажимают цангу, вручную вращая распределительный вал, отрезают конец прутка и регулируют резец по центру, оставшемуся на следующей детали конуса.

Устанавливают в резцедержатель балансира резец 1, а после того, как произойдет обтачивание левой части детали, – резец 2 (например, при обработке детали «триб»). Первоначально резцы на диаметр устанавливают приблизительно. Окончательную установку их регулируют винтами производят только после обточки и измерения соответствующей ступени или обработки первой детали.

Резцы вертикальных суппортов 3–5 (за исключением случая, когда деталь отрезают резцом одного из вертикальных суппортов) устанавливают после окончательной регулировки резцов 1 и 2 балансира по уже обработанной, но еще не отрезанной детали.

Дополнительные устройства устанавливают после того, как деталь уже обработана резцами суппортной стойки.

При первоначальной установке кулачков рекомендуется обкатать их на холостом ходу (от 30 мин до 1 ч), тщательно смазывая. При этом на рабочей поверхности кулачков образуется твердый слой, который способствует долговечности кулачков. Далее наладчик регулирует подачу смазочно-охлаждающей жидкости, устанавливает толкатель прутка и кожухи ограждения.

Изготовив партию деталей (5–10 шт.), наладчик предъявляет, их контролеру ОТК или мастеру и сдает работающий станок автоматчику.

## **15. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

1. Ознакомиться с назначением и областью применения автомата 1Б10В.
2. Изучить конструкцию и кинематику автомата
3. Изучить инструкцию по расчёту наладки автомата и рекомендации.
4. Изучить последовательность расчёта наладки автомата на примере изготовления детали «триб».
5. Разработать последовательность обработки детали по заданию преподавателя.
6. Назначить режимы резания на переходы при обработке детали.
7. Определить длины перемещения режущего инструмента или шпиндельной бабки.

## **16. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЁТУ**

Отчёт выполняется на отдельных листах формата А4 (ГОСТ 2.105–95).

В отчёте должны быть приведены: назначение и область применения станка; кинематическая схема станка; сведения, необходимые для расчёта наладок автомата; эскиз детали; последовательность обработки детали, длины перемещений режущего инструмента или шпиндельной бабки и режимы резания.

## **17. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Назначение и принцип работы автоматов продольного сечения.
2. Чем определяется производительность работы автоматов продольного точения?
3. Какие требования предъявляются к прутковому материалу?
4. Как производится разработка последовательности рабочих переходов обработки детали?
5. Как определяются длины перемещений инструмента или шпиндельной бабки?
6. Как проводится выбор режимов резания?

7. Как осуществляется наладка автомата?

## **18. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА**

1. Подготовить отчёт по лабораторной работе (1,0 ч).
2. Подготовить ответы на контрольные вопросы и подготовиться к защите работы (0,5 ч).
3. Используя литературу [1, с. 156–181] ознакомиться с нормированием токарно-автоматных работ.

## Лабораторная работа № 3

# ИЗУЧЕНИЕ И НАСТРОЙКА ЗУБОФРЕЗЕРНОГО СТАНКА МОДЕЛИ 5К32А

## 1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Цель работы – закрепить материал лекций по курсу «Металлорежущие станки». В содержание работы входит ознакомление с конструкцией и устройством зубофрезерного станка, кинематической схемой станка, осуществление настройки и наладки для нарезания зубчатого колеса червячной фрезой.

## 2. ОПИСАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ

Станок предназначен для нарезания цилиндрических, а также червячных колес в условиях среднего и крупносерийного производства. Нарезание зубчатых колес производится по методу обката – касания. Образование профиля зубьев на заготовке производится методом обкатки и представляет собой непрерывный процесс огибания исходным профилем червячной фрезы эвольвентных боковых поверхностей зубьев нарезаемых колес. Образование зуба по длине производится методом касания за счет вертикальной подачи фрезерного суппорта с червячной фрезой.

Движения формообразования при нарезании прямозубых цилиндрических зубчатых колес:

$$\Phi_v(B_1B_2),$$

$$\Phi_s(\Pi_3).$$

Движения формообразования при нарезании цилиндрических зубчатых колес с винтовым зубом:

$$\Phi_v(B_1B_2),$$

$$\Phi_s(\Pi_3B_4).$$

Для обеспечения указанных движений формообразования станком осуществляются следующие движения:

- вращение фрезы ( $B_1$ );
- вращение заготовки ( $B_2$ );

- перемещение фрезерного суппорта параллельно оси заготовки ( $\Pi_3$ ), (вертикальная подача);

- дополнительное вращение стола для получения винтового зуба ( $B_4$ ).

Ввиду отсутствия протяжной подачи на данном станке первичные колеса нарезаются только методом радиального врезания, при котором радиальная подача осуществляется перемещением стола вместе с заготовкой по направлению к червячной фрезе.

Структурная схема приведена на рис. 2.1.

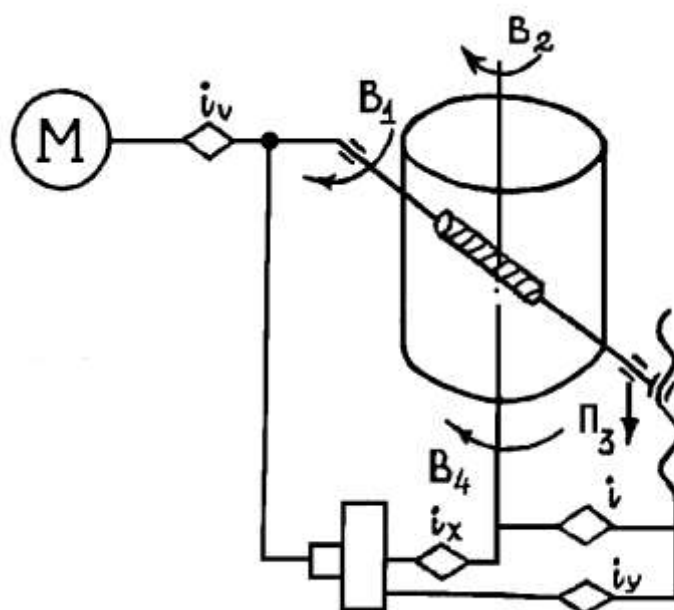


Рис. 2.1. Структурная схема зубофрезерного станка

Основные данные станка:

Габариты

(длина × ширина × высота), мм

2650 × 1510 × 2000

Вес, кг

7200

Размеры обрабатываемых изделий

Наибольший модуль нарезаемого колеса, мм

10

Наибольший диаметр нарезаемых

червячных колес, мм

800 без контрподдержки

Наибольший диаметр нарезаемых

цилиндрических колес, мм

800 без контрподдержки

500

прямозубых

косозубых:

при угле наклона: 30°

45°	350
60° (при диаметре фрезы 180 мм)	120–250
Наибольшая длина нарезаемых цилиндрических колес, мм:	
прямозубых	300
косозубых:	
при угле наклона: 30°	200
45°	150
60°	130
Наименьшее число нарезаемых зубьев	12

### Стол

Расстояние между осями стола и фрезы, мм:	
наименьшее	80
наибольшее	500
Расстояние от плоскости стола до оси фрезы, мм:	
наименьшее	210
наибольшее	570
Диаметр стола, мм	500
Ускоренное перемещение, мм/мин	170
Ручное перемещение стола на один оборот, мм	0,5

### Суппорт

Наибольшие размеры режущего инструмента, мм:	
диаметр	200
длина	200
Наибольшее перемещение суппорта, мм	360
Ускоренное перемещение каретки суппорта, мм/мин	360
Диаметр фрезерных оправок, мм	32; 40
Скорость перемещения шпинделя вдоль оси, мм/мин	12
Расстояние от оси шпинделя до направляющего суппорта, мм	319
Наибольший угол наклона зубьев нарезаемых колес, град	± 60
Поворот на одно деление шкалы:	
линейки, град	1
нониуса, мин	5



Автоматическая осевая передвижка фрезы	имеется
автоматический останов станка	
в конце цикла	имеется
Автоматический возврат инструмента	
в исходное положение	имеется
Предохранение от перегрузок	имеется
Конусное отверстие шпинделя	Морзе 5
Наибольшее осевое перемещение фрезы, мм	80

#### Привод

Мощность главного электродвигателя, кВт	7,5
Число оборотов в минуту	1460
Предел чисел оборотов фрезы в минуту	50–130
Число ступеней оборотов фрезы	9
Предел подач, мм/об:	
продольной	0,8–5,0
радиальной	0,3–1,7
Число ступеней подач	7

### 3. УСТАНОВОЧНЫЕ РАЗМЕРЫ СТАНКА

На рис. 4.1 приведены установочные размеры зубофрезерного станка 5К32А. При межцентровом расстоянии между осью фрезы и осью заготовки, равном 60 мм минимальное расстояние от зеркала стола до оси фрезы равно 320 мм.

### 4. КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ЦЕПИ СТАНКА

1. Цепь главного движения: привод фрезы осуществляется электродвигателем в 7,5 кВт через коробку привода с клиноременной передачей и парой сменных зубчатых колес  $a - b$ .

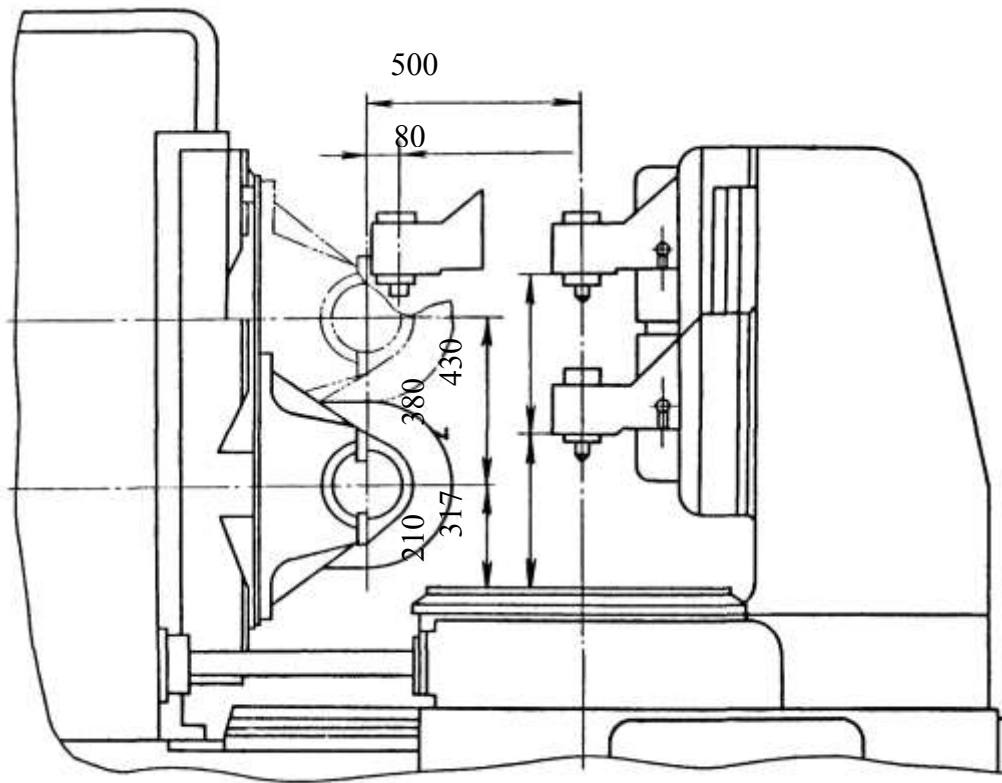


Рис. 4.1. Установочные размеры станка

Шесть пар сменных зубчатых колес обеспечивают девять различных чисел оборотов фрезы в диапазоне 50...310 об/мин (рис. 4.2).

Из коробки привода вращение передается через конические колеса 29 – 29, 29 – 29, 29 – 29 и пару цилиндрических колес 17 – 68 шпинделя фрезы.

Цепь вращения стола: электродвигатель М1, ременная передача, сменные колеса  $a - b$ , конические колеса 29 – 29, 27 – 27, дифференциал, постоянные колеса 58 – 58, шестерни перебора  $e, f$ , гитара деления  $a_1, b_1, c_1, d_1$ , постоянные шестерни 33 – 33, 35 – 35, червячная пара 1 – 96 стола.

2. Цепь деления, связывающая вращательное движение фрезы и стола: червячная фреза, постоянные колеса 68 – 17, 29 – 29, 29 – 29, 27 – 27, дифференциал, постоянные колеса 58 – 58, шестерни перебора, гитара деления  $a_1, b_1, c_1, d_1$ , постоянные шестерни 33 – 33, 35 – 35, червячная пара 1 – 96 стола. Колесо 96 жестко связано со столом.

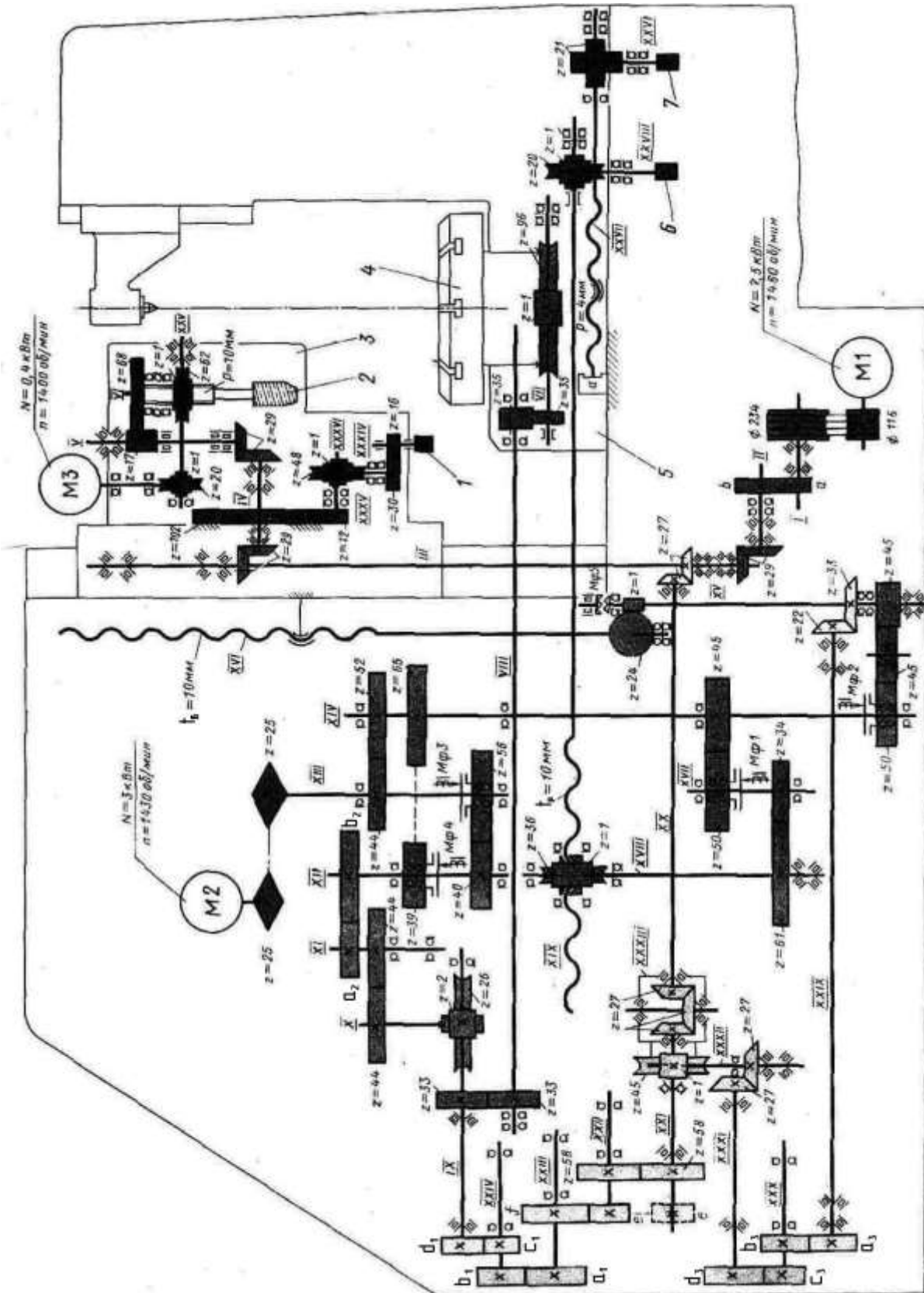


Рис. 4.2. Кинематическая схема полуавтомата модели 5К32А

3. Цепь подач заимствует движение от делительного вала посредством шестерен 33–33, далее через зубчатые передачи коробки подач 2–26, 44–44, сменные колеса  $a_2$ ,  $b_2$  и шестерни 39–65 движение

передается коробке распределения движений, а затем через передачи 50–45–45, 1–24 винту вертикальной подачи с шагом  $t_B = 10$  мм, или через шестерни 45–50, 34–61 и червячную пару 1–36 винту радиальной подачи с шагом  $t_p = 10$  мм. При необходимости реверса подачи движение передается через шестерни 40–58, 44–52 и далее в коробку распределения движений. Коробка подач посредством 4 пар сменных зубчатых колес обеспечивает 7 различных подач в диапазоне: радиальные – 0,27...1,7; продольные – 0,8...5 мм/об. Для ускоренных перемещений предусмотрен двигатель М2.

4. Дополнительная цепь, связывающая вращательное движение фрезы и заготовки: стол, червячная пара 1–96, колеса 35–35, 33–33, 2–26, 44–44, коробка подач, колеса 39–65, 50–45–45, 33–22, сменные колеса гитары дифференциала  $a_3$ ,  $b_3$ ,  $c_3$ ,  $d_3$ , колеса 27–27, 29–29, 29–29, 17–68, фреза.

Осевое периодическое перемещение фрезы осуществляется от электродвигателя  $M_3$  через червячные пары 1–20, 1–62, резьбовую втулку с шагом  $P = 10$  мм.

## 5. НАСТРОЙКА СТАНКА

1. Настройка станка на нарезание прямозубого цилиндрического колеса.

2. Настройка гитары скоростей.

Скорость резания следует выбирать, исходя из конкретных условий (табл. 5.1).

Выбрав скорость резания, по номограмме (рис. 5.1) определяют число оборотов фрезы. Числа оборотов фрезы устанавливаются сменными шестернями, указанными в номограмме.

Таблица 5.1

Скорости резания для фрез из быстрорежущей стали

Материал заготовки	Скорость резания	
	Черновой проход	Чистовой проход
Чугун	16–20	20–25
Сталь $\sigma \leq 60 \text{ кг / мм}^2$	25–28	30–35
Сталь $\sigma \geq 60 \text{ кг / мм}^2$	20–25	25–30
Бронза	25–40	
Пластмасса	25–40	

Номограмма построена исходя из уравнения кинематического баланса:

$$1460 \cdot \frac{116}{234} \cdot \frac{a}{b} \cdot \frac{29}{29} \cdot \frac{29}{29} \cdot \frac{29}{29} \cdot \frac{17}{68} = n_{\text{ф}}, \text{ об/мин},$$

здесь

$$n_{\text{ф}} = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D},$$

где  $D$  – диаметр фрезы, мм;  $V$  – скорость резания, м/мин.

$$\text{Уравнение настройки: } \frac{a}{b} = 1,76 \cdot \frac{V}{D}.$$

Для привода главного движения на станке применяются следующие сменные шестерни:

$$Z = 23, 27, 31, 36, 41, 46, 51, 56, 60, 64, 67.$$

Расстояние между осями сменных колес  $a$  и  $b$  постоянно. Сумма зубьев пары колес равна 87, т. е.  $a + b = 87$ .

## 2.1. Настройка гитары подач

Условия настройки: за один оборот стола (заготовки) фрезерный суппорт должен переместиться на величину вертикальной подачи  $S_{\text{в}}$ , выбранной по режиму резания.

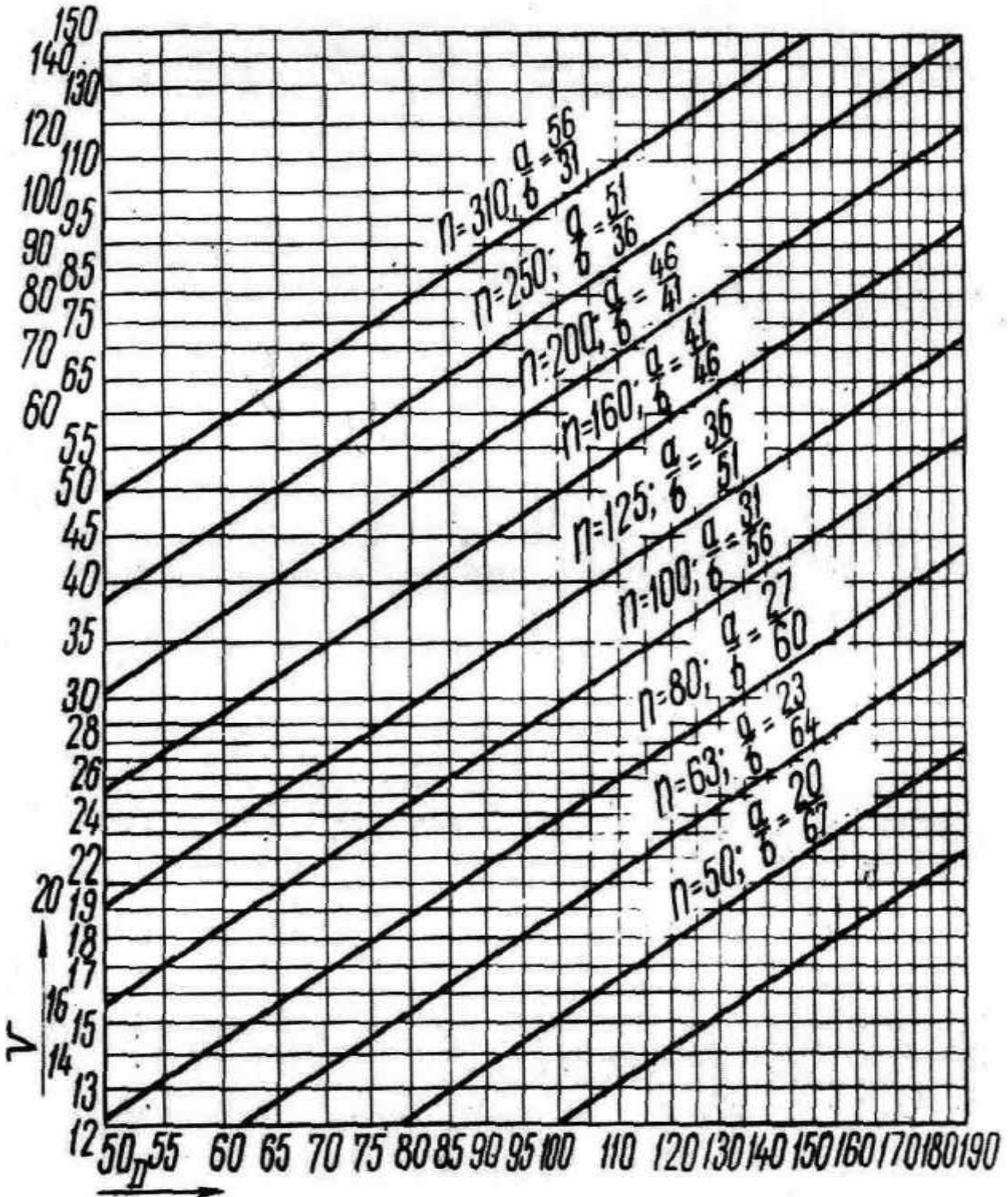


Рис. 5.1. Номограмма выбора числа оборотов фрезы

Расчетные перемещения:

1 оборот стола (заготовки) –  $S_B$ .

Уравнение кинематического баланса:

$$1 \text{ об стола} \cdot \frac{96}{1} \cdot \frac{35}{35} \cdot \frac{33}{35} \cdot \frac{2}{25} \cdot \frac{44}{44} \cdot \frac{a_2}{b_2} \cdot \frac{39}{65} \cdot \frac{50}{45} \cdot \frac{45}{45} \cdot \frac{1}{24} \cdot t_B = S_B,$$

где  $t_B = 10$  мм – шаг винта вертикальной подачи.

$$\text{Уравнение настройки } \frac{a_2}{b_2} = 0,448 \cdot S_B.$$

Величина подачи устанавливается согласно требованиям по шероховатости обработанной поверхности нарезаемых колес. При черновом проходе подача рекомендуется в пределах 2–3 мм/об заготовки, при чистовом – 0,8–1,5 мм/об. Выбранная подача устанавливается при помощи сменных шестерен. Настройка гитары подач приведена в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Таблица подачи

$\frac{a_2}{b_2}$	$S_B$ , мм/об	$\frac{a_2}{b_2}$	$S_B$ , мм/об
28/68	0,8	53/43	2,5
32/64	1	64/32	4
43/53	1,7	68/28	5
48/48	2		

## 2.2. Настройка гитары деления

Условие настройки: за один оборот фрезы стол должен повернуться на долю оборота, соответствующую  $\frac{K}{Z_H}$ ,

где  $K$  – число заходов фрезы;  $Z_H$  – число нарезаемых зубьев.

Расчетные перемещения: 1 оборот фрезы  $\frac{K}{Z_H}$  оборотов стола.

Уравнение кинематического баланса:

$$1 \text{ об фрезы} \cdot \frac{68}{17} \cdot \frac{29}{29} \cdot \frac{29}{29} \cdot \frac{27}{27} \cdot i_{\text{диф}} \cdot \frac{58}{58} \cdot \frac{e}{f} \cdot \frac{a_1}{b_1} \cdot \frac{c_1}{d_1} \cdot \frac{33}{33} \cdot \frac{35}{35} \cdot \frac{1}{96} = \frac{K}{Z_H}.$$

Передаточное отношение дифференциала в этом случае  $i_{\text{диф}} = 1$ .

Уравнение настройки:

$$\frac{a_1 \cdot c_1}{b_1 \cdot d_1} = \frac{24 \cdot K}{Z_H} \cdot \frac{f}{e}.$$

Сменные колеса  $e$  и  $f$  служат для расширения диапазона регулирования сменных колес гитары деления. При  $Z_H \leq 161$  устанавливают

$$\text{колеса: } \frac{e}{f} = \frac{36}{72}.$$

Примечание: В наборе колес гитары деления применяются следующие сменные шестерни: 24, 25 (2 шт.), 30, 35, 37, 40, 41, 43, 45, 47, 48, 50, 53, 55, 58, 59, 60, 61, 62, 65, 67, 70, 71, 73, 75, 79, 80, 83, 85, 90, 92, 95, 98, 100.

Настройка гитары деления приведена в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Настройка гитары деления

$z$	$a_1$	$b_1$	$c_1$	$d_1$
12	50			25
13	40	65	75	25
14	60	70	80	40
15	40			25
16	60			40
17	60	85	90	45
18	40			30
19	75	25	40	95
20	60			50
21	80			70
22	60			55
23	80	50	60	92
24	60	30	40	80
25	24			25
26	60			65
27	40			45
28	60			70
30	40			50
67	24			67
68	30			85
69	60	45	24	92
70	24			70
71	24			71
72	24			75
73	24			73
74	60	37	40	100
75	24			75
76	30			95
77	24	98	70	55
78	40	65	45	90
79	24			79
80	24			80
81	40	75	50	90
82	50	41	24	100
83	24			83
84	24	70	50	60
128	25	75	45	80
129	60	43	24	90
130	40	65	24	80
132	40	55	25	100
133	40	70	30	95
134	40	67	24	80
135	40	60	24	90
136	30	85	40	80
138	40	60	24	92
140	40	70	24	80
141	60	47	24	90
142	40	71	24	80
144	30	80	40	90
145	40	58	24	100
146	24	73	40	80
147	40	60	24	98
150	35	70	24	75
152	45	75	25	95



## Продолжение табл. 5.3

$z$	$a_1$	$b_1$	$c_1$	$d_1$
32	30			40
33	40			55
34	60			85
35	80	40	24	70
36	30			45
37	24			37
38	60			95
39	40			65
40	30			50
41	24			41
42	40			70
43	24			43
44	30			55
45	24			45
46	70	35	24	92
47	24			47
48	25			50
49	70	35	24	98
50	24			50
51	40			85
52	30			65
53	24			53
54	40			90
55	24			55
56	30			70
57	40			95
58	24			58
59	24			59
60	24			60
61	24			61
62	24			62
63	40	70	60	90
64	30			80
65	24			65
66	40	55	45	90

$z$	$a_1$	$b_1$	$c_1$	$d_1$
85	24			85
86	50	43	24	100
87	60	58	24	90
88	40	55	30	80
89	24			89
90	35	70	40	75
91	30	65	40	70
92	24			92
93	60	62	24	90
94	50	47	24	100
95	40	75	45	95
96	35	70	40	80
98	45	75	40	98
99	40	55	30	90
100	45	75	40	100
102	40	60	30	85
104	30	65	40	80
105	24	70	50	75
106	40	53	30	100
108	50	60	24	90
110	45	55	24	90
111	60	37	24	90
112	30	70	40	80
114	40	60	30	95
115	24	92	60	75
116	40	58	24	80
117	40	65	30	90
118	40	59	24	80
119	40	70	30	85
120	40	60	24	80
122	40	61	24	80
123	60	41	24	90
124	40	62	24	80
125	60	75	24	100
126	25	70	40	75

$z$	$a_1$	$b_1$	$c_1$	$d_1$
153	30	85	40	90
154	70	55	24	98
155	40	62	24	100
156	30	65	25	75
158	24	79	40	80
159	60	53	24	90
160	24	80	45	90
161	40	70	24	92
162	40	75	50	90
164	50	41	24	100
165	60	55	24	90
166	24			83
168	30	70	50	75
170	24			85
171	40	95	60	90
172	50	43	24	100
174	60	58	24	90
175	24	75	60	70
176	45	55	30	90
177	40	59	30	75
178	24			89
180	35	70	40	75
182	30	65	40	70
183	40	61	30	75
184	24			92
186	50	62	24	75
187	50	55	24	85
188	50	47	24	100
190	45	75	40	95
192	40	60	30	80
195	40	65	30	75
196	45	75	40	98
198	40	55	30	90
200	45	75	40	100

## 6. НАСТРОЙКА СТАНКА ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ВИНТОВОГО КОЛЕСА

Настройка гитар скоростей и подачи в этом случае аналогична нарезанию прямозубого колеса.

Для того, чтобы нарезать винтовые зубья, необходимо, чтобы заготовка, кроме делительного движения, получала дополнительное вращение.

Если вообразить заготовку шириной, равной шагу 1 винтовой линии зуба, то для получения винтового зуба стол должен повернуться дополнительно на один оборот.

Направление дополнительного вращения стола (заготовки) может совпадать с направлением основного вращения или быть ему противоположным в зависимости от направления винтовых линий фрезы нарезаемого зубчатого колеса.

Расчет настройки гитары деления зависит от способа передачи дополнительного вращения заготовки. Существует два метода настройки – дифференциальная и бездифференциальная.

1. Метод дифференциальной настройки применяют в том случае, если дополнительное вращение заготовки сообщается по специальной кинематической цепи через дифференциал, который суммирует основное и дополнительное вращение и передает его столу.

Для расчета настройки гитары дифференциала используют следующее расчетное перемещение:

$$1 \text{ об. винта шага } t_{\text{в}} \rightarrow \frac{t_{\text{в}}}{T} \text{ об. стола,}$$

где  $T$  – величина шага винтовой канавки нарезаемого колеса.

Уравнение кинематического баланса:

$$1 \cdot \frac{24}{1} \cdot \frac{33}{22} \cdot \frac{a_3 \cdot c_3}{b_3 \cdot d_3} \cdot \frac{27}{27} \cdot \frac{1}{45} \cdot i_{\text{диф}} \cdot \frac{58}{58} \cdot \frac{e}{f} \cdot \frac{a_1 \cdot c_1}{b_1 \cdot d_1} \cdot \frac{33}{33} \cdot \frac{35}{35} \cdot \frac{1}{96} = \frac{t_{\text{в}}}{T}.$$

$$\text{Учитывая, что } T = \frac{\pi \cdot m_s \cdot z}{\text{tg}\beta}, \quad \frac{a_1 \cdot c_1}{b_1 \cdot d_1} = \frac{24 \cdot K}{Z_{\text{н}}} \cdot \frac{f}{e},$$

где  $m_s$  – торцевой модуль,  $m_s = \frac{m}{\cos\beta}$ , и подставив  $i_{\text{диф}} = 2$ , получим

передаточное отношение гитары дифференциала:

$$\frac{a_3 \cdot c_3}{b_3 \cdot d_3} = \frac{7,95775 \cdot \sin \beta}{m \cdot K}, \text{ где } \beta \text{ – угол наклона зубьев к образующей.}$$

Подбор сменных зубчатых колес рекомендуется проводить по книге Петрика М. И. и Шишкова В. А. [1].

2. Метод бездифференциальной настройки используется в том случае, когда основное и дополнительной вращение заготовке сообщает одна кинематическая цепь – цепь деления. Этот метод применяется редко в связи со сложностью подбора сменных колес гитары обкатки.

При нарезании прямых зубьев за один оборот стола фреза сделает  $\frac{z}{K}$  оборотов. Если величина вертикальной подачи  $S_B$  и ширина колеса равна шагу винтовой канавки  $T$ , то за время перемещения фрезы относительно заготовки на величину  $T$  стол сделает  $\frac{T}{S_B}$  оборотов, тогда

фреза за это же время совершит  $\frac{z}{K} \cdot \frac{T}{S_B}$  оборотов. При нарезании косо-

зубых колес стол должен сделать один дополнительный оборот. В этом случае число оборотов фрезы:

$$\frac{z}{K} \cdot \left( \frac{T}{S_B} \right) \pm 1.$$

Расчетные перемещения:

$$\frac{T}{S_B} \text{ об. стола} \rightarrow \frac{z}{K} \cdot \left( \frac{T}{S_B} \pm 1 \right) \text{ об. фрезы}$$

$$\text{или } 1 \text{ об. стола} \rightarrow \frac{z}{K} \left( 1 \pm \frac{S_B}{T} \right) \text{ об. фрезы.}$$

Уравнение кинематического баланса:

$$1 \cdot \frac{96}{1} \cdot \frac{35}{35} \cdot \frac{33}{33} \cdot \frac{d_1 \cdot b_1}{c_1 \cdot a_1} \cdot \frac{f}{e} \cdot \frac{58}{58} \cdot i_{\text{диф}} \cdot \frac{27}{27} \cdot \frac{29}{29} \cdot \frac{29}{29} \cdot \frac{17}{68} = \frac{z}{K} \cdot \left( 1 \pm \frac{S_B}{T} \right).$$

$$\text{При } i_{\text{диф}} = 1 \text{ отношение } \frac{e}{f} = \frac{54}{54} = 1.$$

$$\frac{a_1 \cdot c_1}{b_1 \cdot d_1} = \frac{24 \cdot K}{z} \cdot \frac{T}{T \pm S_B}.$$

## 7. НАСТРОЙКА СТАНКА НА НАРЕЗАНИЕ ЧЕРВЯЧНЫХ КОЛЕС

Ввиду отсутствия протяжной подачи червячные колеса нарезаются только методом радиального врезания. Для осуществления данного метода необходимы следующие движения: вращение червячной фрезы, вращение заготовки и радиальная подача фрезы.

Настройка гитар скоростей и деления ничем не отличается от настройки при обработке прямозубых цилиндрических колес. Цепь вертикальной подачи суппорта отключается.

Настройка гитары подачи рассчитывается исходя из следующих соображений: за один оборот заготовки (стола) фреза должна переместиться на величину радиальной подачи  $S_p$ .

1 об. стола  $\rightarrow S_p$  мм/об стола.

Уравнение кинематического баланса:

$$1 \cdot \frac{96}{1} \cdot \frac{35}{35} \cdot \frac{33}{33} \cdot \frac{2}{26} \cdot \frac{44}{44} \cdot \frac{a_2}{b_2} \cdot \frac{39}{65} \cdot \frac{45}{50} \cdot \frac{34}{61} \cdot \frac{1}{36} \cdot 10 = S_p \text{ (мм/об стола).}$$

Уравнение настройки:  $\frac{a_2}{b_2} = 1,54 \cdot S_p$ .

Величины радиальных подач устанавливаются при помощи сменных шестерен гитары подач. Настройка гитары подач приведена в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Таблица радиальных подач

$\frac{a_2}{b_2}$	$S_p$	$\frac{a_2}{b_2}$	$S_p$
28/68	0,27	53/46	0,83
32/64	0,33	64/32	1,38
43/53	0,56	68/28	1,7
46/43	0,67		

## 8. НАЛАДКА СТАНКА

Наладка станка для обработки цилиндрических колес попутным методом в полуавтоматическом цикле состоит из следующих операций:

- установка и крепление заготовки;

- установка инструмента;
- выбор скорости резания;
- установка продольной подачи;
- настройка гитары деления;
- настройка дифференциала;
- установка упоров, обеспечивающих глубину и длину зубофрезерования, а также работу станка по автоматическому циклу;
- установка переключателей управления на электропанели и включения кулачковой муфты вертикальной подачи;
- установка реле времени и упоров осевой передвижки фрезы;
- пуск станка.

### 1. Установка и крепление заготовки.

Точность изготовления заготовки и ее установка являются первым условием точности нарезаемых колес. Заготовка должна быть закреплена жестко и не должна пружинить при обработке. Схемы установки и крепления заготовки приведены на рис. 8.1.

Установку заготовки следует проверить индикатором, закрепленным на фрезерном суппорте. Биение по наружному диаметру и центрируемому пояску не должно превышать 0,015 мм. Для зубчатых колес максимального диаметра 7-й степени точности. Торцевое биение подставки для заготовки должно быть не более 0,015 мм.

Для закрепления заготовок с наружным диаметром до 400 мм применяют гидрозажим. Заготовки с диаметром свыше 400 мм крепят на специальных подставках винтами.

В конусное отверстие шпинделя устанавливается оправка фрезы и затягивается винтом.

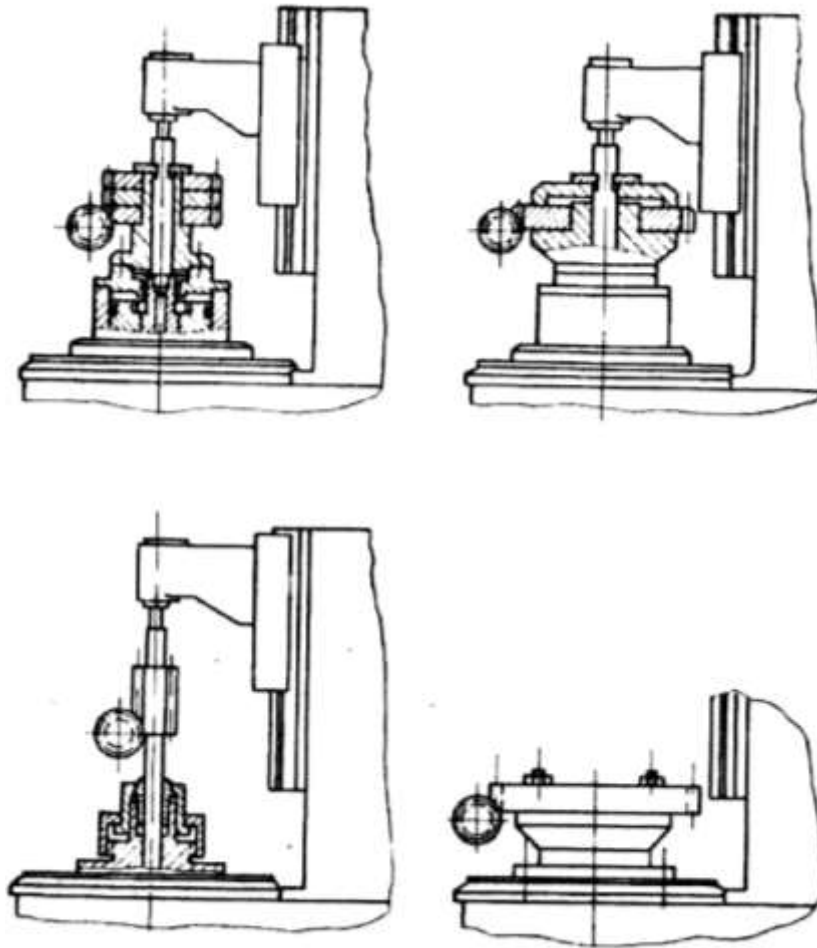


Рис. 8.1. Установка и крепление заготовки

Во избежание погрешностей в зубьях нарезаемых заготовок необходимо точно центрировать фрезу при установке. Для этого надо строго следить за тем, чтобы не было забоин и лишней смазки на торцах фрезы и промежуточных кольцах. В противном случае при затягивании гайки фрезерная оправка подвергается изгибу и фреза будет иметь радиальное биение.

Фреза устанавливается под углом по отношению к изделию. Угол установки при обработке прямозубых колес равен углу подъема витков червячной фрезы (см. табл. 8.1). Обычно угол подъема указывается на торце фрезы. Начальная грубая установка фрезы на угол производится по шкале суппорта, окончательная установка – по нониусу, цена деления которого равна  $5^\circ$ .

При обработке колес с косыми зубьями угол поворота при одинаковом направлении витков фрезы и зубьев нарезаемого колеса равен разности между углом наклона зубьев колеса и углом подъема витков фрезы.

При разноименных витках фрезы и зубьев угол поворота суппорта равен сумме углов (см. табл. 8.2)

Фреза 3 (см. рис. 8.2) устанавливается на шпинделе в центральное положение при помощи специальной линейки 1 и центроуказателя.

Затем фреза и шпиндель из среднего положения перемещаются в исходное положение к коренному подшипнику 2 или от него при помощи электродвигателя передвижки фрезы нажатием на толчковую кнопку.

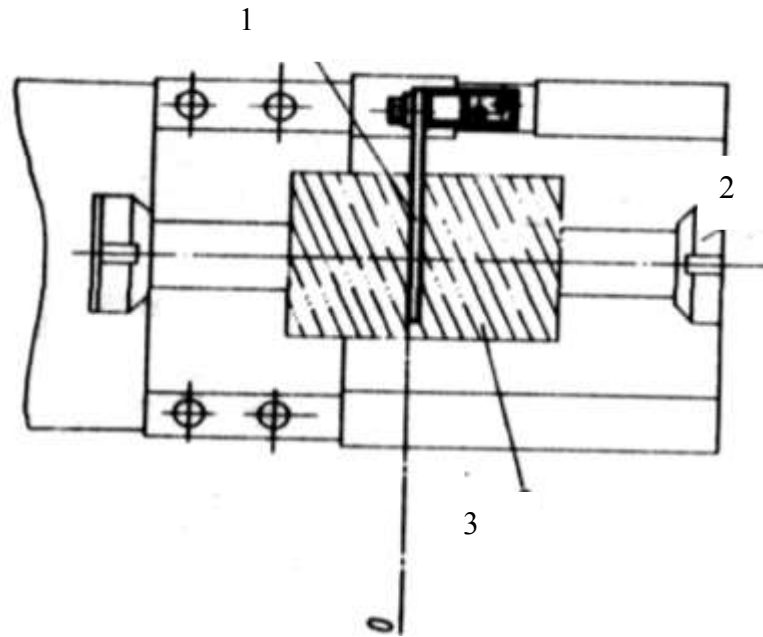


Рис. 8.2. Установка фрезы по центру

Таблица 8.1






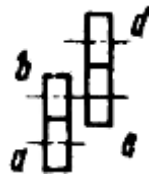


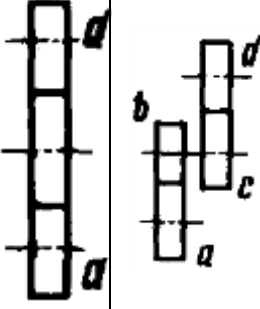

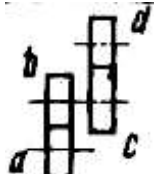
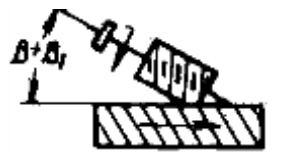


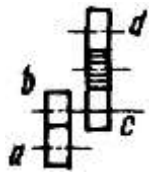

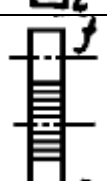

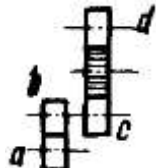



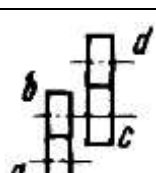
Угол установки при обработке прямозубых колес равен углу подъема витков червячной фрезы

№ строки	Фреза	Направление вращения	Направление вращения заготовки, фрезы и смена установки их при нарезании цилиндрических колес	Колеса		Колеса гитары деления		Колеса гитары подач	
				Для чисел зубьев до 200 54:54	Для чисел зубьев бол. 200 36:72	2 колеса	4 колеса	2 колеса	4 колеса
1	Правозаходная	Левое							
	Левозаходная								
	Правозаходная	Левое							



Таблица 8.2

Установка фрезы и промежуточных колес

Направление винтовой линии заготовки	Фреза	Направление вращения стола фрезы	Сменные колеса $e$ и $f$	Сменные колеса гитары деления		Сменные колеса дифференциала	
				2 колеса	4 колеса	2 колеса	4 колеса
				Правое	Праворежущая		
Леворежущая							
Левое	Праворежущая						
							
	Леворежущая						
							

Если обозначить длину обходной части фрезы (считая от первого полного наружного зуба «А») через « $be$ » (рис. 8.3), а длину выходной

части через « $ba$ », то длина части фрезы, находящаяся в зацеплении с нарезаемым колесом и образующая профиль зуба, будет равна

$$b w = b e + b a.$$

Если всю полезную длину фрезы (от первого полного зуба на правом торце до последнего полного зуба на левом торце) обозначить через « $bn$ », то величина « $b v$ », на которую можно переместить фрезу в осевом направлении, определится как разность

$$b v = bn - b w.$$

Следовательно, задача настройки станка сводится к тому, чтобы обеспечить перемещение фрезы вдоль её оси на величину  $l \leq b v$ .

Длина входной « $be$ » и выходной « $ba$ » частей фрезы в шагах очень удобно и быстро определить по графику рис. 8.4.

2. Установка упоров, обеспечивающих работу станка по автоматическому циклу.

Установка упоров производится следующим образом: подводят стол до соприкосновения фрезы с заготовкой; стол отводят на 0,5 мм от фрезы и в этом положении устанавливают упор, выключающий быстрый подвод стола; отводят стол на величину, необходимую для съема и установки изделия и в этом положении устанавливают упор, выключающий быстрый отвод стола.

Снова подводят стол до соприкосновения фрезы с заготовкой и в этом положении подводят с помощью винта подвижный упор на величину глубины фрезерования.

Упоры, обеспечивающие необходимую длину зубофрезерования, разводят на величину, равную ширине пакета заготовок плюс перебеги инструмента.

3. Установка сменных шестерен гитары подач, гитары деления и гитары дифференциала.

Схема установки сменных шестерен представлена на рис. 8.5.

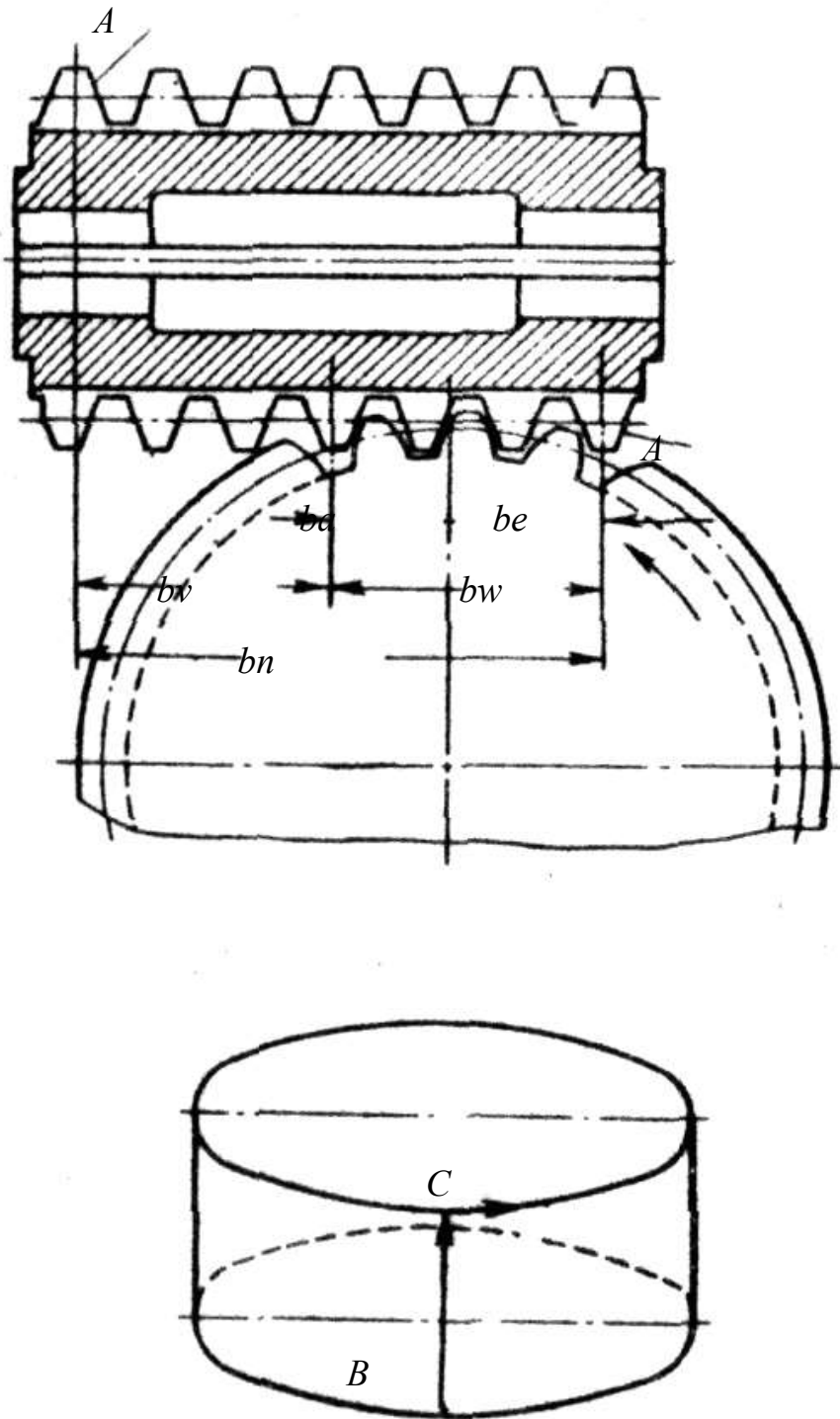


Рис. 8.3. Установка фрезы вдоль оси:  
 $B$  – продольная подача;  $C$  – периодическая тангенциальная подача

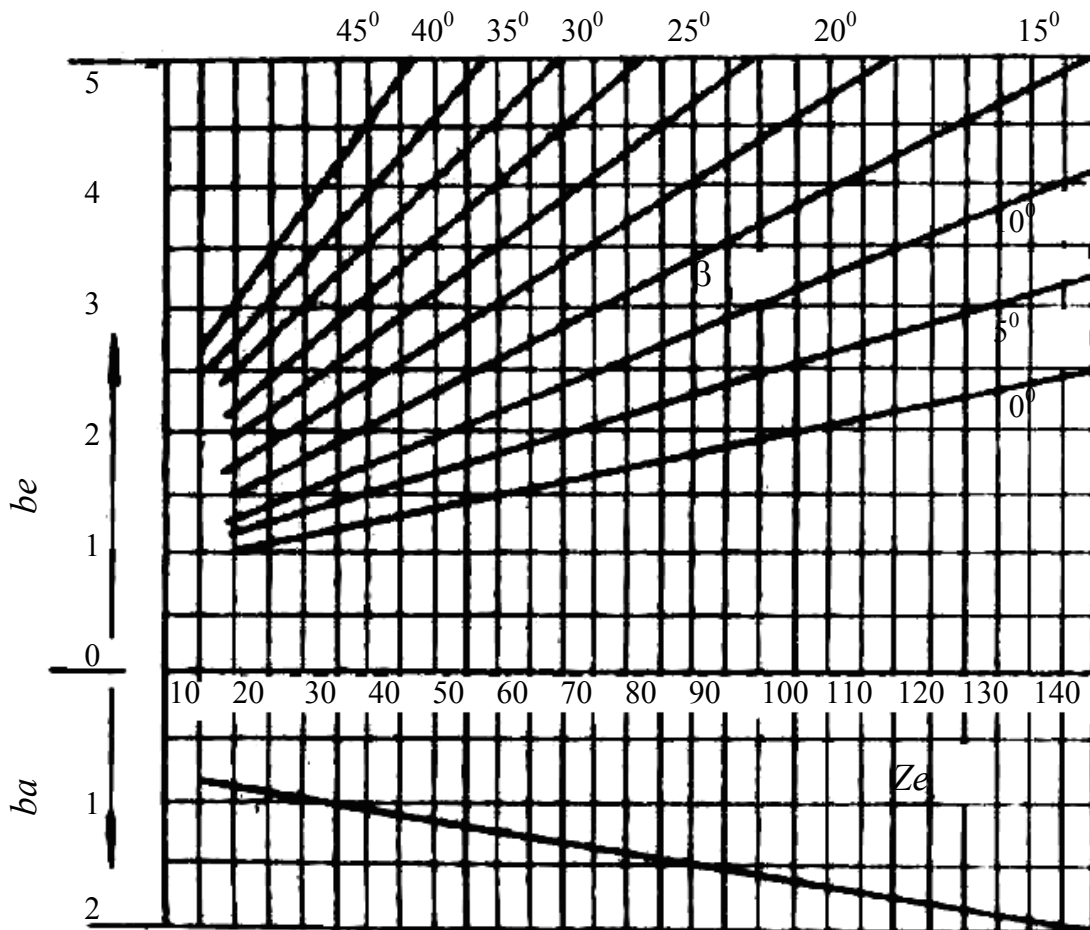
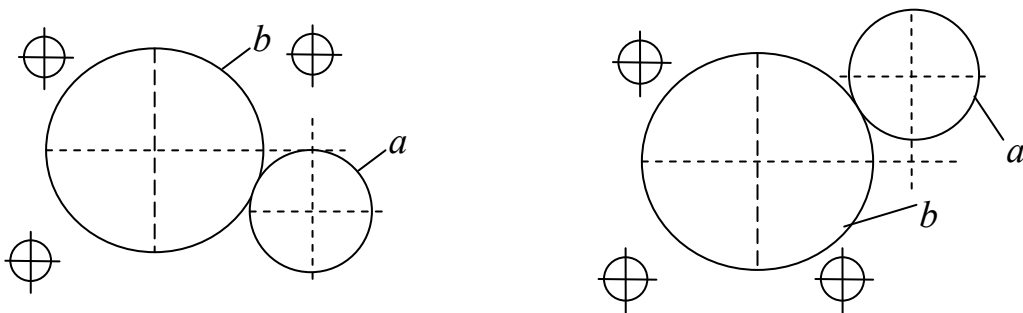


Рис. 8.4. График распределения рабочей длины фрезы в шагах



Установка сменных шестерен подач  
для праворежущей фрезы

Установка шестерен подач  
для леворежущей фрезы

Рис. 8.5. Установка сменных шестерен гитары подач,  
деления и дифференциала

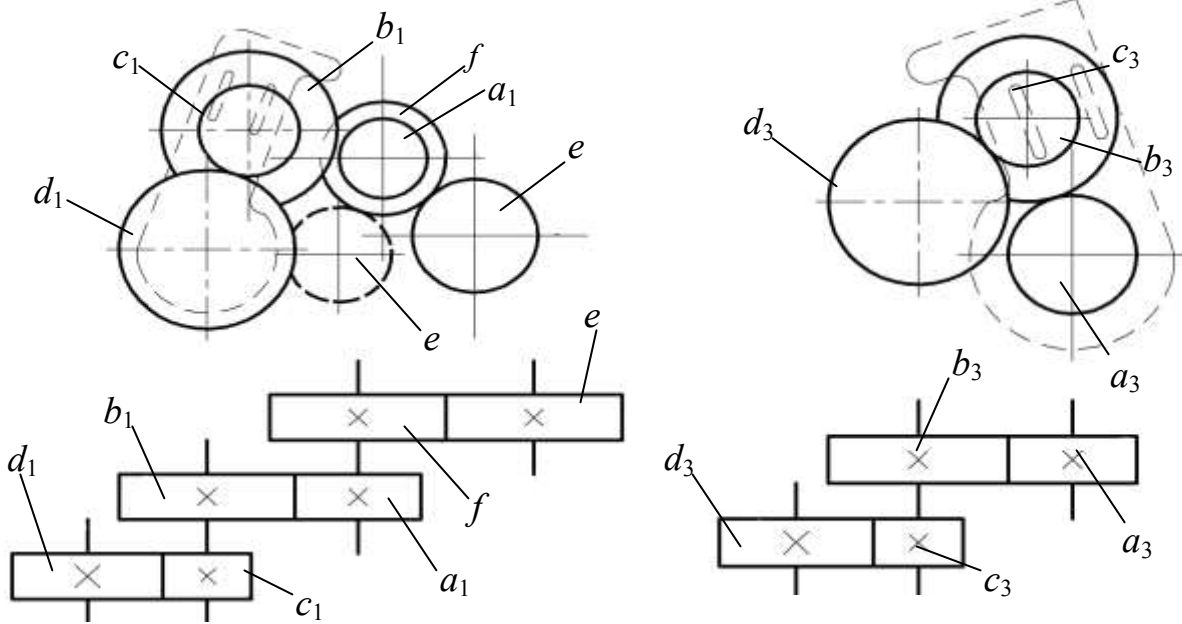


Схема расположения шестерен  
гитары деления

Схема расположения шестерен  
гитары дифференциала

Рис. 8.5. Продолжение

## 9. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Из табл. 9.1 выписать характеристику нарезаемого колеса по указанию преподавателя.

Таблица 9.1

Варианты заданий

№	Характеристика детали. Колесо цилиндрическое					Число прохо- дов	Число захо- дов	Стой- кость фрезы в мин
	Материал	Мо- дуль	Число зубьев	Угол накло на	Направ- ление витков			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Сталь 45	1	18	10	правое	1	1	900
2.	Сталь 20Х	1,25	19	15	правое	1	1	750
3.	Сталь 40Х	1,5	20	20	левое	1	1	600
4.	Сталь 12ХН3	2	22	25	левое	1	1	480

Продолжение табл. 9.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
5.	Серый чугун	2,5	24	30	правое	2	1	360
6.	Сталь 45	3	25	10	правое	2	1	240
7.	Сталь 20Х	4	27	15	левое	1	1	180
8.	Сталь 40Х	5	28	20	левое	1	1	240
9.	Сталь 12ХН3	6	30	25	правое	1	1	360
10.	Серый чугун	7	34	30	правое	1	1	480
11.	Сталь 45	8	36	10	левое	2	1	600
12.	Сталь 20Х	1	38	15	левое	2	1	750
13.	Сталь 40Х	1,25	40	20	правое	1	1	900
14.	Сталь 12ХН3	1,5	45	25	правое	1	1	750
15.	Серый чугун	2	50	30	левое	1	1	600
16.	Сталь 45	2,5	52	10	левое	1	1	480
17.	Сталь 20Х	3	54	15	правое	2	1	360
18.	Сталь 40Х	4	58	20	правое	2	1	240
19.	Сталь 12ХН3	5	60	25	левое	1	1	180
20.	Серый чугун	6	62	30	левое	1	1	240
21.	Сталь 45	7	66	10	правое	1	1	360
22.	Сталь 20Х	8	70	15	правое	1	1	480
23.	Сталь 40Х	1	74	20	левое	2	1	600
24.	Сталь 12ХН3	1,25	78	25	левое	2	1	750
25.	Серый чугун	1,5	80	30	правое	1	1	900
26.	Сталь 45	2	82	10	правое	1	1	750

Продолжение табл. 9.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
27.	Сталь 20Х	2,5	85	15	левое	1	1	600
28.	Сталь 40Х	3	90	20	левое	1	1	480
29.	Сталь 12ХНЗ	4	92	25	правое	2	1	360
30.	Серый чугун	5	94	30	правое	1	1	240
31.	Сталь 45	6	97	10	левое	1	1	180
32.	Сталь 20Х	7	100	15	левое	1	1	240
33.	Сталь 40Х	8	110	20	правое	1	1	360
34.	Сталь 12ХНЗ	1	116	25	правое	2	1	480
35.	Серый чугун	1,25	120	30	левое	2	1	600
36.	Сталь 45	1,5	125	10	левое	1	1	750
37.	Сталь 45	3,5	24	0	правое	1	1	900

2. Изучить кинематическую схему станка, обеспечивающую формообразующие движения.

3. Выбрать параметры червячной фрезы (табл. 9.2, рис. 9.1)

Таблица 9.2

## Выбор параметров червячной фрезы

$m_0$	$d_{a0}$	$d$	$d_1$	$l$	$l_1$	$d_{m0}$	$\gamma_{m0}$	$P_z$	$K$	$z_0$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1,0	71	32	50	71	5	67,6	0°51'	14 352	3,0	16
1,125						67,29	0°57'	12 641		
1,25						66,98	1°04'	11 273		
1,375	80	32	55	80	5	75,66	1°02'	13 080	3,0	16
1,5						75,35	1°08'	11 890		
1,75						74,72	1°21'	10 021		

Продолжение табл. 9.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
2,0 2,25	90	40	60	90	6	83,80 83,17	1°22' 1°33'	11 028 10 441	4,0	14	
2,5 2,75	100		65	100		92,40 91,75	1°33' 1°43'	10 726 96 176	4,5		
3,0 3,25 3,5 3,75	112		70	112		103,00 102,37 101,75 101,12	1°40' 1°49' 1°58' 2°08'	11 104 10 125 9 367 8 561	5,0		
4,0 4,25 4,5	125		50	80		125	113,24 112,57 112,10	2°01' 2°10' 2°18'	10 058 9 361 8 766		6,0 5,5
5,0 5,5	140			85		140	125,55 124,30	2°17' 2°32'	9 896 8 816		6,5
6,0 6,5 7,0	160			90		155	142,45 141,20 139,95	2°25' 2°38' 2°52'	10 616 9 626 8 779		8,5
8,0 9,0 10,0	180	60	95	175	157,00 154,50 152,00	2°55' 3°21' 3°46'	9 667 8 318 7 245	10	12		

4. Вычертить схему установки фрезы, ось фрезы устанавливают под углом к горизонтальной плоскости, при этом направление зубьев червячной фрезы и обрабатываемого колеса должно совпадать. При одинаковом направлении винтовых линий фрезы и колеса угол  $\varphi$  должен быть  $\alpha = \beta - \beta_1$ , при разноименном –  $\alpha = \beta + \beta_1$ .

5. Определить режим резания. Рекомендуемые значения подач при нарезании цилиндрических прямозубых колес червячными фрезами из быстрорежущей стали приведены в табл. 9.3, а скорости резания в табл. 5.1.



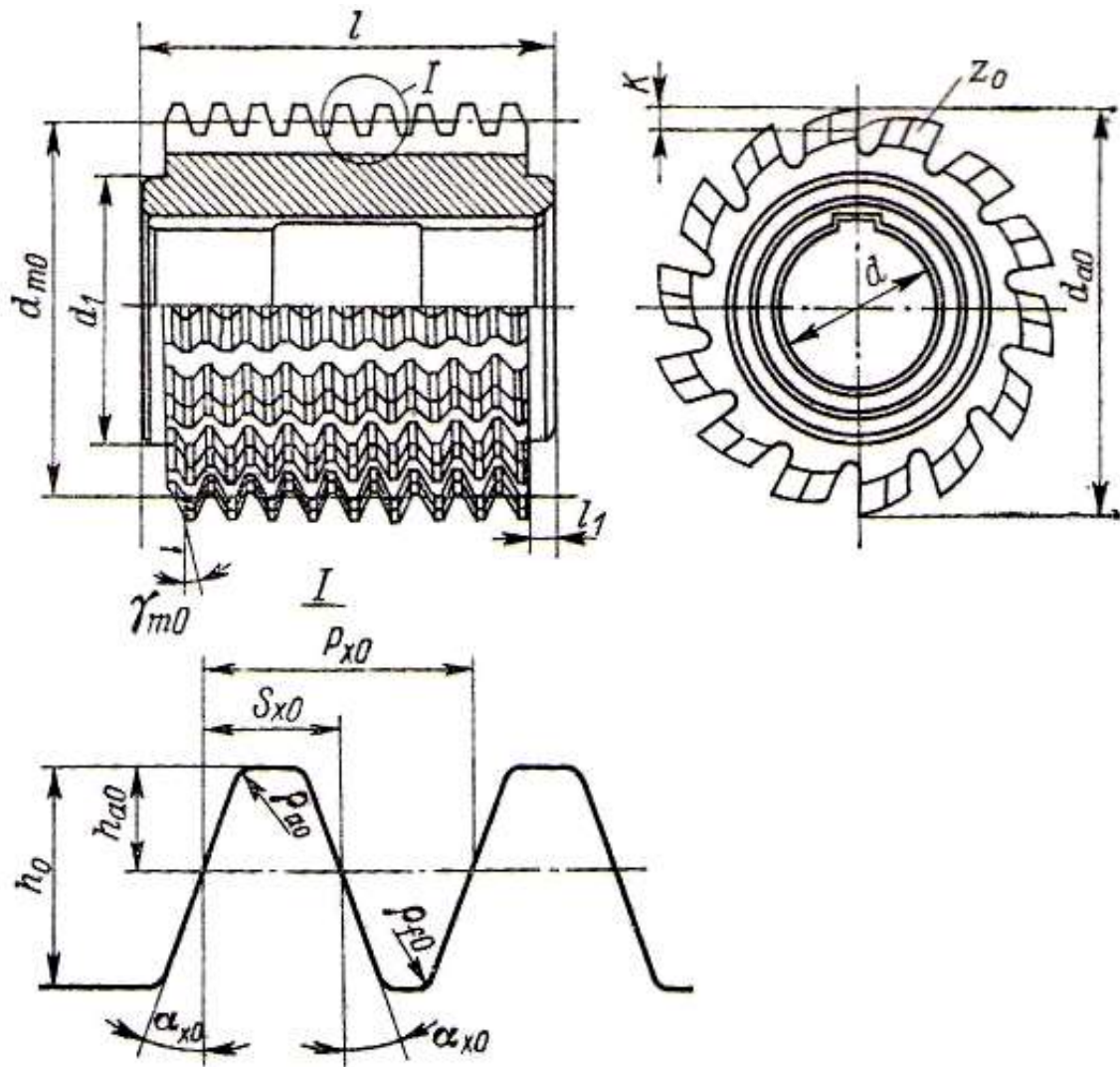


Рис. 9.1. Основные конструктивные элементы цельной червячной фрезы

6. По кинематической схеме составить уравнения кинематического баланса для цепей главного движения, обкатки, деления, подачи, дифференциала (при нарезании цилиндрических колес с винтовым зубом).

7. Подобрать необходимые сменные колеса для всех цепей формообразования. Если в гитару устанавливаются четыре колеса, то их нужно проверить на сцепляемость

$$a + b > c + (20 - 25)$$

$$c + d > b + (20 - 25).$$

При настройке гитары деления передаточное отношение подобранных шестерен должно соответствовать расчетному не менее чем до 5 знаков после запятой. Подбор провести по таблицам подбора зубчатых колес [1].

8. Приложить кинематическую схему, на которой указать выбранные сменные зубчатые колеса.

Таблица 9.3

Поддачи при нарезании цилиндрических прямозубых колес червячными фрезами из быстрорежущей стали

Обрабатываемый материал	Характеристики обработки	Модуль $m$ , мм	Число зубьев нарезаемого колеса			
			25	40	70	120
			Поддача на оборот заготовки $S$ , мм			
Сталь 45 и 40X	Чистовое нарезание зуба	1,5–2,0	0,4–0,6	0,5–0,8	0,6–0,9	0,6–0,9
		2,5	0,6–0,9	0,8–1,0	1,0–1,2	1,0–1,2
	Черновое нарезание зуба	2,5–3	3,0–4,0	3,0–4,0	3,0–4,0	3,0–4,0
		3,5	3,0–4,0	3,0–4,0	3,0–4,0	3,0–4,0
		4	3,0–4,0	3,0–4,0	3,0–4,0	3,0–4,0
		4,5	2,7–3,5	2,9–3,5	3,0–3,5	3,0–3,5
		5	2,2–3,0	2,3–3,2	2,5–3,5	2,5–3,5
		6	1,5–2,5	1,7–2,7	1,8–3,2	1,9–3,5
		7	1,1–2,2	1,2–2,4	1,3–2,5	1,4–2,5
	8	0,7–1,2	0,8–1,4	0,9–1,5	1,0–1,6	
	10	0,7–1,1	0,8–1,2	0,9–1,3	1,0–1,6	
	Чистовое нарезание зуба	1,5–2,0	0,3–0,5	0,5–0,8	0,6–0,9	0,6–0,9
2,5		0,6	0,8–1,0	0,8–1,2	0,8–1,2	
Сталь 20X и 12XНЗ	Черновое нарезание зуба	3	3,0–4,0	3,0–4,0	3,0–4,0	3,0–4,0
		3,6	3,0–4,0	3,0–4,0	3,0–4,0	3,0–4,0
		4	2,5–3,5	2,6–3,5	2,8–3,5	2,8–3,5
		4,5	2,2–3,0	2,3–3,0	2,5–3,0	2,5–3,0
		5	1,8–2,6	1,8–2,8	2,0–3,0	2,1–3,2
		6	1,2–2,2	1,3–2,4	1,4–2,6	1,5–2,8
		7	0,8–1,8	0,9–1,9	1,0–2,0	1,0–2,0
		8	0,6–1,0	0,7–1,1	0,8–1,2	0,8–1,2
	10	0,6–0,8	0,7–0,9	0,8–1,0	0,8–1,2	
	Чистовое нарезание зуба	1,5–2,0	0,6–1,0	1,0–1,2	1,08–1,2	1,0–1,2
		3,0	0,8–1,2	1,2–1,4	1,4–1,8	1,4–2,0
	Серый чугун	Черновое нарезание зуба	3,4	3,5–4,5	3,5–4,5	3,5–4,5
4			3,5–4,5	3,5–4,5	3,5–4,5	3,2–4,0
4,5			3,2–4,0	3,2–4,0	3,2–4,0	3,2–4,0
5			2,9–4,0	3,0–4,0	3,2–4,0	3,2–4,0
6			2,0–3,6	2,1–3,8	2,3–4,0	2,5–4,0
7			1,5–2,8	1,6–3,0	1,7–3,2	1,7–3,2
8			1,0–2,0	1,1–2,0	1,2–2,2	1,3–2,4
10			1,0–1,5	1,1–1,6	1,2–1,7	1,3–1,8

Примечание:

1. Поддачи выше рекомендуемых возможно применять, но они ведут к ухудшению качества поверхности.

2. Для косозубых (винтовых) колес с углом зуба  $\beta$  значения подач, приведенные в таблице, необходимо умножать на  $\cos \beta$ .

## **10. НЕОБХОДИМЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ**

- варианты заданий табл. 7;
- кинематическая схема станка рис. 5;
- справочные данные по выбору червячной фрезы рис. 9.1. табл. 9.2.

## **11. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЁТУ**

Отчёт выполняется на отдельных листах формата А4 (ГОСТ 2.105–95).

В отчёте должны приведены: назначение и область применения станка; кинематическая схема станка; настройка станка согласно варианта задания.

## **12. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Назначение и принцип работы станка.
2. Как производится настройка станка?
7. Как осуществляется наладка станка?

## **13. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА**

1. Подготовить отчёт по лабораторной работе (1,0 час).
2. Изучить вопросы настройки кинематических цепей станка при нарезании прямозубых и червячных колес.

## Лабораторная работа № 4

# ПОСТРОЕНИЕ ЦИКЛОВ ОБРАБОТКИ НА КРУГЛОШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ

## 1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Цель работы – ознакомиться с правилами построения оптимального по быстродействию цикла круглого врезного шлифования на круглошлифовальном станке с ЧПУ, изучить работу системы управления круглошлифовальным станком с ЧПУ, обеспечивающим такой цикл обработки, научиться составлять алгоритмы управления круглошлифовальными станками с ЧПУ при работе с прибором активного контроля размеров (ПАК) и датчиком положения шлифовальной бабки (ДП).

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Анализ цикла круглого врезного шлифования на круглошлифовальных станках с ЧПУ показывает, что оптимальным по быстродействию цикл врезного шлифования должен быть двухступенчатым. Структура двухступенчатого цикла приведена на рис. 2.1 и включает в себя следующие этапы: быстрый подвод

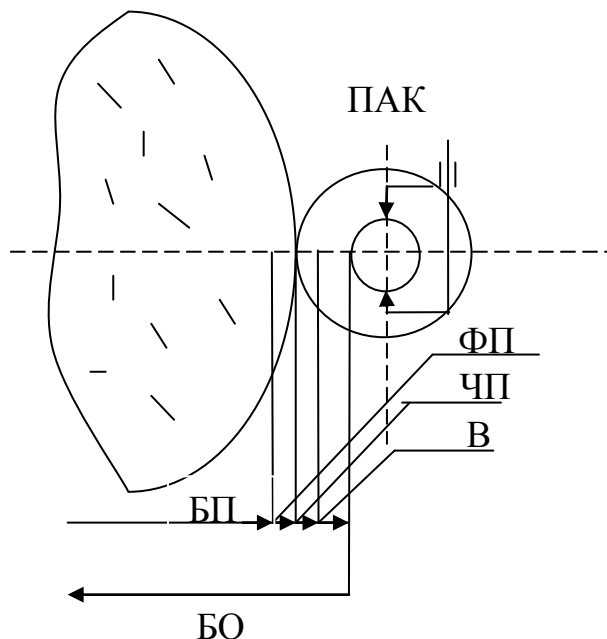


Рис. 2.1. Структура двухступенчатого цикла круглого врезного шлифования

шлифовального круга к детали (БП); переключение на форсированную подачу (ФП) перед контактом с деталью; врезание в деталь на форсированной подаче и по реле касания переключение на черновую подачу (ЧП); на остановившемся этапе черновой обработки проводится расчет необходимого припуска на выхаживание по математической модели процесса врезного шлифования, который необходим для формирования шероховатости обрабатываемой поверхности, указанной на чертеже детали; переключение цикла на выхаживание (В); быстрый отвод шлифовального круга от детали (БО) по команде прибора активного контроля размера (ПАК).

Реализация цикла круглого врезного шлифования на круглошлифовальном станке с ЧПУ производится на основе математической модели круглого врезного шлифования.

Расчет припуска на выхаживание производится по формулу

$$P_{\text{чист.}} = \frac{T_o \cdot V_o}{\gamma} \left[ 1 - \left( \frac{V_3}{V_o} \right)^\gamma \right], \quad (2.1)$$

где  $V_o$  – величина черновой подачи;

$T_o$  – величина характеризующая деятельность переходных процессов в технической системе станка;

$$T_o = \frac{h_o}{V_o},$$

где  $h_o$  – величина натяга в технологической системе станка, определяемая как разница показаний ПАК и датчика положения шлифовальной бабки (ДП) на установившемся черновом этапе цикла;

$\gamma$  – параметр, характеризующий жесткость технологической системы станка;

$V_3$  – заданная скорость съема металла в конце цикла шлифования, обеспечивающая заданную по чертежу шероховатость обработанной поверхности.

Построение циклов обработки на круглошлифовальных станках с ЧПУ производится на основе алгоритмов управления.

Алгоритмы управления предназначены для использования в круглошлифовальных станках, оснащенных современными системами ЧПУ на базе микропроцессоров, и обеспечивают гарантированное выполнение требований по качеству, эксплуатацию оборудования на рацио-

нальных с экономической точки зрения режимах, автоматизацию выбора условий обработки при минимальном объеме исходной информации.

Отличительной особенностью представляемых алгоритмов является учет вариаций отжатий в упругой системе станка, обусловленных изменением режущей способности шлифовального круга, режимами обработки, наличием деталей разной жесткости, разным качеством центровых отверстий деталей и т. п., на основе математической модели процесса врезного шлифования.

Реализация алгоритмов проводится на основе информации, получаемой от прибора активного контроля размеров детали (ПАК), датчика положения шлифовальной бабки (ДП), датчика радиальной составляющей силы шлифования (ДС).

Общая структура алгоритмов управления с учетом изменения жесткости упругой системы в циклах врезного шлифования представлена на рис. 2.2.

Основной задачей, решаемой при проведении тест-цикла, является определение характеристики жесткости упругой системы станка. При этом проводится черновое шлифование на режиме, предусмотренном для данного изделия в обычном цикле обработки, и на установившемся этапе определяется натяг в упругой системе станка  $h_0$  как разница показаний ПАК и ДП. После переключения на доводочную подачу проводится определение коэффициента  $\gamma$ , характеризующего изменение жесткости в системе в цикле обработки, из зависимости  $j = k \cdot h^\beta$ , где  $j$  – жесткость системы,  $k$  – коэффициент пропорциональности,  $\beta$  – показатель степени  $\beta = \frac{1-\gamma}{\gamma}$ .

На следующем этапе производится определение величины черновой подачи для остальных деталей партии  $S = V_0$  по заданным величинам скорости съема припуска в конце цикла и полного припуска на обработку, по определенному ранее значению  $u$  и по величине  $T_0$ , характеризующую длительность переходных процессов в системе. При этом находится минимум функции полного времени двухступенчатого цикла врезного шлифования по величине  $V_0$ . Дальнейший расчет связан с определением величины минимально-необходимого чистового припуска на обработку для стабильного обеспечения заданного качества обработанной поверхности.

При обработке остальных деталей партии в качестве исходных данных используются результаты, полученные в тест-цикле при обра-

ботке первой детали партии. При этом принимается, что параметр  $\gamma$  характеризующий жесткость системы, имеет постоянной значение для всех деталей партии. Величина черновой подачи  $S = V_o$  в циклах обработки также принимается неизменной.

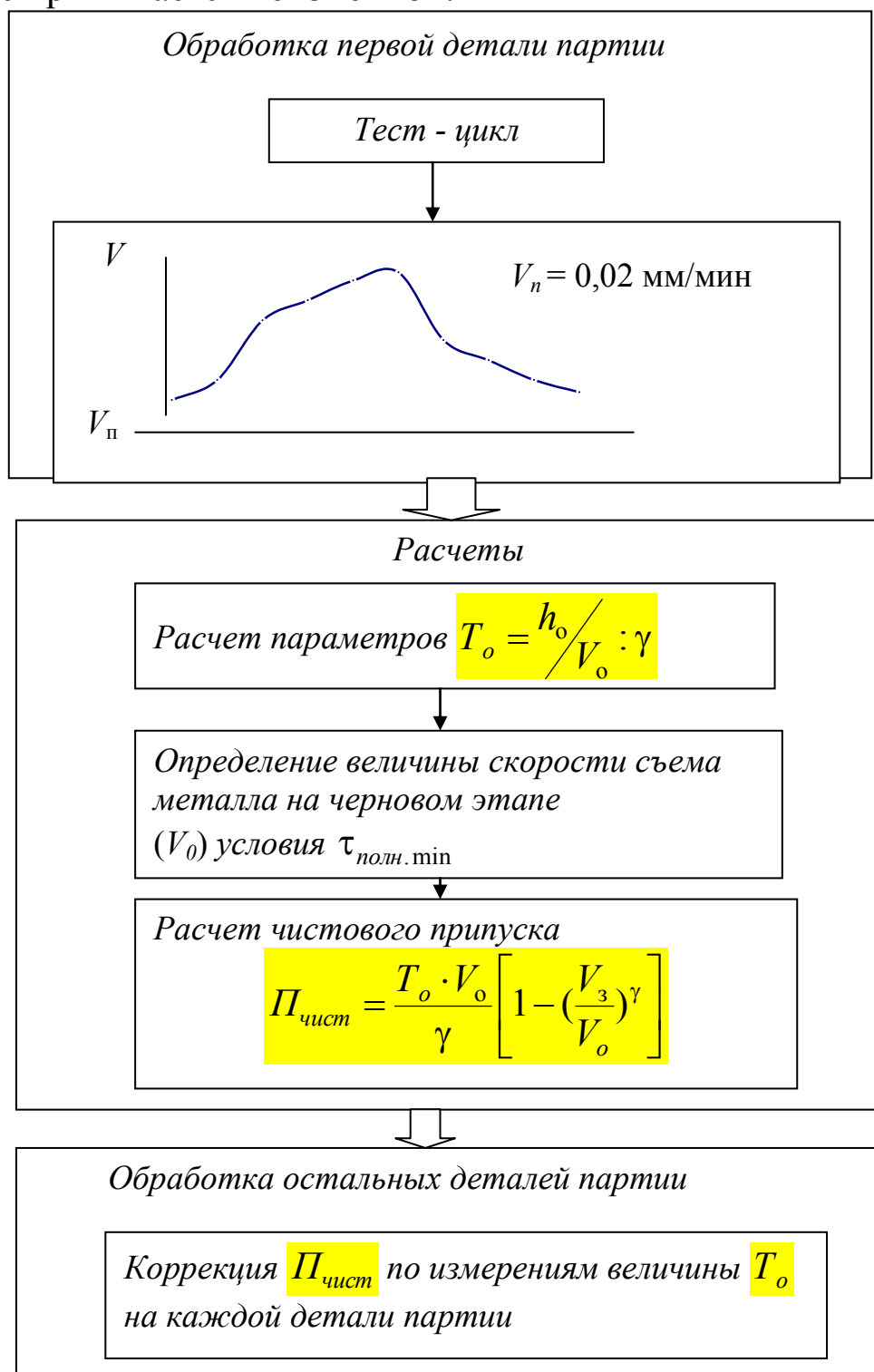


Рис. 2.2. Общая структура алгоритма обработки партии деталей на круглошлифовальных станках с ЧПУ, учитывающего изменение жесткости системы в цикле

Построение циклов обработки остальных деталей партии с управлением по ПАК предусматривает перераспределение припуска на обработку на черновой и чистовой с учетом возможных вариаций отжатый в системе.

Также, как и при обработке первой детали, на черновом этапе цикла работа идет в режиме стабилизации радиальной силы  $P_v$ , при этом врезание происходит на форсированной подаче. После включения алгоритма стабилизация силы  $P_v$  и выхода на установившийся черновой режим опрашивается тахогенератор привода подачи (ТГ) и путем изменения установки радиальной силы  $P_v$ , обеспечивается шлифование с величиной подачи  $S = V_o$ . После расчета  $\Pi_{\text{чист}}$  – чистового припуска на обработку, необходимого для окончания цикла обработки на заданной скорости съеме металла  $V_3$ , производится опрос ПАК и, при равенстве расчетного и текущего диаметрального размера детали дается команда на выхаживание. При достижении заданного диаметрального значения с контролем по ПАК происходит отвод шлифовальной бабки в исходное положение.

Если на деталях партии одна из шеек имеет прерывистую поверхность, то ее обработка должна производиться с управлением от датчика положения шлифовальной бабки (ДП).

На рис. 2.3 приведен алгоритм управления при обработке первой детали партии с использованием ПАК.

Алгоритмы могут быть использованы при разработке автоматизированных комплексов и модулей из круглошлифовальных станков с ЧПУ, предназначенных для эксплуатации в условиях мелкосерийного производства. Применение алгоритмов позволяет автоматизировать процесс получения изделий с требованиями по точности, соответствующими 5–6 качеству ISO и повысить производительность обработки.

На рис. 2.4 приведена блок-схема системы управления круглошлифовальными станками с ЧПУ. Информация от системы активного контроля размеров ХШ-9, которая включает в себя ПАК и ДП, поступает в блок связи, который работает совместно с аналоговоцифровым преобразователем (АЦП) и поступает в ЭВМ. От ДС информация поступает в блок связи и ЭВМ через блок стабилизации силы (СС). Управление поперечной подачей осуществляется через блок текущей и заданной информации (БТЗИ) по приборам ПАК и ДП двигателя (ЭД). Информация о величине подачи в блок связи передается тахогенератором (ТГ).



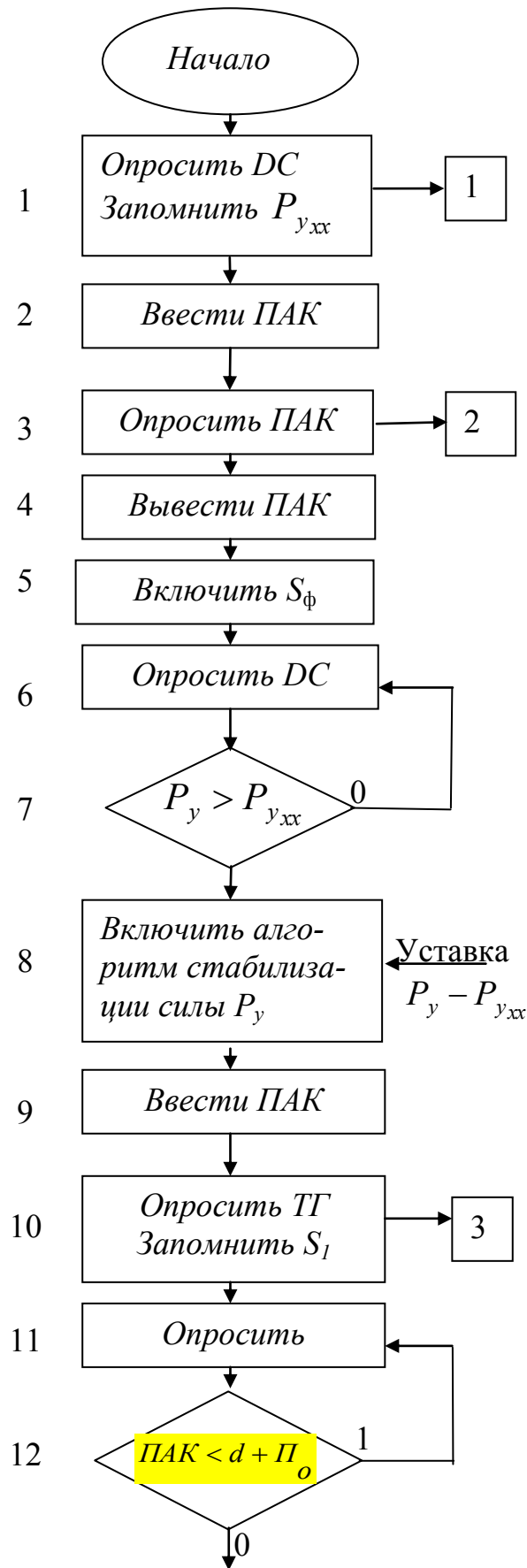


Рис. 2.3. Блок-схема алгоритма управления при обработке первой детали партии с использованием ПАК

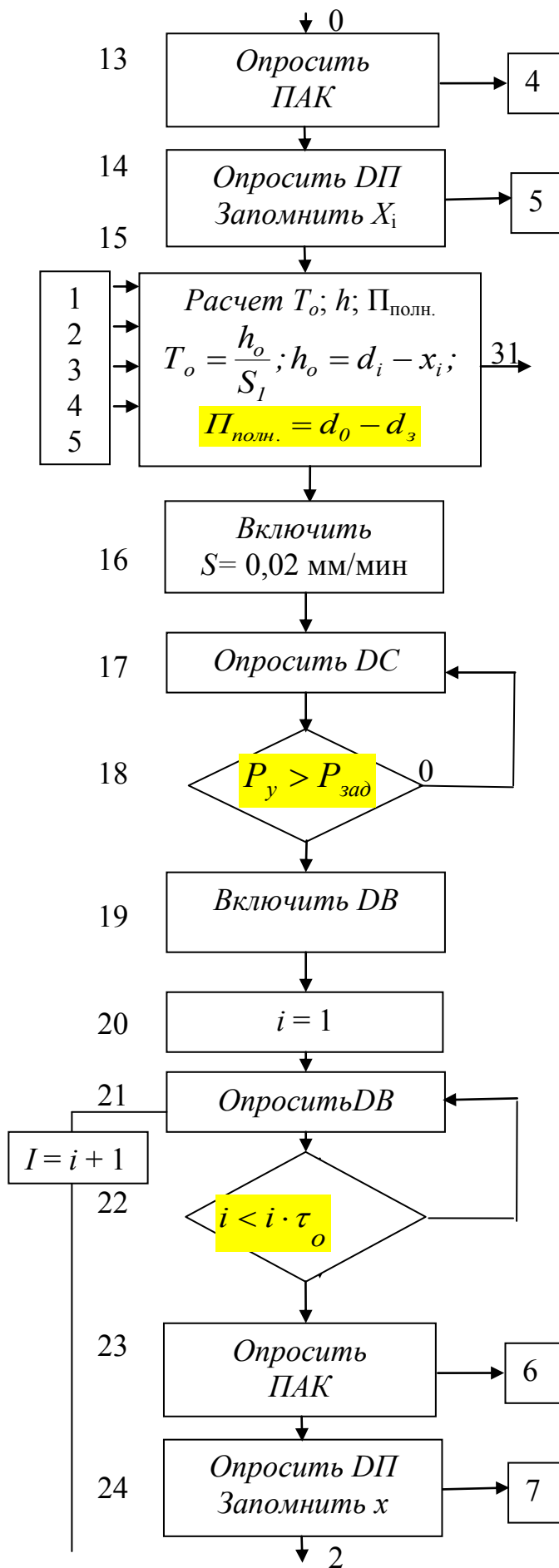


Рис. 2.3. Продолжение

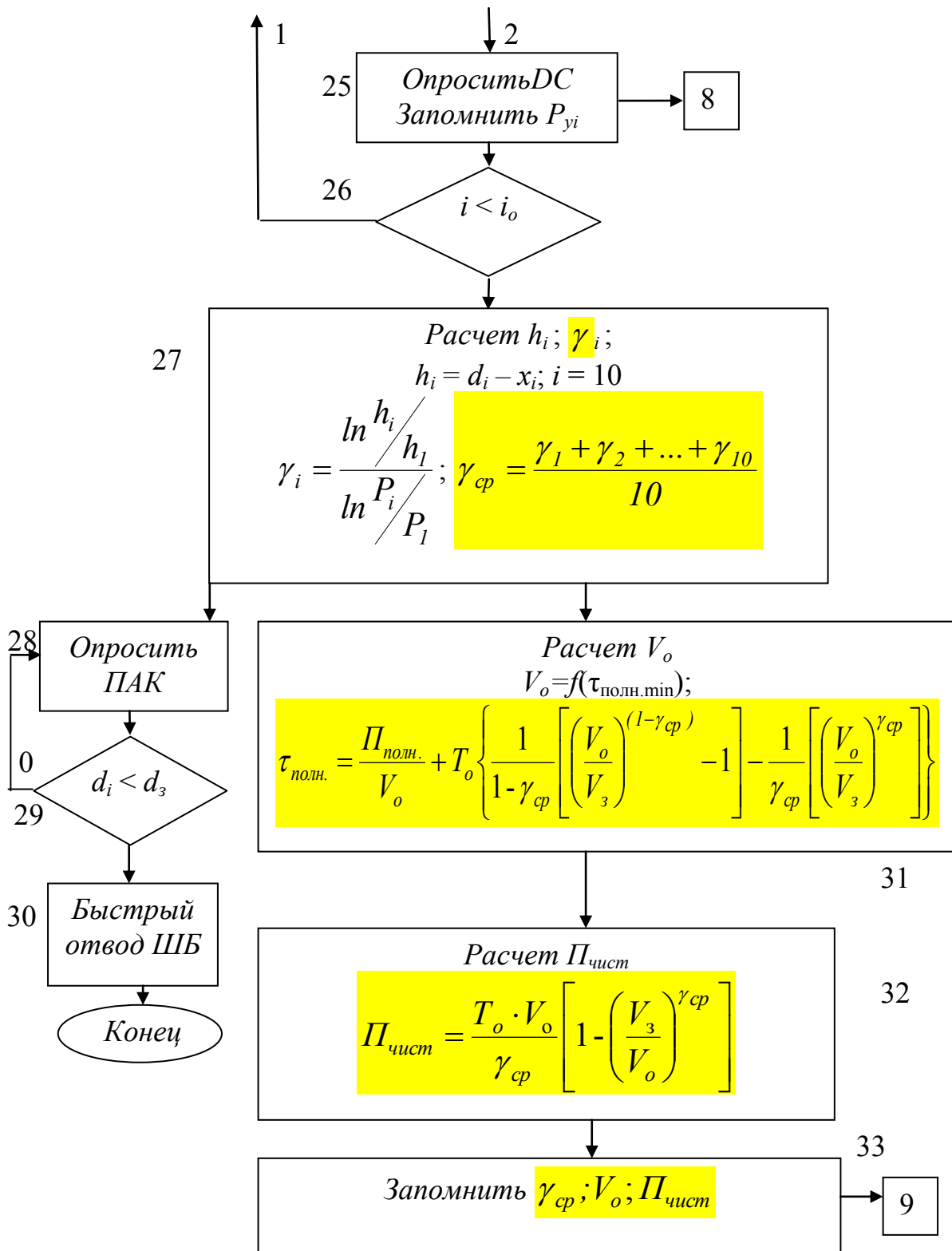


Рис. 2.3. Продолжение

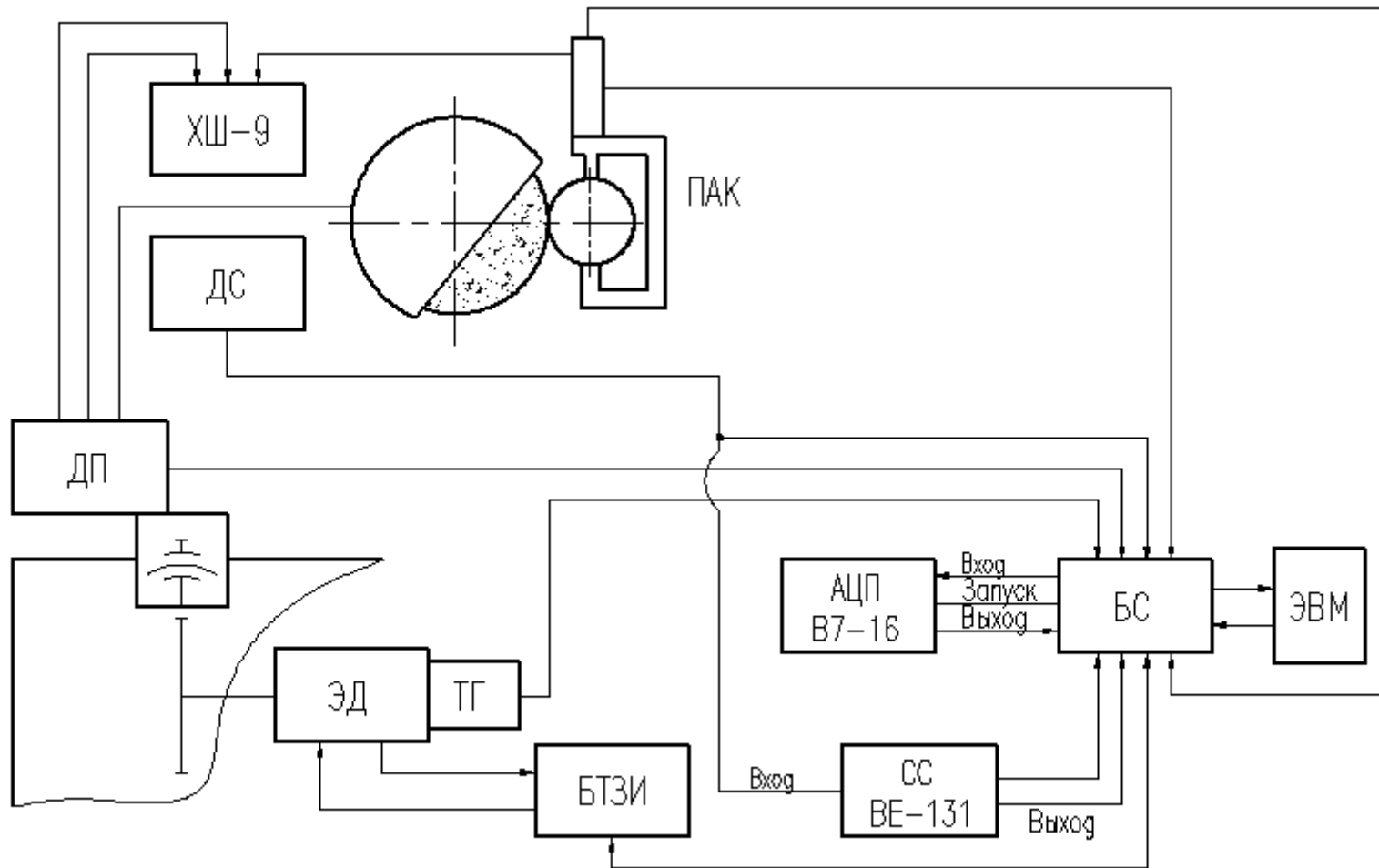


Рис. 2.4. Блок-схема системы управления круглошлифовальными станками с ЧПУ

### **3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

1. Ознакомиться с порядком построения оптимального по быстродействию цикла круглого врезного шлифования на круглошлифовальных станках с ЧПУ.

2. Ознакомиться с работой системы управления круглошлифовальным станком с ЧПУ.

3. Порядок построения алгоритмов управления на примере алгоритма управления при обработке первой детали партии с использованием ПАК.

4. Разработать алгоритм управления при обработке остальных деталей партии с использованием ПАК.

### **4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

Отчет должен включать схему структуры цикла круглого врезного шлифования и алгоритм обработки остальных деталей партии с использованием ПАК.

### **5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Порядок построения оптимального по быстродействию цикла круглого врезного шлифования на круглошлифовальных станках с ЧПУ.

2. Порядок построения алгоритмов управления на примере алгоритма управления при обработке первой детали партии с использованием ПАК.

## Лабораторная работа № 5

### ОБЗОР И АНАЛИЗ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Анализ состояния рынка оборудования для лазерной обработки, подбор вариантов для использования в конкретном технологическом процессе.

#### 2. ОБЗОР РЫНКА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

На российском рынке можно приобрести лазерное оборудование чуть ли не всех мировых производителей. Во-первых, это, конечно, известные мировые бренды – Amada (Япония), Trumpf (Германия), Bystronic (Швейцария).

А кроме этого, продукцию японских Koike и Mitsubishi Electric, турецких Safan, Baykal, Durmazlar, испанской компании Jordi, южнокорейской Hankwang, китайских Hans Lazer, Jiangsu Yangli Group, Beijing Chuangkeyuan Photoelectricity Technology, Balliu MTC, Haco, LVD Company, Salvagnini, FPL (Италия) и объединенной итало-финской Prima Power, германских Knuth GmbH, Eckert, Rofin-Sinar Lazer, «Рухсервомотор» (Белоруссия).

Производят лазеры и лазерные комплексы отечественные компании «Номаконт Трейд» (Москва), «ТехноЛазер» (Шатура), ОКБ лазерной техники СО РАН (Новосибирск), НПФ «ТЕТА» (Москва), НИИ лазерной физики (Санкт-Петербург), НПФ «Мехатрон» (Зеленоград), «Арес» (Москва), «Лазер Мастер Групп» (Москва), НПК «Морсвязьавтоматика» (Санкт-Петербург).

Сравнение лазеров разных типов приведены в табл. 2.1.

Ниже будут рассмотрены новинки продукции некоторых из перечисленных компаний.

Сравнение лазеров разных типов

Параметр	Требуется для использования в промышленности	CO <sub>2</sub>	YAG-Nd с ламповой накачкой	YAG-Nd с диодной накачкой	Диодные лазеры	Волоконные лазеры
Выходная мощность, кВт	1...30	1...30	1...5	1...4	1...4	1...30
Длина волны, мкм	как можно меньше	10,6	1,064	1,064 или 1,03	0,8...0,98	1,07
ВРР, мм × мрад	< 10	3...6	22	22	> 200	1,3...14
КПД, %	> 20	8...10	2...3	4...6	25...30	20...25
Дальность доставки излучения волоконном	10...300	отсутствует	20...40	20...40	10...50	10...300
Стабильность выходной мощности	как можно выше	низкая	низкая	низкая	высокая	очень высокая
Чувствительность к обратному отражению	как можно ниже	высокая	высокая	высокая	низкая	низкая
Занимаемая площадь, м <sup>2</sup>	как можно меньше	10...20	11	9	4	0,5
Стоимость монтажа, отн.ед.	как можно меньше	1	1	0,8	0,2	< 0,05
Стоимость эксплуатации, отн.ед.	как можно меньше	0,5	1	0,6	0,2	0,13
Стоимость обслуживания, отн.ед.	как можно меньше	1...1,5	1	4...12	4...10	0,1
Периодичность замены ламп или лазерных диодов, час.	как можно больше	-	300...500	2000...5000	2000...5000	> 50 000

Компания Trumpf предлагает широкую линейку станков для листообработки, позволяющую выбрать станок, отталкиваясь от конкретных задач, задаваемых заказчиком: серия деталей, их размер, толщина листа и даже пространство, на котором необходимо разместить станок.

Trumpf предлагает восемь серий станков TruLaser – от недорогих и удобных в использовании компактных станков серии 1000 до гибких станков для сверхформатов серии 8000. Разработанные компанией технологии раскроя позволяют обеспечить максимальные скорости резки, отличное качество реза, надежные и безопасные вспомогательные процессы. Концепция систем автоматизации установок для лазерной резки базируется на принципе модульности и дает возможность выполнения любых специфических требований. Пользователю предлагается выбор от полуавтоматической загрузки до полностью автоматизированного производственного комплекса с привязкой к складу.

К новинкам компании относятся станки TruLaser 3030 (L20) и TruLaser 7040 fiber (рис. 2.1, 2.2).



Рис. 2.1. TruLaser 3030 (L20)



Рис. 2.2. TruLaser 7040 fiber

Станок TruLaser 3030 (L20) с полным правом претендует на то, чтобы устанавливаться новые стандарты в обработке листового материала. Это один из самых успешных двухкоординатных лазерных станков в мире. Серия станков TruLaser 3030 (L20) наделена функциями, с помощью которых можно сделать производство значительно эффективнее. К тому же он так же надежен, как и TruLaser 3030 предыдущих поколений. Сильный и экономичный, станок TruLaser 3030 (L20) оснащается лазерными источниками мощностью от 3,2 до 6,0 кВт. Такие стан-



ки без проблем производят раскрой конструкционной стали толщиной 25 мм, нержавеющей стали толщиной 20 мм и алюминия толщиной 12 мм. Все лазерные источники TruFlow по завершении процесса резки переходят в режим ожидания, иными словами, энергосбережения. Станок оснащен быстрыми, надежными приводами. Движение по оси  $X$  осуществляется с помощью безредукторных двигателей. Они отличаются высокой динамикой и удобны в обслуживании. Движение по осям  $Y$  и  $Z$  осуществляется с помощью линейных приводов. Благодаря этому достигаются более высокие скорости осей по сравнению с предыдущей моделью. Технология FastLine оптимизирует процесс врезания и предотвращает разбрызгивание шлака. Принцип использования одной режущей головки, который хорошо зарекомендовал себя на станках TruLaser серии 5000, применен также на станке TruLaser 3030 (L20), что позволяет обрабатывать весь спектр толщин листов с помощью одной и той же режущей головки. Эта технология сокращает время непроизводительных операций, что особенно эффективно при обработке различных типов материалов в автоматическом режиме. Все сделано для того, чтобы листовая заготовка и режущая головка не сталкивались. Если же это произойдет, станок и лазерная головка надежно защищены от повреждений, а режущая головка легко возвращается на свое место. При небольших столкновениях режущая головка возвращается в нужное положение автоматически. По истечении нескольких секунд можно продолжать обработку.

Поставляемое как опция устройство для смены дюз нового поколения существенно уменьшает время переналадки станка.

В случае если качество листового материала оставляет желать лучшего, функция AdjustLine поможет разрезать лист низкого качества с помощью корректировки параметров резки. Достаточно одного нажатия на кнопку.

Общий принцип работы на станке заметно упрощен. Современный интерфейс системы ЧПУ обеспечивает интуитивное управление параметрами обработки. Четкая маркировка компонентов, требующих технического обслуживания, облегчает техническое обслуживание.

Хотелось бы коротко упомянуть еще о двух новинках компании. На прошедшей в ноябре 2011 года выставке Intech-2011 в Дитцингене (Германия) Trumpf-Group представила новую высокоскоростную систему для резки металлов, использующую дисковый твердотельный TruLaser 5040 fiber (рис. 2.3). Новый станок сможет обрабатывать листовой металл до 4 м длиной и 2 м шириной с максимальной скоростью реза 50

м/мин. Станок оснащается мощным 5-киловаттным твердотельным лазером, благодаря которому производительность системы многократно возрастет и позволит обрабатывать листовую металл большей толщины.

Еще один представленный на выставке усовершенствованный лазерный станок предназначен для резки 3D-изделий. Его особенность – система автоматической фокусировки луча на компонентах изделия переменной толщины. Подобные компоненты используются, например, в автомобильной промышленности. Новый станок TruLaserCell 8030 снабжен дисковым твердотельным лазером, обеспечивающим высокое качество луча и высокую энергоэффективность.



Рис. 2.3. Рабочая зона станка TruLaser 5040 fiber

Salvagnini проектирует и производит гибкие, автоматические 2D-машины и системы лазерной резки с 1994 года, предоставляя универсальные решения, технологичные и автоматизированные. Лазеры Salvagnini обладают надежными системами механики, контроля и программного обеспечения, что гарантирует легкость в использовании в сочетании с максимальной гибкостью и производительностью. При создании систем лазерной резки с оптоволоконным источником второго поколения L3 и L5, компания Salvagnini применила полученные за годы работы знания и опыт развития технологии волоконного лазера. Компания производит лазерные установки серийных рядов L3 и L5 мощностью 2 и 3 кВт с длиной обрабатываемого листа до 3000 или 4000 мм.

Лазерные системы серии L3 (рис. 2.4) имеют конструкции, макси-

мально адаптированные для использования с оптико-волоконным резонатором, это высокоскоростные, точные и надежные машины. Они безопасны для окружающей среды благодаря низкому потреблению энергии, эффективной системе фильтрации, защитным экранам вокруг рабочей зоны.



Рис. 2.4. Salvagnini L3

Система L3 является гибкой в производстве, надежной в эксплуатации и легко программируемой. Собственная разработка TRADJUST (набор параметров, функций и их адаптивный контроль) является основным преимуществом технологии лазерной резки, используемой в системе.

Успех оптического волокна связан с достижениями в сферах коммуникации и военных технологий, – там волоконная технология за многие годы использования показала свою эффективность и неприхотливость. Качества волоконного источника и передающего кабеля доказаны скоростью передачи данных, высочайшей надежностью в самых сложных сферах применения, они практически не требуют техобслуживания. Использование технологии оптического волокна позволило внести в конструкцию лазеров несколько существенных изменений и повысить скорости резания, расширить диапазон обрабатываемых металлов, снизить затраты на обслуживание, уменьшить энергопотребление при перемещении узлов системы и в процессе резки.

Система L3 имеет фокусирующую головку собственной разработки с набором интересных функций и характеристик. Конструкция головки вобрала в себя накопленный опыт Salvagnini и направлена на улучшение характеристик и динамики передачи лазерного излучения оптическим волокном. Единая для всех материалов и толщин режущая головка с одной линзой позволяет достигать высокого качества резки для любой толщины, гарантирует быструю смену заготовок и сокращение времени перенастройки и режимов резки. При необходимости очистки и техобслуживания замена линзы происходит легко и быстро.

Рядом с фокусирующей головкой установлен оптический датчик

точного положения SRP, полностью интегрированный в систему обработки данных ЧПУ CAMLaser.

Основными преимуществами SRP являются более быстрое совмещение программы резки относительно заготовки, точное центрирование, необходимое для завершения обработки, когда на листах уже присутствуют пробивки, формовки и рисунки. На точность SRP не влияют царапины, цветные линии, неточные углы, неровности и тип материала.

Патентованная система ЧПУ L3 SiX имеет высокоскоростную систему связи EtherCAT, необходимую для обеспечения уровня производительности при высоких скоростях резки, получаемых при использовании оптоволоконных источников. Система контроля постоянно и точно синхронизирует движения осей, точку фокуса и мгновенную мощность источника, параметры управления подачей вспомогательного газа.

L3 может обрабатывать широкий диапазон материалов и толщин с постоянным качеством. Это происходит с использованием азота или кислорода в качестве вспомогательного газа из двух специальных линий подачи или сжатого воздуха с третьей, отдельной линии, гарантируя полную безопасность.

Salvagnini предлагает гибкие системы, позволяющие уменьшить производственные затраты и расходы на управление. Благодаря широким возможностям перемещения материала и вырезанных деталей, L3 могут работать без оператора и быть интегрированными в автоматические производственные системы. Различные конфигурации подачи материала и выгрузки готовых изделий оптимизируют производственный поток, устраняя непроизводительные операции и расходы, связанные с ними, в то же время обеспечивая высокое качество продукции и быстрый возврат вложений.

Каждая система L3 оснащена JOB.CONSOLE – комплектом программного обеспечения, встроенного в ЧПУ станка (пакет SiX), и включающего в себя целый ряд модулей для эффективного решения любой производственной задачи, например модуль LASER TRADJUST – набор параметров и функций ЧПУ Salvagnini SiX, который объединяет данные, генерируемые CAMLaser, с требованиями процесса резки, автоматически оптимизируя динамику и траектории осей машины, или модуль TRADJUST, автоматически вычисляющий оптимальные значения изменения мощности как функцию направления движения, скорости и постоянного ускорения, делая это понятным для оператора обра-

зом.

Имея опыт нескольких десятков лет в области разработки и изготовления производительных установок для лазерной резки, компания Bystronic является одним из мировых лидеров.

Все основные технические компоненты и все части установок являются результатом собственных разработок. основополагающие ключевые технологии – «летучая» оптика, источник лазерного излучения, уникальная система Direct Helical Motor (DHM), система ЧПУ и прикладное программное обеспечение – оптимизируют производственные процессы, представляя собой важный технический прогресс.

На российском рынке компания Bystronic представляет девять моделей установок для лазерной резки – от самой малогабаритной установки для лазерной резки листов стандартных форматов ByVention до динамичной и мощной установки для гарантированного максимального объема выпускаемой продукции BySpeed Pro.



Рис. 2.5. BySprint Fiber

Остановимся на одной из последних моделей фирмы – установке для лазерной резки с высокотехнологичным волоконным лазером для обработки тонколистового металла BySprint Fiber.

BySprint Fiber обеспечивает исключительно высокий объем производства и абсолютную точность при обработке тонколистового металла. Оптимальная согласованность отдельных тщательно выверенных компонентов создает фундамент для первоклассного технологического процесса. Своей формуле успеха «все из одних рук» компания Bystronic остается верна и в случае с BySprint Fiber.

Источник лазерного излучения Fiber 2000 мощностью 2 кВт выгодно отличается минимальными производственными издержками. Это достигается благодаря высокотехнологичному волоконному лазеру и

оптимальной эффективности его излучателя.

Режущая головка BySprint Fiber была специально разработана для использования с волоконным лазером. Она соответствует используемым технологиям резки. Очистка сопла происходит автоматически.

Высокомоментный, не содержащий редукторов и других промежуточных элементов привод даже при низких оборотах обеспечивает высокие значения крутящего момента и ускорения. Точность позиционирования наряду с высокой скоростью резки гарантируют высокую производительность резки установкой BySprint Fiber.

Высокопроизводительная система управления ByVision от Bystronic обеспечивает простоту и скорость управления. Даже сложные схемы раскроя передаются в машину за несколько секунд. Аппаратные средства объединены в один компактный блок, который при проведении работ по техническому обслуживанию можно быстро заменить целиком.

Программное обеспечение CAD/CAM Bysoft – оригинальный пакет программ CAD/CAM, разработанный компанией Bystronic, для резки и гибки листового металла. Он разработан специально для оборудования Bystronic и обеспечивает полную реализацию используемых технологий резки и гибки. Удобное и понятное программное обеспечение Bysoft оказывает существенную помощь при подготовке к работе благодаря быстрому программированию. Этот пакет обладает всеми необходимыми функциями и отличается сквозной структурой объединения отдельных программных модулей.

Установка лазерной резки BySprint Fiber гарантирует исключительно быструю обработку тонких листов металла толщиной до 4 мм. В то же время лазер Fiber 2000 обладает достаточным потенциалом для обработки листов толщиной до 12 мм.

Компания «Рухсервомотор» разрабатывает и производит станки лазерной резки с волоконными лазерами на базе линейного привода уже более пяти лет. В зависимости от потребностей заказчика предлагаются от недорогих компактных станков серии LaserCUT-1512-2 (лист 1,5×1,25 м) до станков для нестандартного проката LaserCUT-12025-3 (лист 12×2,5 м). Наиболее популярная модель – LaserCUT-3015-3 с оригинальной координатной системой и волоконным лазером. Комплекс лазерной резки серии LaserCUT-3015-3 предназначен для раскроя широкого диапазона материалов (конструктивная и нержавеющая сталь, алюминий и др. материалы) и воплощает в себе передовые инновационные решения как в части лазерных технологий, так и в части коорди-

натных систем. Станок оснащен оптоволоконным лазером фирмы «ИРЭ-Полнос», который зарекомендовал себя в системах промышленной резки и сварки материалов, а преимущества порталных систем на базе прямого привода фирмы «Рухсервомотор» дают запас по всем точностным и динамическим показателям, обеспечивая долговременную эксплуатацию оборудования в цеховых условиях.

Станок LaserCUT-3015-3 состоит из порталного манипулятора с перемещением 3000×1500 мм и оснащен иттербиевым оптоволоконным лазером мощностью от 2 до 4 кВт, дополнительной осью Z и датчиком слежения за поверхностью листового металла заготовки, охлаждаемой оптической головкой с коллиматором и сменными соплами для подвода режущего газа.

В качестве привода подач используются линейные синхронные серводвигатели производства «Рухсервомотор», интегрированные в стальное основание станка с линейными датчиками положения и прецизионными направляющими. Конструкция защищена от искр и капель расплавленного металла экранами и высокотемпературной гофрозащитой. Благодаря использованию прямого привода станки характеризуются высокими скоростями подачи и ускоренным ходом до 180 м/мин, высокой статической и динамической точностью, отсутствием люфтов. Высокое пиковое усилие линейных двигателей и жесткость конструкции обеспечивают требуемые ускорения до 1,5 g, необходимые для повышения производительности при резке деталей с малыми радиусами закругления и острыми углами.

Используемое программное обеспечение, система ЧПУ, сервоконтроллеры производства «Рухсервомотор» характеризуются полностью цифровым управлением приводом, совместимостью с распространенными программами САД-САМ-оптимизации раскроя листа, интерпретацией стандартных форматов команд перемещения в G-коде, а также сплайнинтерполяцией, позволяющей выполнять резку произвольных криволинейных траекторий без покадровой остановки, что существенно повышает производительность станка.

Отсутствие редукторов и механических трансмиссий, характерное для прямого линейного привода, предотвращает износ и появление люфтов, упрощает техническое обслуживание, обеспечивает сохранение высокой точности в течение всего срока эксплуатации.

К числу достоинств станка относятся:

– высокая точность и скорость контурной обработки листового материала толщиной от 0,5 до 25 мм благодаря прямому приводу;

– отсутствие оптического канала для передачи энергии – лазерное излучение передается по гибкому оптическому волокну непосредственно в зону обработки;

– экономичность технологических процессов резки благодаря высокому КПД волоконного иттербиевого лазера (в 4 раза экономичней CO<sub>2</sub>-систем)

– низкие эксплуатационные расходы по обслуживанию системы в целом за счет высокой надежности координатной системы и иттербиевого волоконного лазера, а также отсутствия потребности в газах высокой очистки для обслуживания оптических трактов лазера.

В стандартной комплектации станок включает: раскройный стол с двумя сменными палетами, программу для раскроя, систему фильтрации воздуха с многпатронной системой самоочищающихся картриджей, винтовой компрессор, стабилизатор напряжения, благодаря которым станок обеспечивает оптимальную производительность, прецизионную обработку, высокое качество реза при сохранении высокого уровня безопасности, эргономичности работы лазерной машины.

Компания Ermaksan представляет своим пользователям новый станок лазерной резки с волоконно-оптическим лазером. Fibermak – станок для лазерной резки с мощной конструкцией, низким потреблением энергии, быстрой режущей способностью и крайне небольшими эксплуатационными расходами.

Технология резания с помощью волоконно-оптического лазера обеспечивает высокое качество обработки на очень высоких скоростях. Потребление энергии на 70 % меньше по сравнению с использованием лазеров CO<sub>2</sub>.



Рис. 2.6. Станок Fibermak

Станок Fibermak на 60–100% быстрее по сравнению с другими ла-



зерными станками. Оси оснащены линейными двигателями и приводами Bosh-Rexroth, что позволяет достигать скоростей перемещений до 120 м/мин, а ускорений до 2 g по оси Y и до 1,5g по оси X.

Станок Fibermak имеет мощный корпус, оснащенный качественными компонентами, разработанными для точной и непрерывной работы даже в сложных условиях и имеющими длительный срок службы.

Fibermak использует программное обеспечение системы CAD/CAM Lantek Expert Cutd в системе ЧПУ собственного производства. Используется множество функций для упрощения процесса резания, таких как автоматическое размещение и обработка данных, расчет времени и затрат и т. д.

Все данные о резании были внесены в таблицы технологической части Lantek. Таким образом, программа обработки деталей, которая обеспечивает размещение и обработку, непосредственно устанавливается в системе ЧПУ без каких-либо дополнительных настроек параметров резания.

Компания Durmazlar производит станки лазерного раскроя нескольких разновидностей. Промышленная система HD Series (Durma Laser HD, Hybrid Laser HD-M) способна удовлетворить выполнение любых задач по резке металлического сырья и других материалов благодаря продуманной комплектации и эффективному набору рабочих функций. Современный генератор лазерного луча обеспечивает высокую производительность, система датчиков предотвращает любые сбои в процессе работы.

Более компактный станок лазерной резки Compact Laser также отличается высочайшим качеством резки, имеет доступную цену, удобен и надежен.

Для его установки не требуется фундамент, резка производится в режиме «автомат» с хорошей эффективностью, предусмотрена возможность перенастройки параметров управления прямо в процессе работы.

Каждый станок, произведенный на заводах Durmazlar, проходит жесткое тестирование, отвечает всем предъявляемым к лазерному оборудованию требованиям, официально рекомендован к продаже на территории России.

Установка лазерного раскроя с ЧПУ Yangli ML 2040

Благодаря конструкции порталного типа с размещением лазера на центральной балке гарантируются плавная лазерная резка и жесткость перемещений.

Главные отрасли применения этих станков: раскрой листов мало-

углеродистой и нержавеющей стали, пластика, дерева и т. д.

В станке используется технологический комплекс с автоматической заменой стола для загрузки после обработки. Эта функция позволяет оптимизировать производственный процесс, упростить задачу оператора станка и, как следствие, значительно увеличить показатели производительности.

Прецизионно-шлифованные, закаленные стальные направляющие прямоугольного сечения предохраняются от загрязнения и ударного воздействия при помощи металлических щитков, или гофр.

Лазерная резка комфортна, благодаря удобному интерфейсу системы ЧПУ Siemens 840D и простоте подготовки технологического процесса при помощи САМ-программы. Автоматическое расположение чертежей заготовок на листе позволяет добиваться минимальных потерь площади листа материала при лазерной резке.

Следует сказать еще об одной отечественной разработке – серии лазерных машин МЛ35, совместной разработкой НИИ «ЭСТО» и научно-производственного центра «Лазеры и аппаратура ТМ», который разрабатывает и производит станки для лазерной резки с 1998 года.

Дело в том, что эти установки могут комплектоваться по выбору:

- волоконным иттербиевым лазером, предназначенным для автоматической прецизионной лазерной резки и раскроя изделий листов из черной и нержавеющей стали, алюминия, латуни, меди, титана, циркония и других металлов и сплавов;

- твердотельным лазером ND:YAG с ламповой накачкой, предназначенным для резки и сложноконтурного раскроя, гравировки, прошивки отверстий, сверления изделий из листового металла;

- газовым CO<sub>2</sub>-лазером для обработки пластика и оргстекла.

Серия МЛ35 с волоконным лазером включает в себя четыре модели:

- МЛ35-007-ЛД с лазером мощностью 700 Вт и максимальной толщиной разрезаемого листа 3–4 мм;

- МЛ35-010-ЛД, 1000 Вт и 8–10 мм соответственно;

- МЛ35-015-ЛД, 1500 Вт и 12–14 мм;

- МЛ35-020-ЛД, 2000 Вт и 15–20 мм.

В базовом комплекте поставки станки оснащены волоконным лазером фирмы IPG. Система управления позволяет осуществлять модуляцию мощности излучения лазера. Мощность, частота повторения и длительность модулирующих импульсов излучения варьируются в широких пределах, что обеспечивает выбор необходимых режимов и высокое качество обработки.

Перемещения по осям  $X$  и  $Y$  осуществляются с помощью линейных двигателей, разработанных и произведенных совместно «ЭСТО» и «Лазеры и аппаратура ТМ». Использование приводов на линейных синхронных двигателях прямого привода и волоконных лазеров дало возможность значительно повысить надежность, расширить технологические возможности и производительность машин, улучшить качество обработки. Перемещение вдоль оси  $Z$  осуществляется шаговым двигателем.

Базовый размер координатного стола  $1250 \times 2500 \times 100$  мм. Возможна также поставка лазерных машин с другими размерами координатных столов. Станки МЛ35 комплектуются компонентами известных мировых производителей – IPG, Rofin (лазеры); Aerotech (CNC-контроллеры); Hiwin (шариковые направляющие); Renisuaw (бесконтактные инодеры); Camozzi (компоненты пневмосистемы); Igus (гибкие кабель-каналы).

Основные технические параметры:

– наибольшие перемещения по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  –  $3000 \times 1500 \times 100$ ,  $2500 \times 1250 \times 100$ ,  $1250 \times 1500 \times 100$  мм;

– точность и повторяемость позиционирования по осям  $X$ ,  $Y$  – не больше 0,04 и 0,02 мм;

– максимальная контурная скорость перемещения по осям  $X$ ,  $Y$  (рабочий ход / холостой ход) – 300/1000 мм/с.

Резущая головка снабжена емкостным датчиком и микропроцессорной системой слежения, автоматически обеспечивающими требуемый зазор между защитным соплом резака и материалом заготовки в процессе резки. Для контроля за зоной обработки в оптическую систему может быть встроена телекамера и установлен монитор визуального наблюдения.

Установленный на станках CNC-контроллер Aerotech A-3200 и операционная система реального времени OS RTX с поддержкой современных многоядерных процессоров обеспечивают быстрое и четкое выполнение управляющих программ.

Программное обеспечение позволяет осуществлять загрузку, редактирование, сохранение и выполнение управляющих программ, настроить и сохранить технологические параметры задания, осуществляет контроль и самодиагностику машины в процессе работы. ПО обеспечивает возможность автоматического размещения деталей задания на раскрой, оптимизацию расположения и программирование дополнительной технологической обработки, т. е. реализует все необходимые

при работе такого станка функции.

НПК «Морсвязьавтоматика» (Unimach) из Санкт-Петербурга представляет три станка для лазерной резки металлического листа.

Установки серии LaserCut FO Professional выполнены на базе портальной координатной системы и волоконного лазера IPG Photonics и представляют собой, по мнению компании, высокопроизводительное решение для среднего бизнеса.



Рис. 2.7. LaserCut FO Professional

Установки лазерной резки металла серии LaserCut FO Standard – недорогое и эффективное решение для малого и среднего бизнеса.

Остановимся на одной из этих моделей – LaserCut FO Professional.

Используемые в установке LaserCut FO Professional волоконные лазеры обладают неоспоримыми преимуществами перед другими типами лазеров. Передача излучения осуществляется посредством волоконно-оптического тракта, исключая зеркала и передающие элементы. Таким образом, необходимые расходные материалы сведены к минимуму. Используемая волоконная система характеризуется исключительной надежностью, а срок ее службы сопоставим со сроком службы самого лазера.

Станина станка выполнена в виде цельносварной термически обработанной конструкции с последующей фрезерной обработкой. Она совмещает в себе высокую точность изготовления, жесткость, надежность и долговечность конструкции. Станина дополнительно утяжелена, что позволяет ей выдерживать высокие динамические нагрузки.

Одна из наиболее критичных и важных частей станка – механические компоненты и приводы, обеспечивающие движения координатной системы. Установка LaserCut FO Professional оборудована мощными приводами, безлюфтовыми редукторами, не нуждающимися в обслуживании, и закаленной косозубой шестерней-рейкой. В совокупности эти компоненты позволяют достигать высоких скоростей перемещения

при высоких динамических и точностных характеристиках.

Загрузка листа производится с помощью выдвигной палеты. При необходимости палета выходит за пределы зоны резания, обеспечивая удобную и безопасную для целостности станка погрузку листов металла. Опционально на раскройный комплекс LaserCut FO Professional устанавливается челночный стол, который позволяет существенно повысить производительность и облегчить работу со станком. Система с челночным столом имеет две палеты, поочередно вводимые в зону обработки. Такая конструкция позволяет осуществлять загрузку и выгрузку заготовок, не останавливая станок.

Станок LaserCut FO Professional оборудован системами дымоудаления, охлаждения и подачи газов.

Установка оснащена системой автоматического слежения за поверхностью листа Focus, которая обеспечивает стабильность удержания оптической головки резака с точностью до 0,1 мм в широком диапазоне высот, что позволяет четко работать даже на сильно деформированном металле, а также на краях заготовки.

Удобство и функциональность программного обеспечения играют немаловажную роль при раскрое листового металла. Именно с помощью программного обеспечения оператор управляет раскройным комплексом, осуществляет подготовку и загрузку программ, настраивает работу модулей станка. Программное обеспечение UniCut, разработанное компанией, обладает рядом достоинств: управление всеми узлами станка с одного рабочего места и из одной программы, возможность отдельной настройки режимов прожига, гравировки и резки, управление мощностью излучения в зависимости от скорости и других.

Комплекс лазерного раскроя металла LaserCut FO Professional может комплектоваться модулем резки профильной трубы – эффективным решением, предназначенным для прецизионного раскроя металлических труб круглого и прямоугольного сечения. С данным модулем лазерный комплекс совмещает в себе систему обработки листового металла и обработки труб с простой и быстрой перенастройкой с одного метода обработки на другой.

Модуль резки профильной трубы позволяет отрезать трубу по длине, вырезать отверстия, производить гравировку, а также осуществлять раскрой круглых труб по сложному контуру. При этом достигаются высокие точность и скорость обработки при высоком качестве поверхности реза.

Модуль резки профильной трубы дает возможность объединить

две технологические установки в одном комплексе и добиться максимальной производительности.

Диаметр круглой трубы от 10 до 315 мм, длина до 3000 мм. При необходимости длина обрабатываемых труб может быть увеличена в соответствии с техническим заданием заказчика.

Amada – один из крупнейших в мире станкостроительных концернов, который был основан в Японии в 1946 году.

Amada является одним из мировых лидеров в производстве листообрабатывающего оборудования – листогибочные и координатно-револьверные прессы и инструмент для них, лазерные и комбинированные лазерные установки, соответствующее программное обеспечение и средства автоматизации.



Рис. 2.8. Установка Quattro

Сервисные центры и склады компании расположены во всех индустриально развитых странах мира. Цель группы Amada – создание самого надежного современного и производительного инновационного оборудования с уникальными технологическими возможностями для повышения конкурентоспособности и экономической эффективности заказчиков.

Особенности станков Amada дают возможность выполнять как штучную обработку заготовок, так и конвейерный раскрой. Оборудование оснащено системами числового программного управления (ЧПУ) и оптическим элементом, перемещающимся по горизонтальным и вертикальным осям.

Параметры будущего металлоизделия (конфигурация, глубина,

ширина разреза и т. п.) преобразуются в числовые значения, которые закладываются в компьютер. В процессе раскроя система ЧПУ контролирует каждый этап. Погрешности автоматически отслеживаются и устраняются, что обеспечивает максимальную точность резки.

Компания Amada производит оборудование для лазерной резки листов малого, среднего и большого формата, а также для раскроя листов увеличенного формата.

В номенклатуре компании лазеры мощностью от 1000 до 6000 Вт. Компания производит лазеры как с летающей, так и с комбинированной оптикой, как CO<sub>2</sub>, так и волоконные. В зависимости от специфики технологических задач компания может предложить оптимальное решение для каждого конкретного случая.

Компания предлагает лазерные установки серий Quattro, LC-Alpha.IV, F0-3015 II NT, LC-F1 NT, FOL-3015 NT и FOL-F NT.

Кроме того, компания предлагает две модели установок, использующих комбинированную технологию, то есть лазерную и штамповочную технологии в одной машине. Это EML Z и LC-2012 C1 NT.

Установки лазерной резки серии Quattro комплектуются резонаторами мощностью 1000 и 2000 Вт. Благодаря сочетанию высокого качества и точности реза лазеры Quattro являются, по мнению фирмы, наиболее эффективным предложением для предприятий микроэлектроники и приборостроения.

Экономичность, компактность, простота в эксплуатации и обслуживании установки лазерной резки серии Quattro делают ее, пожалуй, лучшим выбором для тех, кто только осваивает лазерные технологии. Установка может быть оснащена встроенным приспособлением для резки труб.

Размер стола установки серии Quattro 1270×1270 мм, зона обработки по осям X, Y, Z 1260×1260×100 мм, максимальная толщина листа 6/12 мм.

Серия LC-Alpha.IV – четвертое поколение лазерных комплексов типа «Альфа». Лазерные комплексы серии LC-Alpha сконструированы с применением так называемой «полуплетающей оптики» – с перемещением лазерной головки по осям Y и Z.

Установки этого типа пользуются спросом благодаря ряду уникальных характеристик и технологических возможностей. Это компактность, надежность, качество реза, полная совместимость с системами автоматизации любого уровня, возможность автоматической обработки длинномерных заготовок без дополнительных затрат.

Возможности четвертого поколения лазеров этого типа – серии LC-Alpha.IV существенно возросли. Установки оснащены новым мультимедийным контроллером AMNC, новой лазерной головкой, комплектуются новыми резонаторами AF мощностью 2500 Вт и 4000 Вт, скорость перемещения по осям увеличена до 113 м/мин, а максимальная скорость резания – до 20 м/мин.

Функция OVS позволяет использовать эту установку в координации с прессом для автоматической обработки заготовок после штамповки. Укороченная траектория лазерного луча гарантирует его стабильность и, соответственно, качество реза, а также снижает эксплуатационные затраты.

Лазерные комплексы F0-3015 II NT оснащаются резонаторами мощностью 2500 Вт и 4000 Вт. На установках F0-3015 II NT использован принцип летающей оптики. Обрабатываемый лист остается неподвижным в течение всего цикла обработки, а лазерная головка перемещается по осям X, Y и Z.

Уникальная литая станина лазеров Amada позволяет производить высокоскоростную и высокоточную резку листа габаритами до 3070×1550 мм, гарантируя стабильность характеристик станка на весь срок его эксплуатации.

Два автоматически сменяемых рабочих стола позволяют обрабатывать листы весом до 900 кг. При этом резка осуществляется одновременно с загрузкой-разгрузкой металла. Телескопическая скользящая боковая панель обеспечивает легкий доступ по всей зоне резки.

Установка управляется оригинальным мультимедийным сетевым контроллером AMNC с удобным и понятным интерфейсом. Контроллер AMNC управляет всеми системами комплекса и имеет большую библиотеку параметров и режимов резки.

Установки серии F0-3015 II NT могут оснащаться устройством для резки и обработки труб различного сечения длиной до 6000 мм с автоматической подачей заготовки.

Установки лазерной резки серии LC-F1 NT используют новейшие достижения в лазерной оптике, высокоскоростные и высокоточные линейные сервоэлектроприводы на всех осях (Б, В и Г) и новейшие высокоскоростные контроллеры FANUC, что позволило лазерам серии F1 установить высокие стандарты качества скоростной лазерной резки.

Специально настроенные для F1 резонаторы мощностью 2500, 4000 и 6000 Вт позволяют получать высокое качество реза при очень высоких скоростях и ускорениях, обеспечиваемых линейными серво-



электроприводами.

Литая станина лазерной установки гарантирует отсутствие деформаций, вибраций и обеспечивает точность резки в течение всей эксплуатации установки. Конструкция лазера обеспечивает возможность беспрепятственного доступа к зоне резки с двух примыкающих сторон по всей ширине и длине обрабатываемого листа.

Лазерные установки Amada FOL-F NT, оснащенные волоконным лазером Amada, существенно расширяют сферу применения лазерной резки металлов за счет таких материалов, как титан, медь, латунь и бронза.

При экономичности и компактности волоконного лазера Amada, благодаря более короткой длине волны и высокой мощности (4000 Вт), установка Amada FOL-Fiber NT позволяет достигать скорости резания до 60 м/мин на нержавеющей стали толщиной 1 мм.

В серии EML Z Amada предлагает не только лазерную и штамповочную технологию в одной машине, но и комбинацию полуплетающей лазерной оптики с запатентованным сервоэлектрическим приводом ползуна с усилием штамповки 300 кН, обеспечивающим совершенно новый уровень гибкости и эффективности использования энергии.

Обработка листа идет быстрее, когда есть возможность использовать в одной машине преимущества и лазера, и пресса. Сложные элементы формовки удобней делать с помощью функции пресса Punch & Forming. Лазер мощностью 4000 Вт даст преимущества при обработке длинных криволинейных контуров, а большое количество отверстий быстрее сделает пресс.

ЧПУ AMNC обеспечивает очень высокий уровень комфорта пользователя и позволяет взаимодействовать в сети предприятия всем станкам Amada, вовлеченным в производственный процесс.

Мощность лазера 4000 Вт, мощность пресса 300 кН, зона обработки 3050×1620 и 3050×1875 мм, максимальная толщина листа 6 мм.

Новая комбинированная машина LC-2012 C1 NT предлагает инновационные технологии штамповки и лазерной резки при минимальном занимаемом пространстве. Используя этот станок, пользователь получает возможность выбора наиболее эффективного способа изготовления каждого элемента детали – штамповка с усилием 200 кН или резка лазером мощностью 2500 Вт.

Комбинированная технология позволяет уменьшить количество необходимого инструмента, особенно специального, что важно для небольших партий и единичного производства. Система ЧПУ AMNC, ко-

торая теперь используется практически во всех областях технологий листообработки Amada, обеспечивает максимальную простоту использования и сетевые возможности для всех станков.

Модульная система автоматизации лазер-пресса позволяет сортировать готовые детали на ленточный конвейер при занимаемом пространстве всего  $52 \text{ м}^2$ , а полностью автоматизированный комплекс с загрузкой листа, выгрузкой скелетона и сортировкой деталей требует только  $62 \text{ м}^2$ .

Мощность лазера 2500 Вт, усилие пресса 200 кН, зона обработки  $2500 \times 1270$  мм, максимальная толщина листа 6 мм.

Нельзя не сказать буквально несколько слов о системах автоматизации для станков лазерной резки. Это:

- автоматическая система хранения материала ASLUL FO;
- устройство загрузки/выгрузки для лазерных комплексов MP;
- система сортировки деталей для лазеров серии ALPHA PRIII;
- автоматическая складская система CS 300.

Компания Hankwang, основанная в 1990 году, является крупнейшей в Республике Корея компанией, производящей системы лазерной обработки. Hankwang специализируется на производстве систем лазерной резки, сварки и систем автоматизации листообработки.

Компания предлагает установки лазерной резки трех серий -FS, FL и FS Fiber.



Рис. 2.9. Hankwang FL3015

CO<sub>2</sub>-установки лазерной резки серии FS – 3-осевые с летающей оптикой с перемещением портала вдоль длины стола. Применение литых алюминиевых элементов в конструкции портала препятствует вибрациям при любой смене задачи в рабочей зоне стола. Два современных сервопривода портала, высокоскоростная смена столов.



Рис. 2.10. Hankwang FL3015 Fiber

Компания производит несколько моделей установок серии FS с размерами рабочей зоны от 1524×3048 до 2650×8250 мм.

CO<sub>2</sub>-машины лазерной резки серии FL (две модели: FL2512 и FL3015) – 3-осевые с летающей оптикой с перемещением портала вдоль ширины стола. Два сервопривода портала, высокоскоростная смена столов. В качестве опции предусмотрена возможность установки четырехкулачкового патрона и задней бабки для обработки профилей и труб.

Применяется новейший тип лазерного CO<sub>2</sub>-резонатора постоянного тока производства компании Panasonic, самый быстрый контроллер Siemens. Возможна установка 5 моделей резонаторов разной мощности.

Кроме того, компания предлагает новую модель – FS 3015 Fiber, демонстрирующую отличную динамику, высокую эффективность и низкую себестоимость обслуживания.

Основные достоинства оборудования Hankwang:

- современный дизайн;
- высокая скорость и динамика;
- широкие технологические возможности;
- низкие производственные расходы.

Оборудование лазерной резки Koike принципиально отличается особенной установкой резонатора, эти машины являются самыми большими лазерами в мире. Lasertex – установка для лазерной резки металла на базе CO<sub>2</sub>-лазера. Выпускаются модели мощностью 2 кВт, 3 кВт, 4 кВт, 5 кВт, 6 кВт. Максимальное расстояние между рельсами – 9000 мм. Максимальная эффективная ширина разрезаемой заготовки – 7500 мм. Это установки лазерной резки с самым широким пролетом в мире. Стандартная длина рельсов – 15 000 мм. Максимальная длина рельсов – 50 000 мм. Основные особенности установки:

- машина портального типа с приводом с обеих сторон;

- лазерный резонатор смонтирован на машине;
- система ЧПУ управляет всеми параметрами установки;
- обеспечена постоянная длина луча;
- рельсы с зубчатой рейкой, всевозможные дополнительные устройства и функции.

Установка имеет высокоскоростную, высокоточную режущую систему.

Везде, в пределах эффективного диапазона резки, специальный запатентованный прибор, обеспечивающий двухосевое управление резонатором и смонтированный на портале, сохраняет оптическую длину пробега луча. Это обеспечивает постоянную ширину реза и стабильно высокое качество поверхности реза. Благодаря этому обыкновенная возможна чистая резка, что повышает производительность труда и сокращает затраты времени. Использование высокоскоростной непрерывной волны практически удваивает скорость импульсной резки. Возможность сверхскоростной прошивки резко увеличивает производительность установки Lasertex для случаев, требующих прошивки во многих точках (функция сверхскоростной прошивки поставляется по дополнительному заказу). Процесс идет практически без образования окалины. Лазерные головки (резаки), разработанные фирмой Koike, позволяют производить резку даже окрашенных стальных пластин без предварительного обжигания металла. На базе установок Lasertex можно организовать работу линии лазерной резки по «безлюдной» технологии. Полностью автоматизированная система может быть оснащена под «безлюдное» функционирование при лазерной резке металла с автоматическим накопителем. Линия может быть подключена к общей системе, осуществляющей централизованное управление. Внедрение высокоскоростного и высокопроизводительного оборудования для резки толстых пластин с использованием 6 кВт лазера неизбежно приведет к образованию выделений в атмосферу. Запатентованная система сбора пыли фирмы Koike была разработана для уничтожения вредных выделений. В ней использован пылесборник, смонтированный на установке, и вытяжной шкаф для сбора аэрозолей.

Установка Lasertex управляется системой ЧПУ Fanuc 16LB.

Компания Koike также представляет две новые разработки – установки для резки моделей Fibertec и Fibertex с волоконным резонатором для обработки материалов, толщина которых ранее не была доступна данной технологии.

Многие производители на сегодня уже включили волоконные лазерные станки в свою программу. Но практически все они имеют одно существенное ограничение: максимальная толщина материала при стабильном резе на них не превышает 12 мм (отдельные источники – до как оборудование для раскроя тонкого металла).

Длительные исследования, проведенные специалистами компании Koike, позволили впервые в мире разработать волоконный станок, позволяющий выполнять устойчивый качественный рез материала до 25 мм толщиной. Секрет заключается в сочетании лазерной головки специальной конструкции (собственная разработка Koike) и лазерного резонатора компании IPG.

Базовая конструкция станка, станина и механика разработаны европейским подразделением Koike Engineering Germany, интеграция волоконного резонатора в систему осуществлялась специалистами Koike Sanso Kogyo в Японии.

Станки серии Fibertec имеют привычную конструкцию с двумя челночными столами. Модульный принцип конструкции позволяет комплектовать их различными системами автоматизации и складирования. Размер рабочей области – от 1500×3000 до 2000×6000 мм.

Другая серия волоконных станков Fibertex имеет порталную конструкцию с практически неограниченной длиной рельс.

Линии станков Koike Fibertec и Fibertex представляют собой новое поколение оборудования для лазерного раскроя, расширяющее сферу применения этой технологии при снижении эксплуатационных расходов и, соответственно, себестоимости продукции.

Yamazaki Mazak уже много лет занимается выпуском лазерных машин и обеспечивает потребности промышленных предприятий в высокоскоростной и высококачественной резке металлопроката. Долгие исследования в области станкостроения и лазерных технологий вывели компанию на лидирующие позиции в этом сегменте рынка. На сегодняшний день у компании только в Европе имеется 5 технических центров, занимающихся исследованиями, разработками и поддержкой лазерного оборудования.



Рис. 2.11. Mazak OptiPlex 510 Fiber

Помимо Японии у компании Yamazaki Mazak есть заводы в США, Великобритании, Сингапуре и Китае, которые также производят оборудование под маркой Mazak. Всемирная сеть компании охватывает 77 технологических и технических центров, обеспечивающих помощь клиентам компании на местах.

Компания Mazak имеет в своем распоряжении 8 киберзаводов в 5 различных странах для того, чтобы иметь возможность поставлять оптимальное оборудование для заказчиков по всему миру в максимально короткий срок.

Станки имеют отношение практически ко всему, что нас окружает, и их важность невозможно переоценить. Корпоративная философия компании Mazak состоит из трех ключевых элементов: «Высокое качество», «Передовые технологии» и «Международная сеть», которые являются фундаментом развития и предлагают производителям оборудование, отвечающее всем их требованиям.

Установки лазерной резки фирмы Mazak применяются для обработки как листового материала – сталь, в том числе углеродистая, высоколегированная, нержавеющая, алюминий, латунь и др. – различной толщины в пределах до 25 мм, так и объемных материалов – трубные профили, коробка и любые другие объемные конструкции – с толщиной стенки до 25 мм. Также возможно применение автоматической системы загрузки и выгрузки листа, применение дополнительных сменных головок с инструментом для нарезания резьбы, сверления, зенкования, разметки.

Всего компания Mazak предлагает более десятка моделей лазер-

ных станков. Естественно, обо всех рассказать не удастся. Остановимся на двух новинках – OptiPlex 510 Fiber и Super Turbo-X Mk III RTC.

Лазерный станок с двумя сменными рабочими столами для 2D-резки OptiPlex Fiber – это новейшая разработка компании Mazak, впервые представленная осенью 2011 года на выставке в США. Установка предлагает широкий спектр автоматических функций, сокращающих нагрузку на оператора, обеспечивая оптимальную продуктивность и высочайшее качество. Автоматическая настройка позволяет обрабатывать листы различной толщины – от сверхтонких до толстых, включая окрашенные пластины из оцинкованной стали, – при минимальном вмешательстве оператора.

Вот только некоторые функции OptiPlex Fiber:

- устройство проверки сопла при помощи камеры;
- приоритет пробивки начального отверстия – при помощи Mazak Smart System;
- передача лазерного луча по оптическому волокну;
- измерение и настройка фокальной точки автоматически;
- четырехосевые независимые сервоприводы;
- синхронизированный контроль;
- система ЧПУ со сверхскоростным упреждающим считыванием в направлении движения Mazatrol Preview 2 нового поколения.

Скорость резки и ускорение, а также мощность излучения в каждой точке рассчитываются автоматически на основе данных о контуре. Системе ЧПУ нового поколения удастся добиться одновременно как сверхвысокой скорости, так и точности. Уменьшено количество кнопок управления, всего 2 шага от одной экранной формы управления к другой.

Лазерный станок Super Turbo-X Mk III RTC – машина с большим количеством стандартных функций:

- резка труб и трубного профильного металла (2D), круглые трубы диаметром от 20 до 375 мм;
- резка на объемных кубических изделиях;
- нарезание резьбы в отверстиях (M3-M10);
- зенкерование отверстия.

Лазерная система Super Turbo-X Mk III RTC имеет самую высокую ось Z для резки в 2D, ход головки составляет 430 мм. Новая режущая головка PFP оснащена рядом сенсоров, которые контролируют и упрощают процесс резки.

Основные достоинства станка Super Turbo-X Mk III RTC:

- сверхвысокая скорость и прецизионная точность, основанные на внедрении в оборудование Mazak современных технологий в области электроники и механики;

- легкая и прочная конструкция стола и использование усовершенствованной технологии анализа подавления вибрации позволяют добиться сверхвысокой скорости;

- безударная сервотехнология с высоким коэффициентом усиления обеспечивает прецизионную точность резки;

- встроенная лазерная установка нового поколения с турбообдувом, обладая высокой производительностью, требует меньше операций технического обслуживания;

- постоянная длина хода луча обеспечивает однородность резки на любом участке рабочего стола.

Дополнительно приобретаемая бесконтактная головка с автоматической фокусировкой позволяет с помощью команд системы ЧПУ управлять точкой фокусировки и зазором форсунки, обеспечивая тем самым непрерывность работы при резке заготовок из различного материала различной толщины.

И несколько слов о программном обеспечении.

Программные пакеты FG-Cadcam, Smart System и Space Cam представляют собой готовые постпроцессоры со всеми функциями Cad/Cam-систем. Пакет FG-Cadcam предназначен для создания управляющих программ для машин лазерной резки трубных заготовок. Пакет позволяет осуществлять 3-мерное моделирование, редактирование и создание управляющих программ. Также в данный пакет входит режим 3-мерной симуляции, который наглядно отображает весь процесс резания и укажет в случае необходимости на допущенные ошибки.

Пакет Smart System предназначен для создания управляющих программ для раскроя листового проката на машинах лазерной резки. Данный пакет позволяет создавать, редактировать эскизы будущих деталей, наиболее эффективно располагать их на листе и выводить управляющую программу для станка. Также в данный пакет входит режим 2-мерной симуляции.

Пакет Space Cam предназначен для создания управляющих программ для раскроя 3-мерных заготовок на машинах лазерной резки. Данный пакет позволяет редактировать 3D-модели и выводить управляющие программы. Также в данный пакет входит режим 3-мерной симуляции, который наглядно отображает весь процесс резания и укажет в случае необходимости на допущенные ошибки.



Компания Mitsubishi предлагает установку для лазерной резки серии eXML3015eX.

Основные конструктивные и технологические достоинства установки лазерной резки Mitsubishi ML3015eX:

- высокоэффективная резка конструкционной стали толщиной до 28 мм, нержавеющей стали – до 22 мм, алюминия – до 16 мм;
- использование схемы «летающая оптика»;
- новая высокоэффективная 64-битная система ЧПУ на RISK-процессорах;
- безтурбинный резонатор мощностью 4,5 кВт с парными низкооборотистыми вентиляторами поперечной прокачки газа;
- объединенная платформа «станина-резонатор», позволяющая обеспечить необходимые оптические параметры системы с защитой от вибраций и других посторонних факторов;
- высокопрочная литая состаренная чугунная станина, спроектированная методом конечных элементов;
- управление перемещением режущей головки над листом по оси Z при помощи автоматической системы установки фокуса (PH-X);
- эффективная система защиты лазерной головки от соударений благодаря специальной магнитной подвеске;
- патентованная высокоэффективная система стабилизации длины луча с управлением от ЧПУ, обеспечивающая постоянство длины луча в любой точке рабочей зоны на любых режимах;
- эффективная резка толстых материалов с применением технологии Brilliant Cut;
- высокоэффективная система подавления плазмы Plasma Guard для обработки углов на больших толщинах;
- система снижения перегрева материала в углах для обработки нержавеющей и гальванизированной стали;
- система автоматического перезапуска после внезапной остановки;
- автоматическая быстродействующая система смены режущего газа;
- возможность использования в качестве режущего газа, кроме азота и кислорода, также воздуха и аргона;
- низкий расход резонаторного газа – 3 л/ч;
- высокая точность позиционирования для осей X и Y –  $\pm 0,01$  мм;
- максимальная диагональная скорость холостых перемещений – до 140 м/мин;
- максимальная скорость рабочих перемещений – до 30 м/мин;

- доступная зона обработки с защитной автоматической передней подъемной дверью;
- челночный стол с автоматической системой быстрой смены палет;
- автоматическая система определения положения листа и компенсации при развороте листа;
- высокоэффективная система удаления пыли и газов во всей рабочей зоне;
- поддержка работы в сети. Загрузка программ и параметров обработки в станок.



Рис. 2.12. Mitsubishi ML3015eX

Компания Mitsubishi начала выпуск лазерной установки 2D eX. Новая модель является представителем пятого поколения лазерных устройств компании. По сравнению с предыдущим оборудованием новая установка требует гораздо меньших затрат на техническое обслуживание во время эксплуатации, является экологически безопасной. Уровень производительности при использовании этой модели повышается почти в полтора раза по сравнению с ранее выпущенными моделями.

Количество углекислого газа, который выделяется во время рабочего процесса, снизилось на 30 %. Благодаря компактному дизайну оборудования не требуется большого помещения для его установки. Несмотря на уменьшенные размеры станка, габариты 2-палетного челночного стола остались прежними, что позволяет осуществлять обработку деталей различных размеров из стандартного листа габаритом 1500×3000 мм и толщиной до 28 мм (сталь).

Для удобной работы оператора лазерная установка оборудована встроенной поворотной приборной панелью ЧПУ с сенсорным 15" экраном, сканером штрих-кода и широкой автоматической подъемной дверью для легкого доступа к рабочей зоне.

Компания Yangli Group является известным в мире производителем листообрабатывающего оборудования. Представляем три комплекса лазерной резки с ЧПУ – Yangli ML3015, ML4020 и ML 1530.

Комплексы ML3015 и ML4020 укомплектованы высококачественной оптикой. Перемещения обеспечиваются прецизионными серводвигателями по высокоточным направляющим. Управление всеми функциями станков выполняется модульной микропроцессорной системой ЧПУ Siemens Sinumerik 840D с интегрированным ПК. Система ЧПУ обладает функцией автоматического поиска края заготовки, авторегулировкой высоты форсунки, коррекцией диаметра луча при контурной резке.

Основной сложностью является транспортировка лазерного луча от резонатора до режущей головки с минимальными потерями мощности. Эта задача решается благодаря использованию линз и зеркал производства компании Kugler (США).

Оба станка могут комплектоваться разными лазерными генераторами: Panasonic (Япония), RPC (США) и Nanjing Eastern (Китай) – и иметь мощность от 2 до 4 кВт. Максимальная толщина разрезаемой нержавеющей стали может достигать 12 мм. При этом расход газа  $\text{CO}_2$  в среднем составляет 30–40 л/ч. Лазерная режущая головка Precitec (Германия) оснащена емкостным датчиком, который отслеживает расстояние между форсункой и обрабатываемым материалом, что позволяет точно выдерживать и регулировать его и в результате получать высокое качество реза в любом месте листа. Следует отметить замкнутую систему охлаждения лазера с постоянным контролем температуры. Она позволяет продлить срок службы линз и зеркал, обеспечивает бесперебойность работы генератора.

Перемещения по осям осуществляются с помощью сервоприводов переменного тока, шариковинтовой передачи и линейных направляющих, обеспечивающих высокую скорость срабатывания, которая может достигать 106 м/мин при точности позиционирования 0,06 мм! Устройство лазерной резки дополнительно оснащено защитой от некоторых агрессивных веществ в окружающей среде – направляющие заключены в капсулу под небольшим давлением во избежание попадания внутрь испарений, идущих от работающих механизмов, повышенной влажности и температуры. Площадь обрабатываемой поверхности для ML4020 составляет 4000×2000 мм, а для ML3015 – 3000×1500 мм. Направляющие имеют прямоугольное сечение и выполнены из закаленной стали. Их поверхность имеет высокий класс чистоты обработки.

Технологический комплекс для раскроя листа Yangli ML 1530 используется, как правило, для высокопроизводительного, сверхточного автоматизированного раскроя высокого качества.

Благодаря конструкции портального типа с размещением лазера на центральной балке гарантируются плавная лазерная резка и жесткость перемещений. Главные отрасли применения этих станков – раскрой листов малоуглеродистой и нержавеющей стали, пластика, а также дерева.

Система перемещения по осям функционирует благодаря сервоприводам переменного тока, шариковинтовой передачи и линейных направляющих, обладающих быстрой скоростью срабатывания. Электродвигатели привода установлены таким образом, чтобы исключались механические люфты при изменении направления перемещения по оси.

Перемещение по оси  $Y$  осуществляется с помощью серводвигателя, быстродействующих подшипников и направляющих. Перемещение по оси  $X$  осуществляется с помощью двух серводвигателей, точных линейных направляющих и механизма ременной передачи, которые являются надежными в течение работы. Перемещение по оси  $Z$  также осуществляется с помощью серводвигателя, подшипников и линейных направляющих. Чувствительный бесконтактный датчик на высокоэффективной обрабатывающей головке автоматически прослеживает центр для качественного реза. Стол отрезного устройства уменьшает контакт с поверхностью во избежание царапин заготовки с наименьшими изменениями деталей. Для станка разработано устройство удаления отходов.

Быстрый осевой поток газа  $CO_2$  для лазера STS 3000, произведенный компанией Panasonic (Япония), предназначен для быстрой подачи газа.

Блок охлаждения, который специально разработан для лазерного станка, обеспечивает быстрое и эффективное охлаждение.

Станок управляется системой ЧПУ Siemens Sinumerik 840D.

Станок может резать мягкую сталь, нержавеющую сталь, пластик, оцинкованные листы, оргстекло и т. п.

### **3. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

Для выполнения необходимо:

1. Изучить обзор лазерного оборудования с использованием дополнительной литературы и материалов сети Интернет;
2. Подготовить ответы на контрольные вопросы;

3. Отчет по лабораторной работе.

#### **4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА.**

Отчет по работе должен содержать следующие разделы:

1. Наименование и цель работы;
2. Конспект основных теоретических положений, приведенных в лабораторном практикуме;
3. Предложения по использованию лазерного оборудования на машиностроительных предприятиях Кузбасса.

#### **5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Опишите оборудование фирмы Trumpf.
2. Опишите оборудование фирмы Salvagnini.
3. Опишите оборудование фирмы Bystronic.
4. Опишите оборудование фирмы «Рухсервомотор».
5. Опишите оборудование фирмы Ermaksan.
6. Опишите оборудование фирмы Durmazlar.
7. Опишите оборудование фирмы «ЭСТО».
8. Опишите оборудование фирмы «Морсвязьавтоматика».

## Лабораторная работа № 6.

### ИЗУЧЕНИЕ И НАСТРОЙКА ЗУБОСТРОГАЛЬНОГО СТАНКА МОД. 526

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить конструкцию и кинематику зубострогального станка и научиться проводить его настройку и наладку.

#### 2. ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК НА ЗУБОСТРОГАЛЬНЫХ СТАНКАХ

Зубчатые конические колеса нарезаются на зубострогальных станках резцами по методу обкатки.

Прежде чем разбирать процесс нарезания, рассмотрим зацепление конического колеса с плоским производящим колесом. Это колесо имеет конические зубья, расположенные в плоскости торца. Профили зубьев его имеют форму равнобокой трапеции, как у зубчатой рейки (рис. 2.1, а). Если плоское производящее колесо 1 ввести в зацепление с коническим колесом 2 (рис. 2.1, б) и сообщить им вращательное движение вокруг осей, то получим зацепление, аналогичное зацеплению цилиндрического колеса с рейкой: зубья плоского колеса с прямолинейным профилем будут обкатывать эвольвентные профили зубьев конического колеса.

Конические колеса нарезаются по принципу зацепления конического колеса с производящим колесом. На рис. 2 изображена схема нарезания конического колеса на станке по методу обкатки. Вокруг оси  $00_2$  поворачивается попеременно то в одну, то в другую сторону (качается) барабан 4, называемый люлькой, а вокруг оси  $00_1$  также в обе стороны вращается нарезаемое коническое колесо 2.

Если на барабане закрепить плоское производящее колесо 1 и ввести с ним в зацепление коническое колесо 2, то зубья их при зацеплении будут обкатываться, как описано выше. Но так как коническое колесо еще не имеет зубьев, это только заготовка, в которой их необходимо нарезать, то и плоского колеса на люльке не имеется, оно подразумевается для объяснения зацепления, а его роль выполняют люлька и резцы 5 с такими же профилями, как и зубья плоского колеса. Резцы устанавливаются на торцевой плоскости люльки и поворачиваются

вместе с ней вокруг ее оси так, как вращалось бы плоское колесо, и одновременно возвратно-поступательно перемещаются по торцу люльки от ее наружного диаметра к центру и обратно. Таким образом, два резца как бы образуют профиль впадины двух зубьев плоского колеса. При поступательном движении они прорезают зубья конического колеса, а одновременное вращение их вокруг оси люльки выполняет обкатку зубьев, и резцы с прямолинейными профилями формируют эвольвентные профили нарезаемых зубьев.

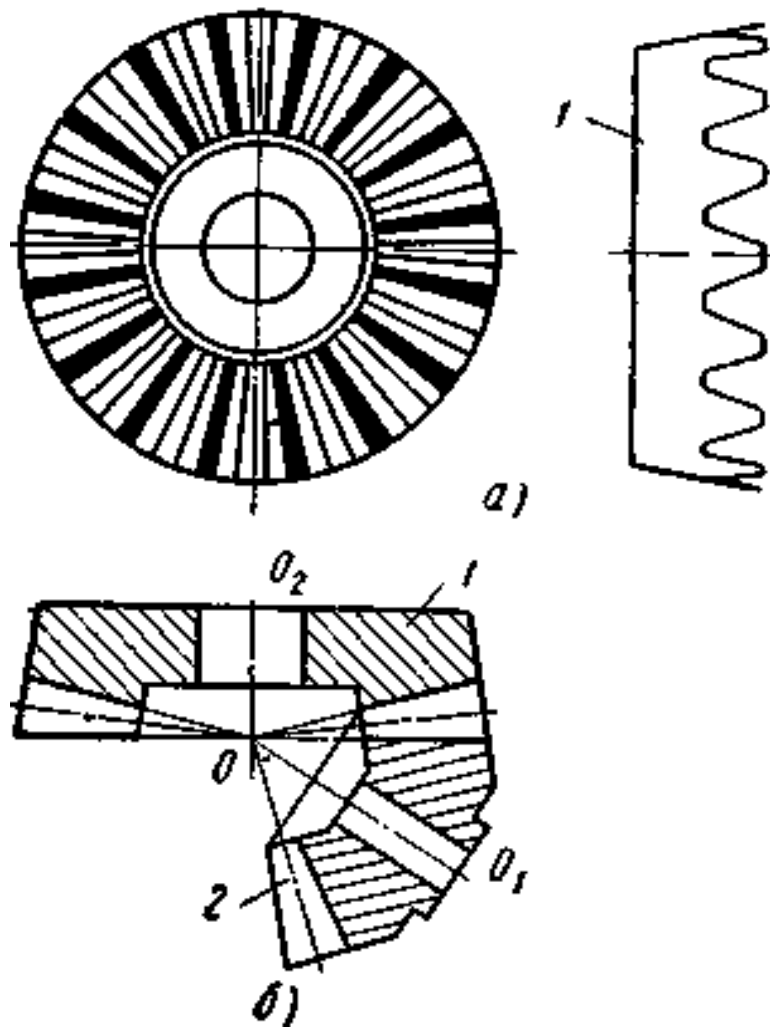


Рис. 2.1. Зацепление плоского колеса с коническим колесом

Для осуществления обкатки вращение люльки согласовывается с вращением заготовки и происходит так же, как происходило бы вращение производящего колеса в зацеплении с нарезаемым колесом. Такая согласованность вращения достигается при помощи механизма станка со сменными колесами 3, которые рассчитываются в зависимости от числа зубьев нарезаемых колес.

Последовательное положение резцов относительно зубьев заготовки при обкатке изображено на рис. 2.3. Заготовка вращается против часовой стрелки (если смотреть со стороны большого торца), а люлька соответственно вращению заготовки, как сопрягаемое колесо, вращается против часовой стрелки (если смотреть на ее переднюю плоскость со стороны заготовки) и резцы перемещаются относительно оси заготовки снизу вверх, как указано стрелками, пока не выйдут из зацепления. Когда люлька начнет вращаться в другую сторону (по часовой стрелке), то и заготовка станет вращаться в другую сторону, и резцы будут перемещаться сверху вниз.

Для нарезания зубьев на всю высоту резцы должны врезаться в заготовку на глубину впадины, пока вершины их не станут двигаться по образующей внутреннего конуса нарезаемого колеса.

Возвратно-поступательное движение резцов, в результате которого осуществляется резание, – это главное движение; вращение люльки и заготовки – это движение обкатки. Кроме того, станок должен иметь еще два движения, обеспечивающие перемещение заготовки к резцам и отвод их назад, и периодический поворот заготовки для нарезания следующего зуба, такой поворот называется делением.

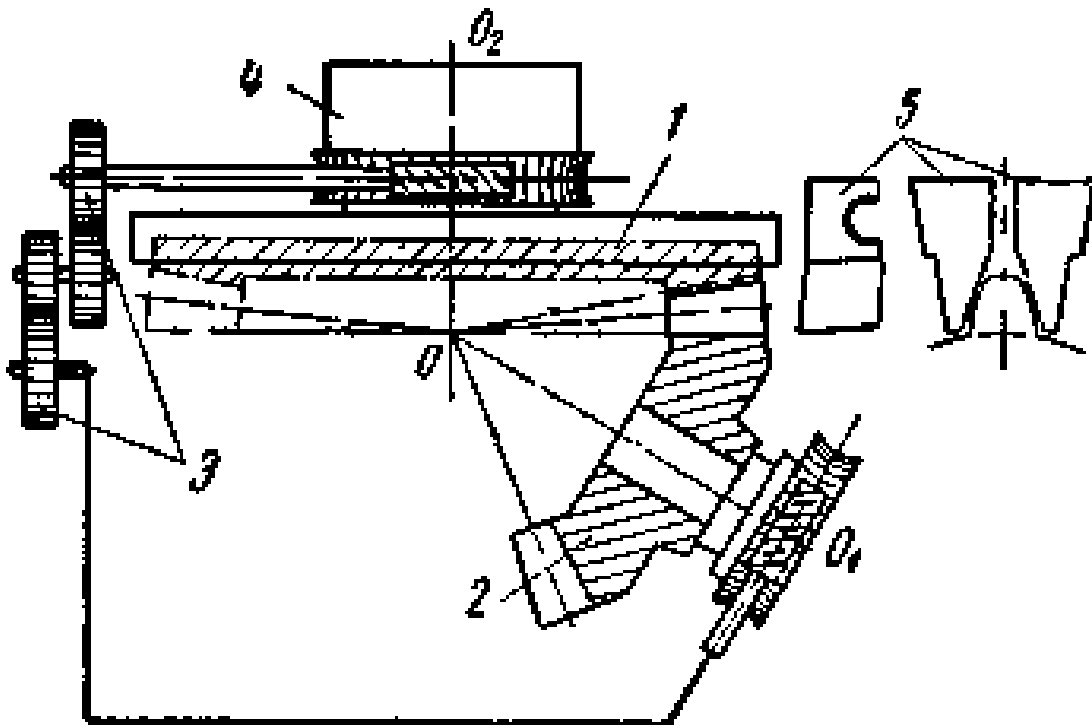


Рис. 2.2. Принципиальная схема нарезания конических прямозубых колес на станке по методу обкатки



Правильное нарезание зубьев колеса определяется установкой заготовки относительно центра станка  $O$ . Центром станка называется точка, в которой пересекается три оси (см. рис. 2.2): горизонтальная ось  $OO_2$  люльки; горизонтальная ось  $OO_1$  шпинделя бабки изделия и вертикальная ось  $O$ , вокруг которой поворачивается поворотный стол вместе с заготовкой. При перемещении вертикальной оси  $O$  вдоль станка центр станка перемещается вдоль горизонтальной оси. С центром станка должна совпадать вершина начального конуса заготовки и через него проходит плоскость, в которой движутся резцы.

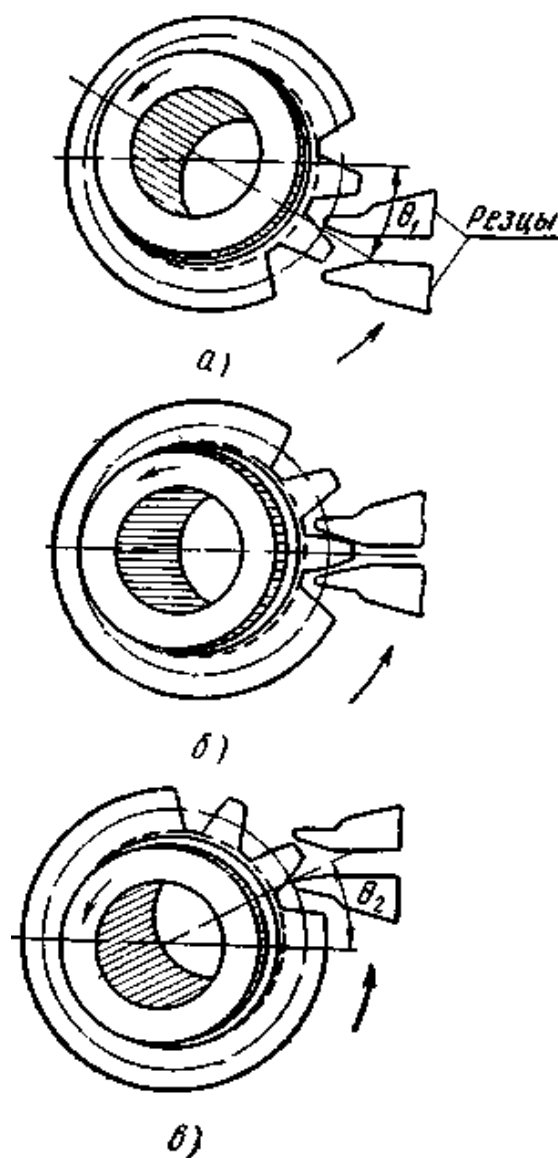


Рис. 2.3. Последовательное положение резцов относительно зубьев нарезаемого колеса при нарезании методом обкатки (а – ниже центра, б – по центру, в – выше центра станка)

### 3. ЗУБОСТРОГАЛЬНЫЙ СТАНОК МОД. 526

#### 3.1. Устройство станка

Зубострогальный станок модели 526 (рис. 3.1) предназначен для чернового и чистового нарезания прямозубых конических колес.

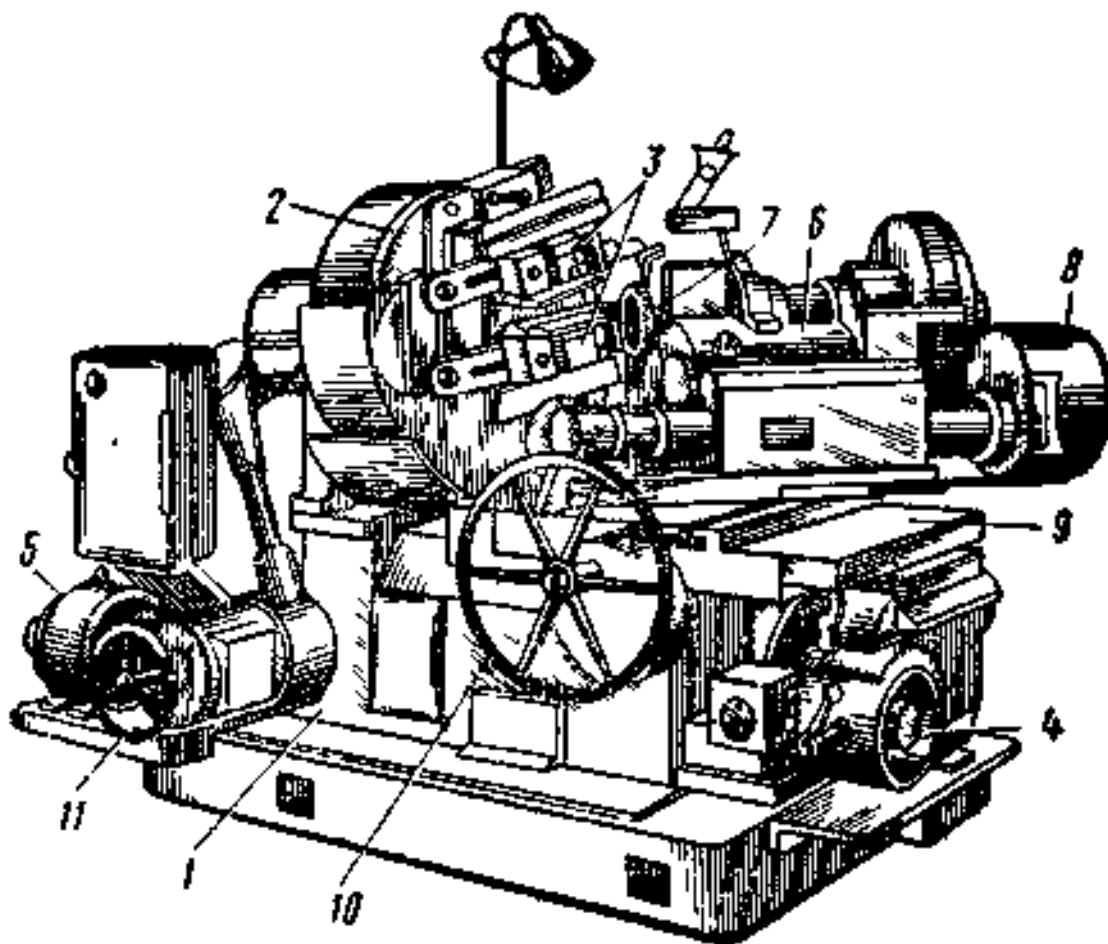


Рис. 3.1. Зубострогальный станок мод. 526

На станине 1 слева находится корпус, в котором вращается люлька 2. На передней плоскости люльки смонтированы поворотные сегменты, направляющие которых устанавливаются на угол движения резцов. По направляющим сегментов движутся ползуны с резцовыми суппортами 3. Справа на станине установлен продольный стол 9, перемещающийся по направляющим станины к люльке и обратно посредством маховика 10. На этом столе установлена бабка 6 для крепления заготовки, которая может перемещаться по верхним направляющим стола и устанавливаться на необходимое расстояние от центра станка. Бабка имеет шпиндель с коническим гнездом, в котором крепится оправка с заготовкой 7, а также гитару деления 8. У правого торца станины находится барабан

подач 4. Электродвигатель станка 5 расположен в нижней части станины и приводится в движение пусковым выключателем. Поворачивание механизма станка вручную осуществляется маховичком 11.

Смазка станка централизованная от электронасоса, расположенного в нижней части станины; здесь же находится электронасос для подачи охлаждающей жидкости к резцам.

Подробно остановимся на устройстве одного из суппортов (рис. 3.2). Основная плита 1 суппорта крепится болтами 6 к ползуну 11. В плите установлена откидная державка 2, правый конец которой закреплен на оси, а левый посредством рычага 13 связан с бруском 14. Брусок при движении ползунув перемещается относительно их и качает рычажок 13, который поворачивает откидную державку вокруг оси 3. При движении вперед, во время рабочего положения, державка с резцами выдвигается вперед от плоскости плиты и упирается в накладку 12 и в таком положении находится до тех пор, пока не закончится ход резцов вперед. При движении резцов назад, во время холостого хода, державка с резцами поворачивается в направлении к плите и отводит резцы от нарезаемых поверхностей зубьев.

К откидной державке двумя болтами 4 крепится резцедержатель 5, устанавливаемый по высоте посредством винта 10. К резцедержателю двумя винтами 7, ввинчиваемыми в резьбовые отверстия резца, притягивается резец 9. Отверстия для винтов в резцедержателе сделаны овальными, а резцы снабжены пятью резьбовыми отверстиями, что дает возможность переставлять резцы при износе и регулировать положение их вдоль резцедержателя. Плоскость резцедержателя, на которую устанавливается резец, наклонена под углом  $12^\circ$  к линии движения вершины резца при его работе. Резец опирается на клин 8; перемещением клина можно изменять угол зацепления нарезаемого колеса.

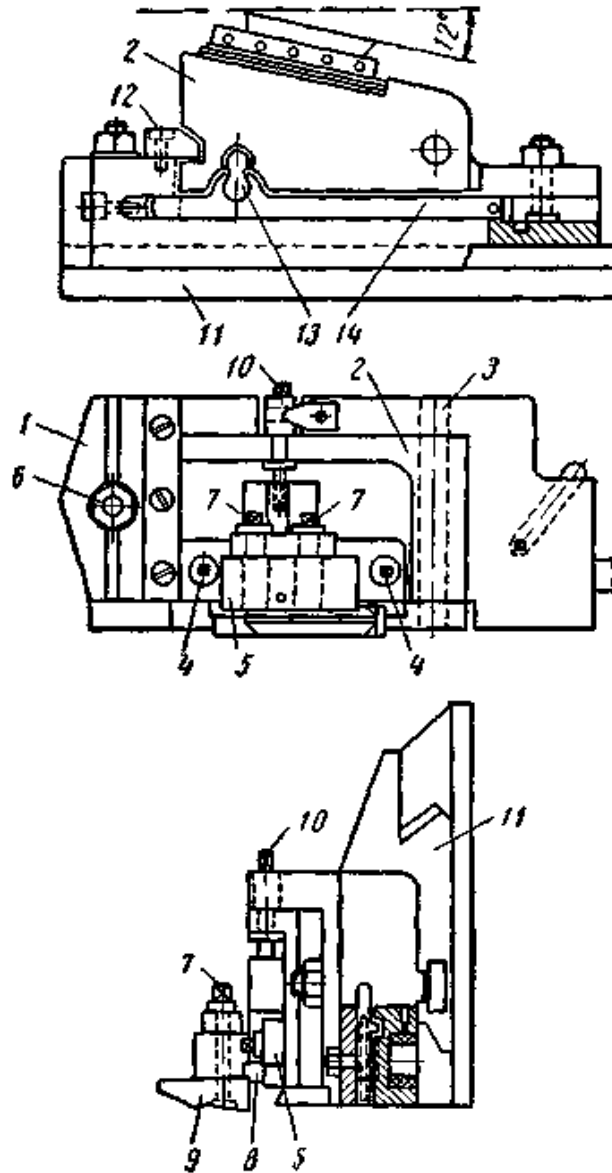


Рис. 3.2. Резцовый суппорт

### 3.2. Работа на станке

Заготовка устанавливается на оправку или во втулку, вставленную в шпиндель, затягивается сзади затяжным болтом или прижимается к торцу оправки при помощи гайки и подводится к резцам вручную. Пуск станка после установки заготовки и включения станка в электросеть производится нажатием пусковой кнопки. Останавливается станок после нарезания колеса автоматически конечным выключателем, расположенным сзади шпинделя бабки.

На станке выполняется черновая прорезка зубьев и чистовая обработка их. Черновая прорезка происходит без обкатки, люлька и заготовка при резании не вращаются, только движутся возвратно-

поступательно резцы, а заготовка постепенно подается к резцам на необходимую глубину прорезания впадин. За один цикл при черновом нарезании выполняются следующие движения: 1) подвод стола в рабочее положение; 2) постепенная подача стола с бабкой и закрепленной в ней заготовкой до прорезания необходимой глубины впадины; 3) быстрый отвод стола; 4) поворот заготовки на следующий зуб – деление. Черновое нарезание за один цикл может осуществляться двумя способами: при первом способе две впадины нарезаются одновременно каждая одним из двух резцов с делением через два зуба; при втором способе каждая впадина нарезается одним и вторым резцом с делением через один зуб.

Чистовое нарезание производится после черного при новой установке заготовки и новой наладке станка. Рабочий цикл состоит из следующих движений: 1) подвода стола с бабкой и закрепленной в ней заготовки в рабочее положение, когда резцы заходят во впадину почти на всю глубину; 2) рабочей обкатки (первый проход), когда люлька вращается по часовой стрелке и резцы обкатывают зуб сверху вниз; 3) дополнительного подвода стола на 0,5–0,8 мм на глубину резания при втором проходе; 4) рабочей обкатки (второй проход), когда люлька вращается против часовой стрелки и резцы обкатывают зуб снизу вверх; 5) быстрого отвода стола и 6) поворота заготовки на следующий зуб – деление.

При работе на станке, наладке и уходе за ним, кроме общих правил техники безопасности, необходимо соблюдать также и ряд других предосторожностей, а именно: наладка и проверка всех узлов станка должны выполняться при выключенном электродвигателе общим выключателем, а не кнопкой. При установке резцедержателей, резцов, регулировке их, установке длины хода ползунов, роликов барабана подачи, люльки на угол качания, сменных колес и при перемещении каких-либо узлов станка, когда требуется вращать его механизм, выполняется эта операция вручную при помощи маховичка. После наладки и регулирования устанавливаемых узлов надо повернуть станок вручную и, только убедившись, что все части перемещаются нормально, можно включать станок от электродвигателя. При проверке правильности набора сменных колес гитар деления и обкатки, делении припуска по резцам, т. е. во всех случаях, когда приходится близко наклоняться к движущимся резцам и к заготовке, надо быть осторожным и помнить об опасности захвата движущимися частями.

### 3.3. Кинематическая схема станка

Кинематическая схема станка приведена на рис. 6. Электродвигатель Э с числом оборотов 1420 об/мин приводит в движение механизм станка, которое по кинематическим цепям передается к отдельным частям его (ползунам с резцами, заготовке, люльке, барабану подачи). Связь движений осуществляется по следующим кинематическим цепям, выделяемым из общей кинематической схемы.

I. Движение ползунов – электродвигатель – ползуны  $E_1, E_2$ .

II. Подача (вращение барабана  $A$ ).

III. Качание люльки – вал  $VII$  – люлька.

IV. Обкатка – люлька – заготовка.

V. Деление – вал  $XV$  – заготовка.

Рассмотрим подробно каждую кинематическую цепь:

Цепь I. *Возвратно-поступательное движение ползунов.* От электродвигателя движение передается через коническую передачу 15:43 валу  $I$ . На этом валу насажен маховичок для ручного вращения, соединяющийся с валом при помощи односторонней муфты, которая включается только при вращении в одном направлении и автоматически выключается при включении электродвигателя. Дальше движение передается по цепи, согласно структурной схеме, сменным зубчатым колесам  $X_0$ , от которых через коническую передачу 19:43 получает вращение центральный вал  $V$  люльки с кривошипным диском  $D$ .

В радиальном пазу этого диска помещен кривошипный палец, соединенный с шатуном  $L$ . Шатун соединен с серьгой  $C$ , закрепленной на валике. Валик имеет на другом конце диск  $d$  с двумя сухарями и может качаться вокруг своей оси, сухари соединены с ползунами  $E_1$  и  $E_2$ , которые при качании диска  $d$  получают возвратно-поступательное перемещение по направляющим сегментов люльки.

Для изменения длины хода ползунов переставляется кривошипный палец в диаметральный пазу диска  $D$ , вследствие чего изменяется радиус вращения этого пальца вокруг вала  $V$ , изменяется угол поворота диска  $d$  и изменяется ход ползунов.

Цепь II. *Подача (вращение барабана  $A$  подачи).* Величина подачи определяется временем  $t$  одного оборота барабана. Вращение барабану передается от вала  $I$  через сменные колеса гитары подачи  $X_{II}$  по кинематической цепи, согласно структурной схеме, к червячной паре 4:68, колесо которой скреплено с барабаном и вращает его. Один оборот барабана подачи соответствует одному циклу, т. е. за один оборот барабана

обрабатывается один зуб. Барабан имеет две канавки (рис. 3.4): *I*, расположенная ближе к торцу барабана, для подачи при черновом нарезании зубьев и *II* для подачи при чистовой обработке. В каждую канавку поочередно, в зависимости от вида обработки, может заходить один из двух роликов 1 или 2. Ролики между собой заблокированы: при опускании одного второй поднимается. При вращении барабана его криволинейная канавка перемещает ролик, который поворачивает вокруг оси 00 рычаг 3, соединенный с продольным столом рукояткой 7; при повороте рычага стол получает продольный ход. Величина хода стола устанавливается перемещением гайки 5 при помощи винта 4. Если гайку передвинуть ближе к оси 00, величина хода стола уменьшится; при перемещении гайки в обратном направлении – увеличится. Канавки в барабане выполнены по кривым, по ним перемещаются ролики. Канавка *I* для черновой прорезки зубьев перемещает стол постепенно, пока резцы не прорежут впадины между зубьями на всю глубину, после чего стол быстро отводится назад. Канавка *II* для чистовой обработки имеет другую форму и производит быструю подачу стола к резцам, но не на полную глубину. При неподвижном столе происходит обкатывание зубьев сверху вниз (люлька вращается по часовой стрелке), когда люлька придет в нижнее положение, барабан быстро подает стол еще на 0,5–0,8 мм до упора. Направление вращения люльки и заготовки изменяется реверсивным механизмом, и резцы обкатывают зубья снизу вверх. Стол во время обкатывания опять стоит неподвижно, при этом происходит окончательная зачистка зубьев. После окончания обработки барабан быстро отводит стол в исходное положение.

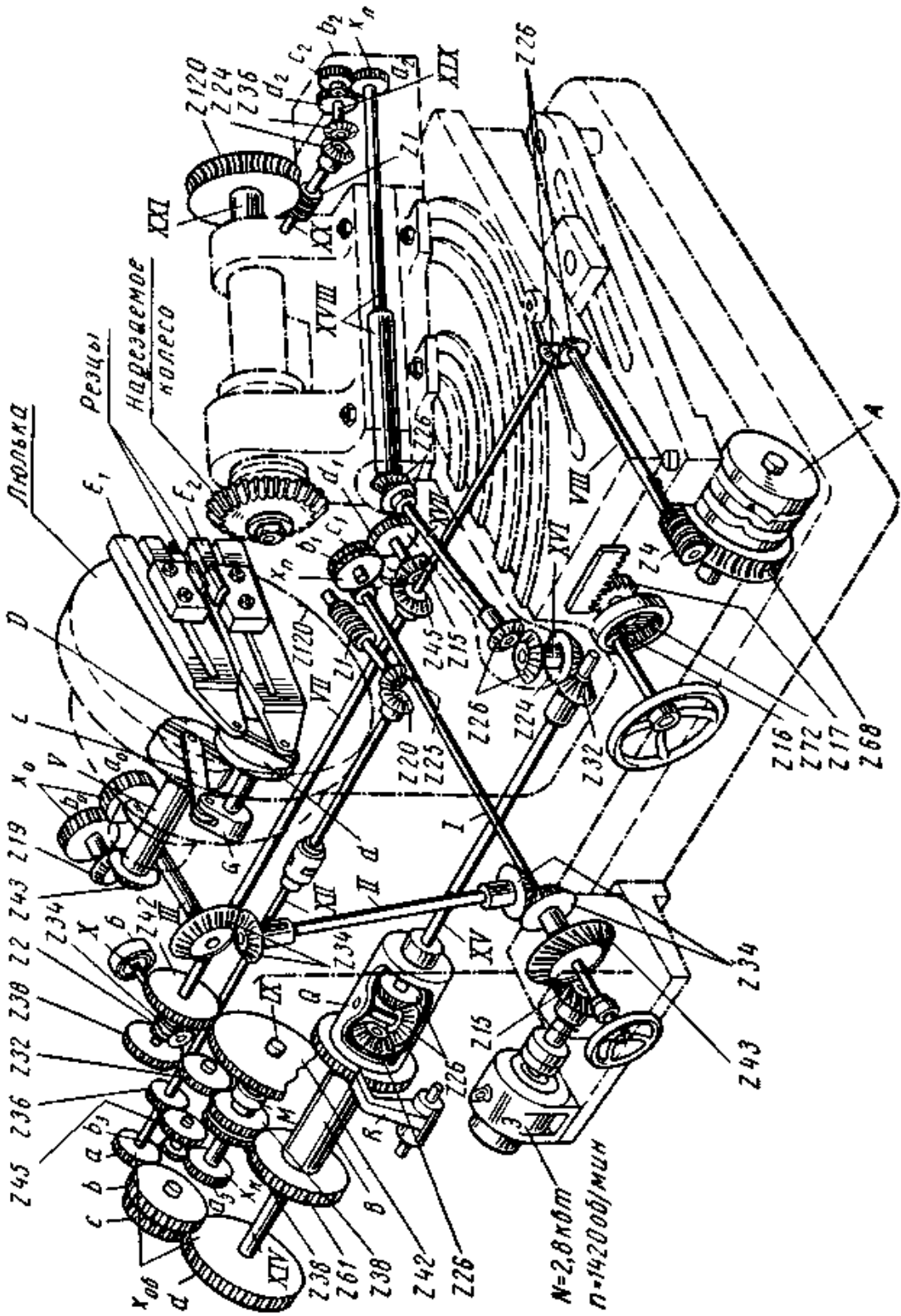


Рис. 3.3. Кинематическая схема зубострогального станка мод. 526



При необходимости отвода стола 6 с бабкой дальше от резцов (при смене заготовки, измерении зуба и т. п.) рукоятка 7 освобождает от закрепления стол, и он передвигается маховичком. Маховичок посредством зубчатого колеса 16 (см. рис. 3.3) вращает колесо 72 с внутренними зубьями, закрепленное на валике, на другом конце которого насажено колесо 17, зацепляющееся с рейкой, прикрепленной к столу. При вращении маховичка стол перемещается независимо от барабана подачи.

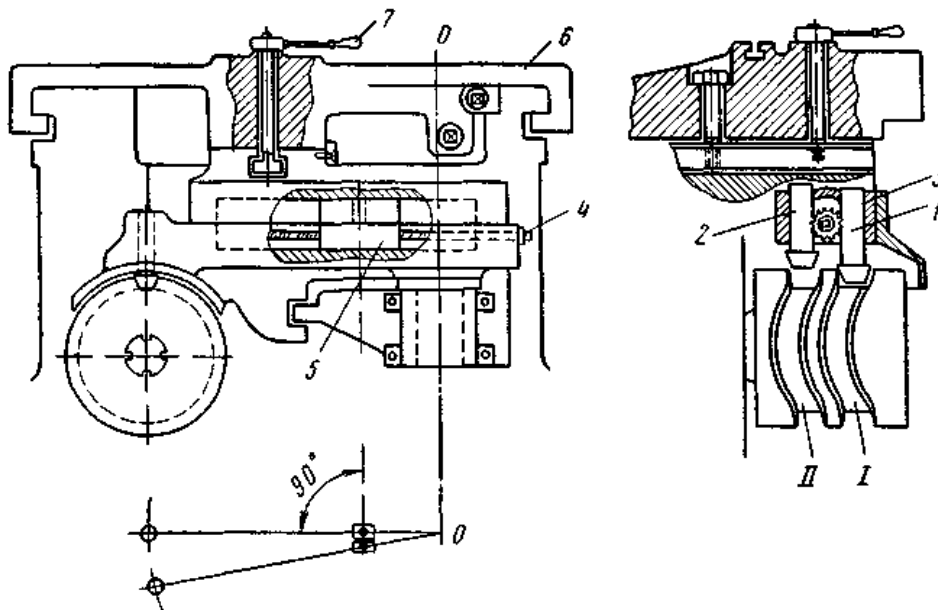


Рис. 3.4. Механизм подачи продольного стола

Цепь III. Качание люльки – вал VII – люлька. Движение люльке передается от вала VII, входящего в цепь вращения барабана A подачи. На левом конце этого вала закреплены два зубчатых колеса 42 и 38, передающие вращение таким же колесам 42 и 38, насаженным свободно на валу IX, причем колеса 42:42 находятся в непосредственном зацеплении, а 38:38 – через паразитное 32. Вследствие этого колеса 42 и 38 на валу IX вращаются в разные стороны. Между колесами 42 и 38 на валу IX насажена реверсивная муфта M, которая переключается при помощи кулачкового барабана B, получающего вращение от вала VII через червячную передачу 2:34 и валик X (на кинематической схеме связь кулачкового барабана с муфтой M не показана). Кулачковый барабан B делает один оборот за один оборот барабана подачи A, т.е. за один цикл B в течение первой половины оборота кулачкового барабана муфта M включает зубчатые колеса 42:42, а в течение второй половины зубчатые колеса 38:38, при этом вал IX вращается то в одну, то в другую сторону. От вала IX вращение передается через сменные колеса качания  $X_K$  и

передачу 45:36 вала *XII* и дальше через коническую зубчатую пару 20:25 червяку 1, находящемся в зацеплении с сегментом 120, закрепленным на барабане люльки, которая получает вращение то в одну, то в другую сторону.

Цепь IV. *Обкатка – люлька – заготовка*. Цепь обкатки связывает вращение люльки с вращением шпинделя бабки с закрепленной в ней заготовкой. От люльки через вал *XII*, сообщающий качание люльке, движение передается через сменные колеса обкатки  $X_{об}$  вала *XIV*. Этот вал соединен с валом *XV* дифференциала с передаточным отношением  $i_r = 1:1$ . Дальше от вала *XV* движение сообщается, согласно структурной схеме, через сменные колеса гитары деления  $X_l$  шпинделю бабки. Коническое зубчатое колесо 32 насажено на вал *XV* на длинных шлицах и при перемещении продольного стола передвигается по этому валу, не нарушая зацепления. Ось вала *XVI* совпадает с осью поворотного стола и при перемещении продольного стола вместе с поворотным в конечное положение к люльке определяет центр  $O$  станка. Вал *XVIII* раздвижной, что позволяет перемещать бабку по направляющим поворотного стола, не нарушая зацепления передач.

Цепь V. *Деление*. Делительный механизм получает движение от зубчатого колеса 38, скрепленного с другим колесом 38, сидящим на валу *IX*. Эти колеса постоянно вращаются в одну сторону. Колесо 38 сцепляется с колесом 61, свободно вращающимся на втулке *B* корпуса  $Q$  дифференциала, который запирается рычагом *R* и во время работы резцов не вращается.

В соответствующий момент, когда заготовка отодвигается от резцов, делительный механизм (на кинематической схеме не показан) отводит рычаг *R* и корпус дифференциала может вращаться. Одновременно с этим зубчатое колесо 61 сцепляется с втулкой *B* корпуса. Делительный механизм осуществляет вращение корпуса дифференциала на один оборот, после чего втулка *B* корпуса выходит из зацепления с колесом 61, а рычаг *R* вновь запирает корпус. Так как передаточное отношение дифференциала при этой передаче  $i_r = 2$ , то вал *XV* получает за один оборот корпуса дифференциала два оборота в дополнение к основному вращению. Это дополнительное вращение передается дальше от вала *XV* по кинематической цепи, согласно структурной схеме, через гитару деления  $X_l$  шпинделю бабки с заготовкой.

Два дополнительных оборота вала должны соответствовать повороту заготовки на один зуб. Для обеспечения такого соответствия рассчитываются сменные колеса гитары деления  $X_l$ .

## 4. НАСТРОЙКА ЗУБОСТРОГАЛЬНОГО СТАНКА МОД. 526 ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ КОНИЧЕСКИХ КОЛЕС

### 4.1. Расчеты при наладке

#### 4.1.1. Расчет числа двойных ходов

Число двойных ходов зависит от длины хода резцов и величины скорости резания  $V_{рез}$  (м/мин). Величина скорости резания выбирается в зависимости от вида обработки (черновое или чистовое нарезание), от материала заготовки и материала резца. Рекомендуемые скорости резания приводятся в табл. 4.1. Требуемое число двойных ходов резцов в минуту ( $n$ ) подсчитывается по формуле

$$n = \frac{1000 \cdot V_{рез}}{2 \cdot (b + 7)}, \quad (4.1)$$

где  $V_{рез}$  – рекомендуемая средняя величина скорости резания, м/мин;  
 $b$  – длина нарезаемого зуба, мм; 7 – длина перебега резцов в обе стороны при входе и выходе, мм.

Таблица 4.1

#### Рекомендуемые скорости резания

Вид обработки	Обрабатываемый материал			
	Стали 20Х и 12ХНЗА (твердость до НВ 215)	Сталь 40Х (тв. до НВ 180)	Сталь 45 (тв. до НВ 150)	Чугун
	Скорости резания $V_{рез}$ (м/мин)			
Черновая	14	18	20	20
Чистовая	16	20	22	22
Материалы резцов: черновых – сталь Р9, чистовых – сталь Р18.				

Настройка числа двойных ходов резцов осуществляется путем подбора сменных зубчатых колес  $a_0$  и  $b_0$  (см. рис. 2.1) в гитару скорости резания. Числа зубьев сменных колес определяются по формуле

$$\left\{ \begin{array}{l} X_0 = \frac{a_0}{b_0} = \frac{n}{220}, \\ a_0 + b_0 = 72. \end{array} \right. \quad (4.2)$$

Используя прилагаемый к станку набор сменных колес, можно настраивать 15 чисел двойных ходов резцов в минуту, указанных в табл. 4.2. По найденному числу двойных ходов  $n$  по табл. 4.2 определяют ближайшее к нему настраиваемое на станке число двойных ходов и соответствующие числа зубьев сменных колес  $a_0$  и  $b_0$ .

Расположение сменных зубчатых колес  $a_0$  и  $b_0$  в гитаре скорости резания показано в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Расположение сменных зубчатых колес  $a_0$  и  $b_0$  в гитаре скоростей

Число двойных ходов в минуту	Число зубьев сменных колёс		Число двойных ходов в минуту	Число зубьев сменных колес	
	$a_0$	$b_0$		$a_0$	$b_0$
85	20	52	221	36	36
97	22	50	247	38	34
110	24	48	276	40	32
125	26	46	309	42	30
141	28	44	347	44	28
158	30	42	391	46	26
177	32	40	442	48	24
198	34	38			

Примечание: указанные в таблице сменные колеса применяются также для настройки гитары величины угла обката

#### 4.1.2. Расчет сменных зубчатых колес гитары подач

Подачей на зубострогальном станке называется длина дуги, на которую поворачивается резцовая головка за один двойной ход резца. Величина подачи при зубострогании определяется временем  $t$  (с) одного рабочего цикла, т. е. временем одного оборота барабана А (см. рис. 2.1, 2.2). Время цикла выбирается в зависимости от материала заготовки, числа двойных ходов, величины модуля и вида обработки (черновое нарезание при двойном или одинарном делении, чистовое нарезание). Для выполнения цикла в течение назначенного времени рассчитываются сменные колеса гитары подач ( $X_{II}$ ). Число оборотов барабана А ( $n_6$ )

зависит от числа оборотов электродвигателя ( $n_3$ ). Отношение этих чисел оборотов по кинематической цепи II цепь подачи станка настраивается путем подбора сменных колес  $a_2, b_2, c_2, d_2$  (см. рис. 3.2) гитары подач в зависимости от времени выбранного цикла:

$$\frac{n_6}{n_3} = \frac{15}{43} \cdot X_{II} \cdot \frac{15}{45} \cdot \frac{26}{26} \cdot \frac{4}{68},$$

$$n_6 = n_3 \cdot \frac{5}{731} \cdot X_{II}.$$

За один цикл  $n_6 = 1$ , а число оборотов электродвигателя, соответствующее одному циклу за время  $t$  (с), будет составлять:

$$n_3 = \frac{1420}{60} \cdot t = 23,667 \cdot t.$$

Подставив эти значения, получим:

$$n_6 = \frac{23,667 \cdot t \cdot 5}{731} \cdot X_{II}.$$

Из уравнения находим передаточное отношение сменных колес гитары подачи:

$$X_{II} = \frac{a_1 \cdot c_1}{b_1 \cdot d_1} = \frac{6,2}{t}. \quad (4.3)$$

Условия сцепляемости зубчатых колес гитары подач:

$$\begin{cases} a_1 + b_1 = 100, \\ c_1 + d_1 = 84 \div 109. \end{cases} \quad (4.4)$$

Время цикла определяется в зависимости от материала заготовки длины и модуля обрабатываемого зуба по табл. 1 из Приложения 1.

Продолжительность циклов, на которые можно наладить станок, и требуемые для этого числа зубьев сменных колес приведены в табл. 4.3.

Расположение сменных колёс гитары подач

Время нарезания одного зуба, $t$ (с)	Число зубьев сменных колес				Время нарезания одного зуба, $t$ (с)	Число зубьев сменных колес			
	$a_1$	$b_1$	$c_1$	$d_1$		$a_1$	$b_1$	$c_1$	$d_1$
86,5	21	79	22	83	23,7	42	58	25	70
76	21	79	25	83	19,7	42	58	30	70
60,5	21	79	30	83	16	42	58	37	70
53,6	30	70	21	79	13,2	58	42	21	63
45	30	70	25	79	11,3	58	42	25	63
39,2	37	63	21	79	9,3	58	42	30	63
32,9	37	63	25	79	7,6	58	42	37	63
27,4	37	63	30	79					

### 4.1.3. Расчет сменных зубчатых колес гитары деления

Сменные зубчатые колеса гитары деления рассчитывают, исходя из условия поворота заготовки при отходе от резцов на один зуб.

При рассмотрении передачи движения по цепи  $V$  было отмечено, что вал  $XV$  делает два дополнительных оборота, т. е.  $n_B = 2$ , а заготовка поворачивается на один зуб и число оборотов ее:

$$n_3 = \frac{1}{z}$$

Отношение чисел оборотов заготовки и вала по кинематической цепи  $V$  будет составлять:

$$\frac{n_3}{n_B} = \frac{32}{24} \cdot \frac{26}{26} \cdot \frac{26}{26} \cdot X_{Л} \cdot \frac{36}{24} \cdot \frac{1}{120},$$

$$\frac{n_3}{n_B} = \frac{X_{Л}}{60}.$$

Подставив значения  $n_3$  и  $n_B$ , получим:

$$\frac{1}{2 \cdot z} = \frac{X_{Л}}{60},$$

тогда формула расчета сменных колес гитары деления будет иметь такой вид:

$$X_{Л} = \frac{a_2 \cdot c_2}{b_2 \cdot d_2} = \frac{30}{z_{изд}}. \quad (4.5)$$

Сменные колеса деления должны рассчитываться точно без округлений полученного передаточного отношения и выбираться из числа имеющихся в наборе при станке. Для настройки гитар механизмов деления и обката (профилирования) к станку прилагается набор из 59 сменных колес со следующими числами зубьев:

30	31	32	33	34	35	36
37	38	39	40	41	42	43
44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57
58	59	60	61	62	63	64
65	66	67	68	69	70	71
72	73	74	75	76	77	78
79	80	82	83	86	89	90
97	100					

В условиях производства сменные колеса гитары деления обычно не рассчитывают по приведенным формулам, а подбирают по специальной табл. 2 из Приложения 1.

#### 4.1.4. Расчет сменных зубчатых колес гитары обкатки

Вращение люльки и заготовки должно быть согласованным, как при зацеплении нарезаемого колеса с производящим. Исходя из этого условия и рассчитываются сменные колеса гитары обкатки. Передаточное отношение чисел оборотов заготовки и производящего колеса составляет:

$$\frac{n_3}{n_{Л}} = \frac{z_c}{z},$$

где  $z_c$  – число зубьев производящего колеса;

$z$  – число зубьев нарезаемого колеса.

Числом зубьев  $z_c$  производящего колеса называется фиктивное число зубьев, дающее необходимое отношение между числами оборотов заготовки и люльки при нарезании колеса с числом зубьев  $z$ . Число зубьев производящего колеса одно и то же для обоих сопрягаемых колес конической передачи и определяется по формуле

$$z_c = \frac{z_1}{\sin \varphi_1} = \frac{z_2}{\sin \varphi_2},$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – углы делительных конусов колес передачи.

Для колес, оси которых пересекаются под прямым углом (ортогональные передачи), число зубьев производящего колеса для одного и другого нарезаемого колеса передачи находят по формуле

$$z_c = \sqrt{z_1^2 + z_2^2}.$$

Отношение чисел оборотов шпинделя бабки и люльки по кинематической цепи  $IV$  равно:

$$\frac{n_3}{n_{Л}} = \frac{120}{1} \cdot \frac{25}{20} \cdot X_{об} i_r \cdot \frac{32}{24} \cdot \frac{26}{26} \cdot \frac{26}{26} \cdot X_{Л} \cdot \frac{36}{24} \cdot \frac{1}{120},$$

$$\frac{n_3}{n_{Л}} = \frac{5}{2} \cdot X_{об} i_r X_{Л}.$$

Передаточное отношение дифференциала  $i_r = 1$ , так как корпус его во время обкатки не вращается; передаточное отношение гитары деления:



$$X_{Л} = \frac{30}{z}.$$

Подставив эти значения, получим:

$$\frac{n_3}{n_{Л}} = \frac{75 \cdot X_{об}}{z}.$$

Сравнивая отношения чисел оборотов, выраженные по двум зависимостям, получим:

$$\frac{z_c}{z} = \frac{75 \cdot X_{об}}{z}.$$

Откуда

$$X_{об} = \frac{z_c}{75},$$

Заменив значение  $z_c$ , получим формулу расчета сменных колес гитары обкатки:

$$X_{об} = \frac{z_c}{75 \cdot \sin \varphi},$$

а для колес передачи с осями, пересекающимися под прямым углом:

$$X_{об} = \frac{a \cdot c}{b \cdot d} = \frac{\sqrt{z_1^2 + z_2^2}}{75}. \quad (4.6)$$

Вычисленное передаточное отношение сменных колес почти всегда выражается числом, не разлагающимся на простые множители, и его заменяют другим числом, совпадающим с вычисленным до четвертого или пятого десятичного знака, которое можно выразить простой дробью. Числитель и знаменатель этой дроби должны разлагаться на

множители, из которых можно составить числа зубьев сменных колес, имеющих в наборе станка.

#### 4.1.5. Расчет сменных зубчатых колес гитары для получения угла качания люльки

Для обкатки резцами одного зуба люлька должна повернуться на полный угол качания  $\theta^\circ$ . Этот угол состоит из суммы двух углов:  $\theta_1$  – угла качания ниже нулевого деления шкалы установки люльки, когда резцы находятся ниже горизонтальной плоскости, проходящей через центр люльки (см. рис. 2.3, а);  $\theta_2$  – угла качания выше нулевого деления, когда резцы находятся выше этой плоскости (см. рис. 2.3, в). Угол качания ниже нуля при угле зацепления  $\alpha_0 = 20^\circ$  находят по формуле

$$\theta_1 = \left( \frac{355,3 \cdot K + 90}{z} - 0,8 \right) \sin \varphi, \quad (4.7)$$

при угле зацепления  $\alpha_0 = 15^\circ$  или  $\alpha_0 = 16^\circ$ :

$$\theta_1 = \left( \frac{458,2 \cdot K + 90}{z} - 0,4 \right) \sin \varphi, \quad (4.8)$$

где  $K = \frac{h''}{m}$ ;  $h''$  – высота ножки;  $m$  – модуль;  $z$  – число зубьев;  $\varphi$  – угол делительного конуса.

Полный угол качания в зависимости от угла  $\theta_1$  вычисляется по формуле

$$\theta^0 = 2,888 \cdot \theta_1. \quad (4.9)$$

По вычисленному полному углу  $\theta^0$  можно рассчитать передаточное отношение сменных колес:

$$X_K = \frac{a_3}{b_3} = \frac{\theta^0}{23} \quad (4.10)$$

и подобрать их из имеющихся в наборе станка.

В табл. 4.4 приведены величины углов качания:  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  и  $\theta^0$ , а также указаны сменные колеса, соответствующие этим углам.

Таблица 4.4

Расположение сменных зубчатых колёс  
для получения угла качания люльки

Угол качания люльки, град			Число зубьев сменных колес		Угол качания люльки, град			Число зубьев сменных колес	
$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta^0$	$a_3$	$b_3$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta^0$	$a_3$	$b_3$
3°30'	6°36'	10°6'	22	50	9°	16°42'	25°42'	38	34
4°	7°30'	11°30'	24	48	10°6'	18°42'	28°48'	40	32
4°36'	8°24'	13°30'	26	46	11°18'	20°54'	32°12'	42	30
5°24'	9°30'	14°36'	28	44	12°42'	23°30'	36°12'	44	28

Продолжение табл. 4.4

5°48'	10°36'	16°24'		30	42	14°18'	26°24'	40°42'	46	26
6°30'	11°54'	18°24'		32	40	16°12'	29°48'	46°	48	24
7°12'	13°24'	20°36'		34	38	18°24'	33°54'	52°18'	50	22
8°6'	14°54'	23°		36	36	21°12'	39°42'	59°48'	52	20

#### 4.1.6. Расчет угла установки поворотных сегментов люльки

В прямозубом коническом колесе зубья сужаются к малому торцу и становятся тоньше по всей их высоте, и все продольные образующие обеих сторон профиля сходятся в одной точке  $O$  – вершине начального конуса (см. рис. 4.1). В этой же точке сходятся и образующие  $OO_1$  внутреннего конуса, расположенные по сторонам профиля зубьев. Каждая из этих образующих составляет с линией симметрии толщины зуба угол  $\omega_M$ .

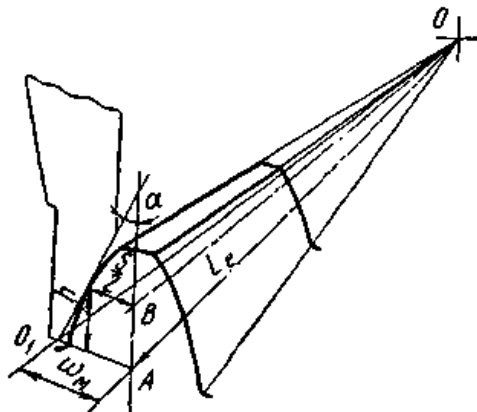


Рис. 4.1. Направление движения резцов при строгании зубьев

Вершина режущей кромки резца при нарезании зубьев должна двигаться по образующей внутреннего конуса (см. рис. 2.2), т. е. по прямой  $00_1$  под углом  $\omega_m$  (рис. 4.1) к линии симметрии зуба. Следовательно, поворотные сегменты люльки, направляющие движение ползунов с резцедержателями и резцами, должны останавливаться каждый под углом  $\omega_m$  к горизонтальной линии (к нулевой линии), пересекающей ось люльки под прямым углом.

Угол  $\omega_m$  определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \omega_m = \frac{O_1A}{L_e} = \frac{\frac{S}{2} + h \cdot \operatorname{tg} \alpha}{L_e},$$

угол  $\omega_m$  малый, поэтому  $\operatorname{tg} \omega_m$  можно заменить углом в радианах:

$$\omega_m = \frac{S + 2 \cdot h \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2L_e}, \quad (4.11)$$

а в градусах:

$$\omega_m = \frac{28,648(S + 2 \cdot h \cdot \operatorname{tg} \alpha_0)}{L_e}, \quad (4.12)$$

где  $\alpha_0$  – угол зацепления;

$h$  – высота ножки;

$L_e$  – длина образующей начального конуса от большого торца;

$S$  – толщина нарезаемого зуба ( $S = \frac{\pi \cdot m}{z}$ ).

При черновом нарезании методом двойного деления углы установки сегментов определяются по формуле

$$\sin \omega_m = \sin \varphi_i \sin \frac{180}{z},$$

где  $\varphi_i$  – угол внутреннего конуса колеса.

## **4.2. Наладка станка мод. 526**

### **4.2.1. Установка сменных зубчатых колес**

Сменные колеса передачи движения салазкам суппорта, а также гитар обкатки, деления и подачи устанавливаются на валах в порядке их буквенного обозначения в направлении передачи движения. Сменные колеса гитар деления и обкатки должны входить в зацепление без зазора, но со свободным вращением.

### **4.2.2. Установка барабана подач**

При черновом нарезании надо ввести ролик 1 в крайнюю от наружного торца канавку *I* барабана (см. рис. 3.4). При чистовом нарезании ролик 2 вводится в канавку *II*.

Для переключения ролика в соответствующую канавку станок поворачивается вручную маховичком и продольный стол отводится в крайнее от резцов положение. Затем отжимают винт, зажимающий ролики, и поворачивают валик реечного колеса, находящегося под барабаном, для переключения роликов. Вращение валика в ту или другую сторону выводит один ролик и вводит другой в нужную канавку, после этого зажимается винт, стопорящий ролики.

### **4.2.3. Установка бабки с заготовкой в осевом направлении**

Для совмещения вершины начального конуса нарезаемого колеса с центром станка бабку с заготовкой устанавливают на поворотном столе на определенное расстояние от центра станка. Расстояние от центра станка до торца шпинделя называется осевой установкой и обозначается буквой *K*. Это расстояние складывается из двух составляющих  $K=A+B$  (рис. 4.2). Величина *A* – монтажная дистанция обрабатываемого колеса, т. е. расстояние от вершины конуса до опорного торца колеса, которым оно упирается при сборке в механизме. Это расстояние указывается в чертеже колеса или в карте технологического процесса. *B* – расстояние между торцом оправки, в который упирается заготовка, и торцом, прилегающим к шпинделю. Это расстояние указывается в чертеже оправки или измеряется на оправке. Если нарезаемое колесо на

опорном торце имеет припуск под шлифование, то его надо прибавить к величине  $A$ .

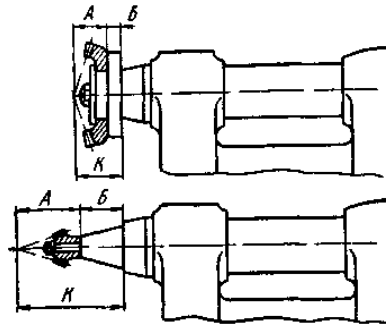


Рис. 4.2. Осевая установка заготовки

Для установки бабки на расстояние  $K$  надо отпустить болты, крепящие бабку к столу, и при помощи вращения шестигранника на корпусе бабки перемещать ее по направляющим поворотного стола. Перемещение отсчитывается по шкале и нониусу. Деление шкалы, указываемое нониусом, определяет расстояние от центра стола до торца шпинделя. После установки бабки необходимо вновь закрепить болты.

#### 4.2.4. Установка поворотного стола на угол внутреннего конуса нарезаемого колеса

При чистовом нарезании поворотный стол устанавливается на угол  $\varphi_i$  внутреннего конуса колеса. При черновом нарезании с делением на один зуб впадину рекомендуется прорезать немного глубже, чем глубина зуба (на величину  $\Delta h = 0,1-0,3$  мм), для облегчения работы чистовых резцов. С этой целью увеличивают угол  $\varphi_i$  установки стола на величину  $\Delta\varphi$  (мин):

$$\Delta\varphi = \frac{3440 \cdot \Delta h}{L_e}.$$

При черновом нарезании методом двойного деления каждый из двух резцов прорезает отдельную впадину, и поворотный стол устанавливается на угол  $\varphi_m$ , отличный от угла внутреннего конуса  $\varphi_i$ . Угол установки определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi_m = \operatorname{tg} \varphi_i \cdot \cos \frac{180}{z}.$$

Для поворота стола ослабляют гайки крепления его с продольным столом и в отверстие в столе вставляют рычаг, при помощи которого стол поворачивается на необходимый угол, отсчитываемый по шкале; после чего гайки зажимают.

#### **4.2.5. Установка оправки и крепление заготовки**

Оправка устанавливается в конусное отверстие переднего конца шпинделя бабки и затягивается сзади болтом. После установки оправки необходимо проверить индикатором биение ее посадочных поверхностей: цилиндрической части и опорного торца, на котором базируется заготовка при посадке.

Заготовка закрепляется на оправке и проверяется на биение по внешнему конусу, а при большом угле начального конуса – по дополнительному конусу. Величина допускаемого биения зависит от размеров колеса и степени точности его и должна находиться в пределах 0,01–0,05 мм.

#### **4.2.6. Настройка длины хода продольного стола**

Величина автоматического отхода продольного стола из крайнего рабочего положения, когда вершины резцов совпадают с образующей внутреннего конуса заготовки, должна равняться полной глубине нарезаемого зуба с добавлением 0,8–1,5 мм, что гарантирует зазор между вершинами резцов и зубьями колеса во время поворота заготовки при делении.

Для установки хода продольного стола отпускается зажимный винт, затем вращением винта 4 (см рис. 3.4) перемещают ползун (гайку) 5, пока указатель не покажет на шкале стола необходимую величину хода стола, затем винт зажимают.

#### 4.2.7. Установка сменных зубчатых колес качания люльки

Выполняется следующим образом. Барабан подачи устанавливаются по риску на нуль, а затем, сняв сменное колесо  $b_3$  (см. рис. 3.3), вращают ведомый валик до тех пор, пока люлька не станет на нуль шкалы отсчета углов поворота ее, после этого сцепляют колеса  $a_3$  и  $b_3$ . При этом необходимо следить за тем, чтобы при установке колес валы не повернулись больше, чем это необходимо для сцепления колес.

Так как сменные колеса выбирают по таблице по ближайшему значению угла качания, то может оказаться, что угол  $\theta_1$  качания ниже нуля или слишком мал, или слишком велик. При малом угле резцы будут врезаться в заготовку во время быстрого подвода стола. В этом случае надо увеличить угол качания люльки, поставив другие сменные колеса, взятые из той же таблицы для большего угла  $\theta_1$ . При этом угол качания возрастет не только вниз, но и вверх от нулевого положения, что приведет к дополнительному холостому ходу. Для устранения этого перебега надо расцепить сменные колеса качания и немного повернуть люльку, чтобы резцы опустились вниз, после чего следует вновь сцепить колеса. Во избежание снижения производительности станка нужно выбирать угол качания люльки минимальным, но достаточным для обкатки профиля.

При черновом зубонарезании без обкатки необходимо поставить люльку в среднее положение (на нуль) и вместо сменных колес качания  $a_3$  и  $b_3$  установить запорный хомут, связывающий валики, на которые эти колеса насажены, при этом ведомый валик  $XII$  (рис. 3.3), сообщающий качание люльке, не будет вращаться, делительный же механизм будет получать вращение от вала  $VII$  через дифференциал. Для предотвращения поворачивания заготовки в процессе нарезания необходимо установить сменные колеса гитары обкатки, которые в данном случае не вращаются и препятствуют повороту вала  $XIV$ ; при этом передаточное отношение сменных колес обкатки значения не имеет.

#### 4.2.8. Установка поворотных сегментов люльки на угол зуба

Угол установки каждого сегмента рассчитывается по формулам, приведенным в расчете наладки или принимается по карте наладки. Для установки каждого сегмента на угол отпускают три гайки, присоединяющие сегмент к люльке: две со стороны шкалы отсчета углов и одну на переднем конце сегмента – и при помощи винта устанавливают сегмент



таким образом, чтобы шкала нониуса показывала угол, полученный по расчету. Затем гайки затягиваются. В том же порядке устанавливается и второй сегмент.

#### 4.2.9. Установка резцов по длине

По длине резцы устанавливают при помощи калибра длины (рис. 4.3, *a*). При перемещении резца вдоль резцедержателя по плоскости, наклоненной под углом  $12^\circ$  к линии движения вершины его, как показано на рис. 5, он выдвигается вперед или отодвигается назад и устанавливается в плоскости, проходящей через центр станка. Эта регулировка выполняется следующим образом: резец не сильно зажимается винтами на резцедержателе, а калибр длины 6 (рис. 4.3, *a*) устанавливается плотно к передним плоскостям обоих ползунов. Расстояние  $l$  от этих плоскостей до плоскости, проходящей через центр станка, выдержано и на калибре. Регулируемый резец перемещают вдоль по резцедержателю до тех пор, пока его вершина не коснется проходной плоскости калибра; другая плоскость калибра непроходная, и вершина резца не должна проходить через нее. После этого винты крепления резца окончательно затягивают и вторично проверяют проходной и непроходной плоскостями калибра.

При установке резцов необходимо, чтобы суппорт был остановлен при движении вперед и откидная державка выдвинула резец в рабочее положение. Резцы вперед двигаются поочередно, а потому установку в рабочее положение каждого резца надо проверять отдельно.

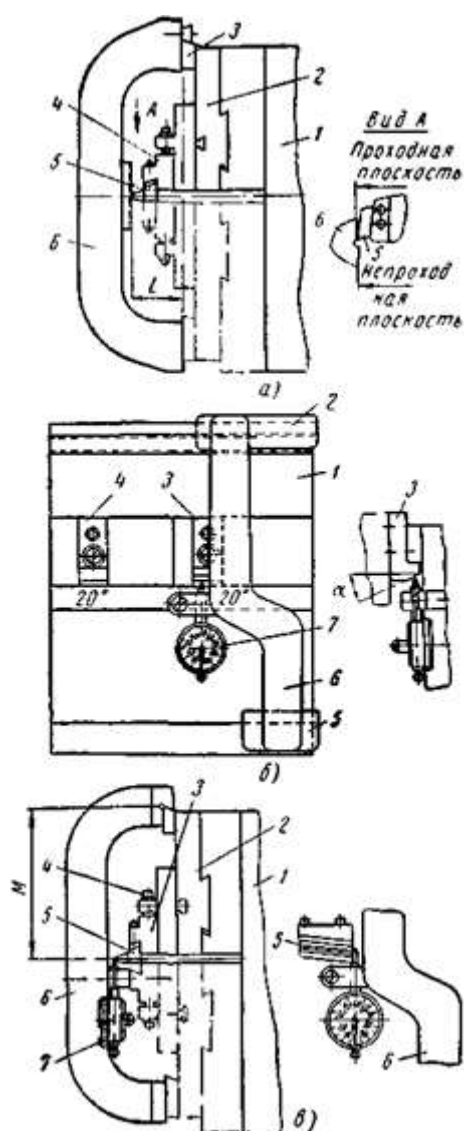


Рис. 4.3. Установка резцов по калибрам

#### 4.2.10. Установка резцов по высоте

Как было показано на рис. 8, вершина резца должна двигаться по прямой  $00_1$ . Площадка ползуна, на которую устанавливается калибр (рис. 4.3, б), параллельна этой прямой и находится на постоянном расстоянии  $M$  от нее. Площадки на верхнем и нижнем ползунах разные и резцы профильными сторонами расположены в разные стороны, а потому применяется два калибра: один для нижнего резца, другой для верхнего.

Эталон 1 (рис. 4.3, б), по которому настраивается калибр 6, имеет две базовых призмы 2 и 5, соответствующие площадкам ползуну. На эталоне закреплены две пластинки с профильным углом  $20^\circ$ : пластинка 4 для нижнего резца и 3 для верхнего. На рис. 4.3, б показана установка калибра для верхнего резца. Расстояние от вершины пластинки до базо-

вой площадки эталона также равно  $M$ . Калибр устанавливается на эталон базовыми площадками так, чтобы ножка индикатора 7 касалась профиля пластинки, при этом стрелка индикатора должна показывать на нуль. Затем калибр с индикатором устанавливается на боковую площадку ползуна (рис. 4.3, в). Ножка индикатора должна касаться профильной стороны резца у режущей кромки. Затем отпускают винты, крепящие резец, и при помощи винта 4 перемещают резцедержатель 3 по высоте до тех пор, пока стрелка индикатора не будет показывать на нуль; после чего винты зажимают. Другой резец устанавливается другим калибром таким же образом.

#### 4.2.11. Настройка длины хода ползунов

Длина хода ползунов, равная длине  $l$  хода резцов, регулируется перестановкой пальца в кривошипном диске  $D$  (см. рис. 3.3). Величина перестановки пальца зависит от принятых величин длины хода и угла установки поворотных сегментов люльки. Палец перемещается в радиальном пазу кривошипного диска винтом, находящимся под крышкой корпуса люльки. Вращение винта осуществляется при помощи специального градуированного ключа с передвижным плунжером и шкалой делений. Винт, приводимый во вращение ключом, ввинчиваясь, перемещает плунжер. Перемещение отсчитывается по шкале ключа. На станке под крышкой имеется таблица, на которой указано, до какого деления на шкале ключа должен перемещаться плунжер для установки необходимой длины хода при данном угле установки сегментов.

Для установки кривошипа надо открыть крышку, отпустить гайку крепления пальца на кривошипе и вращать станок вручную, пока головка винта, перемещающего палец, не займет верхнее положение. Надев на головку винта ключ, вращают его, пока деление на шкале ключа не покажет величину перемещения плунжера, принятую по таблице для необходимой длины хода при данном угле установки сегментов. После этого надо затянуть гайку крепления пальца.

#### 4.2.12. Установка суппортов на ползунах

Для установки суппортов вручную вращают станок, пока один из ползунов не станет в крайнее наружное положение. Затем подводят продольный стол с заготовкой к резцам, ослабляют болты, закрепляющие суппорт, перемещают суппорт по ползунам настолько, чтобы ре-

жущая кромка выходила за пределы зуба наружу (у большого торца) на 5 мм, и закрепляют его. После этого переводят ползун с суппортом в другое внутреннее крайнее положение; при этом режущая кромка резца должна выходить за пределы зуба на 2 мм. Таким же образом устанавливается и другой суппорт.

#### 4.2.13. Проверка правильности набора сменных зубчатых колес гитар деления и обкатки

Для определения правильности расчета и набора сменных колес гитар деления и обкатки надо проверить соответствие вращения люльки и шпинделя бабки.

Угол поворота шпинделя устанавливают по шкале, которая находится на задней стороне бабки.

Набор сменных колес гитары деления проверяют следующим образом: вначале поворачивают люльку и устанавливают ее на какое-либо целое деление шкалы, указывающей углы поворота люльки. Кольцо с нониусом на шпинделе бабки устанавливают на нуль, затем включают станок на один цикл, пока люлька, сделав качание в одну и другую сторону, не придет точно в прежнее положение по шкале люльки. За это время нониус на шкале бабки должен повернуться на угол, равный  $360 z$ .

При черновом нарезании, когда люлька не вращается, цикл работы определяется перемещением продольного стола к резцам и обратно; при двойном делении шпиндель бабки должен повернуться на угол  $720 z$ .

Если шпиндель поворачивается на угол, полученный по расчету, сменные колеса гитары деления установлены правильно.

Для проверки правильности набора сменных колес гитары обкатки люльку вначале движения ее снизу вверх (против часовой стрелки) останавливают так, чтобы указатель показал на шкале какое-либо целое значение градусов, затем устанавливают кольцо с нониусом на задней стороне бабки на нуль и включают станок. После того как люлька повернется на какой-либо угол, выраженный целым числом градусов, например на  $\omega = 20^\circ$ , станок останавливают. За это время шпиндель бабки должен повернуться на угол

$$\psi = \frac{\omega \cdot \sqrt{z_1^2 + z_2^2}}{z},$$

где  $z$  – число зубьев нарезаемого колеса.

Если эти требования выполняются, то сменные колеса обкатки установлены правильно.

#### **4.2.14. Разделение припуска при чистовом нарезании**

При чистовом нарезании припуск должен равномерно сниматься. Для первого обрабатываемого колеса припуск разделяется соответствующей установкой резцов. Люлька устанавливается в среднее положение (на нуль), режущие вершины резцов при этом находятся в одной вертикальной плоскости. Резцы приводятся в рабочее положение, т. е. отодвигаются от плоскости люльки вперед. Затем вручную подводится продольный стол с бабкой и нарезаемым колесом к резцам, разъединяется муфта делительного червяка, соединяющая вращение люльки и заготовки, и шпиндель с заготовкой поворачивается таким образом, чтобы начерно нарезанный зуб находился между обоими резцами. Муфта с червяком соединяется вновь и стол отводится назад, после чего настраивается прибор для распределения припуска. Наконечник прибора вводится во впадину между зубьями и зажимается, а затем отводится от заготовки. Последующие заготовки устанавливаются на оправку так, чтобы наконечник прибора входил в предварительно нарезанную впадину, и в таком положении зажимается, а прибор отводится от колеса.

#### **4.2.15. Настройка автомата выключения станка**

На наружном конце шпинделя, сзади бабки, имеется диск с делениями, внутри которого помещается кулачок автоматического выключения станка. Перед началом нарезания зубьев на заготовке кулачок устанавливается в исходное положение. После одного оборота шпинделя кулачок подходит к конечному выключателю и нажимает на него: станок останавливается. Перед началом нарезания следующего колеса кулачок возвращается в исходное положение.

### **5. ИЗМЕРЕНИЕ КОНИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС С ПРЯМЫМИ ЗУБЬЯМИ**

Зубья конических колес измеряются как в процессе нарезания, так и в готовом виде. В процессе нарезания измеряется толщина зуба по хорде и полная его высота. Измерение выполняется у большого торца в

направлении образующей дополнительного конуса. Толщина зуба конических колес измеряется так же и теми же зубомерами, как и у цилиндрических колес, высота же определяется универсальным высотомером или специальным шаблоном. Расположение пятна контакта проверяют на обкатном станке.

## 6. ОСНОВНЫЕ ДЕФЕКТЫ ПРОФИЛЯ НАРЕЗАЕМЫХ ЗУБЬЕВ

Основными дефектами профиля и причинами их возникновения являются:

1) несимметричность нарезанных зубьев из-за неправильной установки резцов по калибрам, по длине или по высоте; неправильного регулирования угла установки сегментов;

2) срезание зубьев в результате неправильной установки и неправильного подбора сменных колес гитары обкатки, а также при неправильном зазоре в зацеплении червяка люльки;

3) чернота на зубьях, появляющаяся при малом припуске на чистовую обработку в результате неточности при делении припуска (люлька была установлена не на нуль), а также при неправильном пользовании прибором для деления припуска;

4) волнистость поверхности зубьев, появляющаяся при небольшом перебеге резцов, износе клиньев салазок, износе откидной державки суппорта, слабом креплении заготовки, а также при недостаточной жесткости оправки или крепления заготовки.

## 7. ПРИМЕР РАСЧЕТА НАЛАДКИ

Нарезать колесо из конической пары: межосевой угол  $90^\circ$ ; модуль  $m = 1,75$ ; угол зацепления  $\alpha_0 = 15^\circ$ ; число зубьев:  $z_1 = 74$ ,  $z_2 = 74$ ; коэффициент высоты головки зуба  $k' = 1$ ; коэффициент высоты ножки зуба  $k'' = 1,1236$ ; материал – сталь 40Х; длина зуба  $b = 20$  мм. Вид обработки – черновая.

По формулам прил. 2 определяются справочные величины:  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $L_e$ ,  $h'$ ,  $h''$ ,  $\gamma_1$ ,  $\psi$ .

Зная числа зубьев  $z_1$  и  $z_2$  сопряженных колес, определяем половины углов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  начальных конусов:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{z_1}{z_2} = \frac{74}{74} = 1;$$

$$\varphi_1 = 45^\circ.$$

$$\varphi_2 = 90 - \varphi_1 = 90 - 45^\circ = 45^\circ.$$

Длина образующей начального конуса:

$$L_e = \frac{m \cdot z_1}{2 \cdot \sin \varphi_1} = \frac{1,75 \cdot 74}{2 \cdot \sin 45^\circ} = 91,570328 \text{ мм.}$$

Высота головки зуба:

$$h' = k' \cdot m = 1 \cdot 1,75 = 1,75.$$

Высота ножки зуба:

$$h'' = k'' \cdot m = 1,1236 \cdot 1,75 = 1,9663.$$

Угол ножки зуба:

$$\operatorname{tg} \gamma_1 = \frac{h''}{L_e} = \frac{1,9663}{91,570328} = 0,021473112;$$

$$\gamma_1 = 1^\circ 55'.$$

Угол установки шпинделя заготовки:

$$\Psi = \varphi_1 - \gamma_1 = 26^\circ 34' - 1^\circ 55' = 24^\circ 39'.$$

По табл. 4.1 скорость резания принимаем  $V_{\text{рез}} = 20$  м/мин.

По формуле 4.1 определяем число двойных ходов:

$$n = \frac{1000 \cdot V_{\text{рез}}}{2(b+7)} = \frac{1000 \cdot 20}{2 \cdot (20+7)} = 370,37 \text{ дв.ход/мин.}$$

По табл. 4.2 ближайшее число двойных ходов  $n = 347$  дв. ход/мин, а передаточное отношение сменных колес определяется по формуле 4.2:

$$X_0 = \frac{a_0}{b_0} = \frac{n}{220} = \frac{347}{220} = 1,57727.$$

По табл. 4.2 принимаем ближайшие сменные колеса из комплекта при станке:

$$\frac{a_0}{b_0} = \frac{44}{28} = 1,57143.$$

Расчет сменных зубчатых колес подачи:

По табл. 1 (прил. 1) для модуля  $m = 1,75$  время обработки одного зуба –  $t = 13,3$  сек, тогда передаточное отношение сменных колёс гитары подачи определяется по формуле 4.3:

$$X_{II} = \frac{a_1 \cdot c_1}{b_1 \cdot c_1} = \frac{6,2}{13,3} = 0,4661.$$

Ближайшие колеса будут:

$$\frac{a_1 \cdot c_1}{b_1 \cdot c_1} = \frac{58 \cdot 31}{42 \cdot 63} = 0,4603.$$

Сменные зубчатые колеса гитары деления определяют по формуле 4.5:

$$X_{II} = \frac{a_2 \cdot c_2}{b_2 \cdot d_2} = \frac{30}{z_2} = \frac{30}{74} = 0,405405.$$

По табл. 2 (прил. 1) подбираем сменные колеса гитары деления:

$$\frac{a_2 \cdot c_2}{b_2 \cdot d_2} = \frac{60 \cdot 45}{74 \cdot 90} = 0,405405.$$

По формуле 4.6 находим передаточное отношение сменных зубчатых колес обкатки:

$$X_{об} = \frac{a \cdot c}{b \cdot d} = \frac{\sqrt{z_1^2 + z_2^2}}{75} = \frac{\sqrt{74^2 + 74^2}}{75} = 1,395357382.$$



Из комплекта колес подбираем сменные зубчатые колеса с точностью до 4–5 знака после запятой:

$$\frac{a \cdot c}{b \cdot d} = \frac{48 \cdot 65}{52 \cdot 43} = 1,395348837.$$

По формуле 4.8 находим угол качения люльки:

$$K = \frac{h''}{m} = \frac{1,9663}{1,75} = 1,236.$$

$$\theta_1 = \left( \frac{458,2 \cdot K + 90}{z_2} - 0,4 \right) \cdot \sin \varphi_2 = \left( \frac{458,2 \cdot 1,236 + 90}{74} - 0,4 \right) \cdot \sin 45^\circ = 5^\circ 59' 20''.$$

По табл. 4 ближайшее значение угла  $\theta_1 = 6^\circ 30'$ , тогда  $\theta_2 = 11^\circ 54'$ ,  $\theta^0 = 18^\circ 24'$ , а сменные зубчатые колеса:

$$\frac{a_3}{b_3} = \frac{32}{40}.$$

По формуле 4.12 находим угол установки поворотных сегментов люльки:

$$S = \frac{\pi \cdot m}{z} = \frac{3,1416 \cdot 1,75}{74} = 0,0743;$$

$$\omega_i = \frac{28,648 \cdot (S + 2 \cdot h'' \cdot \operatorname{tg} \alpha_0)}{L_a} = \frac{28,648 \cdot (0,0743 + 2 \cdot 1,9663 \cdot \operatorname{tg} 20^\circ)}{91,570328} = 0^\circ 28' 15''.$$

## 8. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить назначение и принцип работы станка.
2. Изучить кинематические цепи станка и их настройку для нарезания конических колес с прямым зубом.

## 9. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

В отчете необходимо привести кинематическую схему станка с описанием кинематических цепей и пример расчета наладки.

## 10. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как происходит обработка заготовок на зубострогальных станках?
2. Расскажите об устройстве зубострогального станка мод. 526.
3. Объясните кинематику станка мод. 526.
4. Как производится расчет настроек станка мод. 526?
5. Как производится настройка станка мод. 526?
6. Какие причины возникновения дефектов профиля конических колес с прямыми зубьями?

**Приложение 1**  
**Таблица 1**

Продолжительность циклов, на которые можно наладить станок

Материал заготовки	Вид обработки	Число двойных ходов реза в минуту	Длина зуба заготовки, мм	Модуль зуба заготовки, мм												
				1,5	1,75	2	2,5	2,75	3	3,5	4,25	5	6,5	7,25	8	
				Время на 1 цикл, с												
Сталь / твёрдость до HB 180 /	Черновая обработка способом двойного деления	42	3	,6	,3	1,2	3,3	6,0								
		91	0	,3	1,2	3,3	6,0	6,0	9,7	3,7	7,4					
		09	5	1,2	3,3	6,0	9,7	9,7	3,7	7,4	7,4	7,4	2,9			
		47	2	3,3	6,0	9,7	9,7	3,7	7,4	7,4	2,9	2,9	9,2			
		98	8			9,7	3,0	7,4	7,4	2,9	2,9	9,2	5,0			
		58	0					7,4	2,9	2,9	9,2	5,0	3,6			
		25	3							9,2	5,0	3,6	0,5			
		7	2							5,0	3,6	0,5	2,6			
Чугун / твёрдость до HB 170 - 200 /		42	3	,6	,6	,3	1,2	3,3								
		91	0	,6	,3	1,2	3,3	6,0	6,0	9,7	9,7					
		47	5	,3	1,2	3,3	6,0	6,0	9,7	3,7	3,7	7,4	2,9			
		98	2	1,2	3,3	6,0	6,0	9,7	3,7	7,4	7,4	7,4	2,9			
		58	8			6,0	9,7	3,7	7,4	7,4	2,9	2,9	9,2			
		25	0					3,7	7,4	2,9	2,9	9,2	5,0			

		10	3						2,9	2,9	9,2	5,0	3,6		
		5	2							9,2	5,0	3,6	0,5		
Сталь / твёрдость до HB 180 /	Черновая обработка способом одинарного деления	42	3	,6	,6	,3	1,2	3,3							
		91	0	,6	,3	1,2	3,3	3,3	6,0	6,0	3,7				
		09	5	,3	,3	3,3	6,0	6,0	9,7	9,7	3,7	7,4	2,9		
		47	2	,3	1,2	3,3	6,0	9,7	7,4	7,4	7,4	2,9	9,2	5,0	3,6
		98	8			6,0	9,7	3,7	7,4	2,9	2,9	9,2	5,0	3,6	0,5
		58	0					3,7	7,4	2,9	9,2	5,0	3,6	3,6	0,5
		25	3						2,9	9,2	5,0	3,6	0,5	0,5	2,6
		7	2							5,0	3,6	0,5	2,6	2,6	6,5

Продолжение табл. 1

Материал заготовки	Вид обработки	Число 2-х ходов реза в мин	Длина зуба заготовки, мм	Модуль зуба заготовки, мм											
				1,5	1,75	2	2,5	2,75	3	3,5	4,25	5	6,5	7,25	8
				Время на 1 цикл, с											
Чугун / твёрдость до HB 170 - 200 /	Черновая обработка способ одинарного деления	442	13	7,6	7,6	7,6	9,3	11,2	-	-	-	-	-	-	-
		309	20	7,6	7,6	9,3	11,2	13,3	13,3	16,0	19,7	-	-	-	-
		247	25	7,6	9,3	11,2	13,3	13,3	16,0	19,7	19,7	23,7	27,4	-	-
		198	32	19,3	11,2	13,3	13,3	16,0	16,0	19,7	23,7	27,4	32,9	32,9	39,2
		158	38	-	-	13,3	16,0	16,0	19,7	23,7	27,4	32,9	39,2	39,2	45,0
		125	50	-	-	-	-	19,7	23,7	23,7	27,4	32,9	39,2	45,0	53,6
		97	63	-	-	-	-	-	23,7	27,4	32,9	39,2	45,0	53,6	60,5
		85	82	-	-	-	-	-	-	32,9	39,2	45,0	53,6	60,5	72,6
Сталь / твёрдость до HB 180 /	Чистовая обработка	442	13	7,6	9,3	9,3	11,2	11,2	-	-	-	-	-	-	-
		442	20	9,7	11,2	11,2	13,3	13,3	16,0	16,0	19,7	-	-	-	-
		391	25	11,2	11,2	13,3	13,3	16,0	16,0	19,7	23,7	23,7	27,4	-	-
		309	32	11,2	13,3	16,0	16,0	19,7	19,7	23,7	23,7	27,4	32,9	45,0	53,6
		276	38	-	-	-	19,7	19,7	23,7	23,7	27,4	32,9	39,2	53,6	60,5
		198	50	-	-	-	-	23,7	27,4	27,4	32,9	39,2	45,0	60,5	39,2
		158	63	-	-	-	-	-	27,4	32,9	39,2	45,0	53,6	39,2	45,0
		125	82	-	-	-	-	-	-	39,2	45,0	53,6	60,5	45,0	53,6
Чугун / твёрдость до HB 170 - 200 /	Чистовая обработка	442	13	7,6	7,6	7,6	7,6	9,3	-	-	-	-	-	-	-
		442	20	7,6	7,6	7,6	9,3	11,2	13,3	16,0	19,7	-	-	-	-
		347	25	7,6	9,3	9,3	11,2	13,3	16,0	19,7	19,7	23,7	27,4	-	-
		276	32	7,6	9,3	11,2	13,3	16,0	19,7	23,7	23,7	27,4	32,9	32,9	39,2
		247	38	-	-	-	16,0	19,7	19,7	23,7	27,4	32,9	32,9	39,2	45,0
		177	50	-	-	-	-	19,7	23,7	27,4	27,4	32,9	39,2	45,0	53,0
		141	63	-	-	-	-	-	27,4	27,4	32,9	39,2	45,0	53,6	60,5
		97	82	-	-	-	-	-	-	39,2	39,2	45,0	53,6	60,5	72,0

Таблица 2

## Расположение сменных зубчатых колёс в гитаре деления

Число зубьев изделий	Число зубьев сменных колёс гитары деления				Число зубьев изделий	Число зубьев сменных колёс гитары деления			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
5	100	30	90	50	45	60	45	40	80
6	100	36	90	50	46	60	46	45	90
7	100	42	90	50	47	60	47	45	90
8	100	48	90	50	48	60	48	45	90
9	100	45	75	50	49	60	49	45	90
10	100	50	90	60	50	60	50	40	90
11	80	44	75	50	51	60	51	40	90
12	100	50	75	60	52	60	52	40	90
13	90	52	80	60	53	60	53	40	90
14	90	56	80	60	54	60	54	40	90
15	90	54	60	50	55	60	55	40	80
16	75	64	80	50	56	60	56	40	80
17	75	68	80	50	57	60	57	40	80
18	75	63	70	50	58	60	58	40	80
19	75	57	72	60	59	60	59	50	80
20	75	60	60	50	60	60	60	40	80
21	60	63	75	50	61	60	61	40	80
22	75	66	72	60	62	60	62	40	80
23	75	69	72	60	63	60	63	40	80
24	75	48	50	60	64	60	64	40	80
25	64	56	63	60	65	60	65	40	80
26	75	52	48	60	66	60	66	40	80
27	75	63	56	60	67	60	67	40	80
28	75	56	48	60	68	60	68	40	80
29	64	58	48	60	69	60	69	45	90
30	75	80	75	60	70	60	70	45	90
31	60	62	74	80	71	60	71	45	90
32	75	52	65	80	72	60	72	45	90
33	75	66	64	80	73	60	73	45	90
34	75	68	64	80	74	60	74	45	90
35	75	70	64	80	75	60	75	45	90
36	75	72	48	60	76	60	76	45	90
37	72	74	64	80	77	60	77	45	90
38	64	57	50	80	78	60	78	45	90
39	60	52	50	80	79	60	79	45	90
40	60	48	54	90	80	60	80	45	90
41	60	41	45	90	81	40	60	50	90
42	60	42	45	90	82	60	82	45	90
43	60	43	45	90	83	60	83	45	90
44	60	44	45	90	84	50	70	45	90

## Приложение 2

## Варианты

№	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Материал колеса	b, мм	m, мм	α, град
1	20	40	Чугун	12	1,5	20
2	40	80		20	1,75	15
3	35	105		25	2	20
4	29	87		30	2,5	15
5	75	150		40	2,75	20
6	46	115		50	3	15
7	58	174		60	3,5	20
8	75	225		80	5	15
9	29	29		25	6,5	20
10	28	70		40	8	15
11	45	90	Сталь 45	12	1,5	20
12	38	95		20	1,75	15
13	56	112		25	2	20
14	62	124		30	2,5	15
15	25	75		40	2,75	20
16	48	58		50	3	15
17	36	99		60	3,5	20
18	58	145		80	5	15
19	47	94		25	6,5	20
20	69	69		40	8	15
21	36	90	Сталь 40X	12	1,5	20
22	74	74		20	1,75	15
23	41	82		25	2	20
24	56	154		30	2,5	15
25	23	46		40	2,75	20
26	18	54		50	3	15
27	12	24		60	3,5	20
28	40	120		80	5	15
29	52	104		25	6,5	20
30	38	38		49	8	15

Для справок:

вид обработки:  $m \geq 3$  – черновая,  $m < 3$  – чистовая,

коэффициент высоты головки зуба –  $k' = 1$ ,

коэффициент высоты ножки зуба –  $k'' = 1,1236$ ,

межосевой угол  $90^\circ$ ,

половины углов начальных конусов –  $\operatorname{tg} \varphi_1 = z_1/z_2$ ,  
 $\varphi_2 = 90 - \varphi_1$ ,

длина образующей начального конуса –  $L_e = m \cdot z_1 / (2 \cdot \sin \varphi_1)$ ,

высота головки зуба –  $h' = k' \cdot m$ , высота ножки зуба –  $h'' = k'' \cdot m$ ,

угол ножки зуба –  $\operatorname{tg} \gamma_1 = h''/L_e$ , угол установки шпинделя заготовки –  $\Psi = \varphi_1 - \gamma_1$ .

## Лабораторная работа № 7.

# ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить вопросы технологии электрофизических и электрохимических методов обработки.

## 2. ВВЕДЕНИЕ. ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА. КЛАССИФИКАЦИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

В современном машиностроении возникают технологические проблемы, связанные с обработкой новых материалов и сплавов (например, жаро- и кислотостойкие, специальные никелевые стали, тугоплавкие сплавы, композиты, неметаллические материалы: алмазы, рубины, германий, кремний, порошковые тугоплавкие материалы и т. п.) форму и состояние поверхностного слоя которых трудно получить известными механическими методами.

К таким проблемам относится обработка весьма прочных или весьма вязких материалов, хрупких и неметаллических материалов (керамика), тонкостенных нежестких деталей, а также пазов и отверстий, имеющих размеры в несколько МКМ; получение поверхностей деталей с малой шероховатостью, с очень малой толщиной дефектного поверхностного слоя и т. д.

В этих условиях, когда возможность обработки резанием ограничена плохой обрабатываемостью материала изделия, сложностью формы обрабатываемой поверхности или обработка вообще невозможна, целесообразно применять электрофизические и электрохимические методы обработки [1].

Их достоинства следующие:

1) механические нагрузки либо отсутствуют, либо настолько малы, что практически не влияют на суммарную погрешность точности обработки;

2) позволяют изменять форму обрабатываемой поверхности заготовки (детали);



- 3) позволяют влиять и даже изменять состояние поверхностного слоя детали;
- 4) не образуется наклеп обработанной поверхности;
- 5) дефектный слой не образуется;
- 6) удаляются прижоги поверхности, полученные при шлифовании;
- 7) повышаются: износостойкость, коррозионная стойкость, прочность и другие эксплуатационные характеристики поверхностей деталей.

Кинематика формообразования поверхностей деталей электрофизическими и электрофизическими методами обработки, как правило, проста, что обеспечивает точное регулирование процессов и их автоматизацию.

На обрабатываемость деталей такими методами (за исключением ультразвукового) не влияют твердость и вязкость материала детали.

#### Историческая справка.

В науке и технике разрушение контактов под действием электрических разрядов было известно давно. В частности, искровые и дуговые разряды возникают при разрыве или отключении электрических цепей. Электрической эрозии подвержены контакты реле, выключателей, рубильников и других подобных устройств. Электрическая эрозия – очень вредное явление, сокращающее срок службы и снижающее надежность электрических устройств. Много исследований было посвящено устранению, или хотя бы уменьшению такого разрушения контактов.

Над этой проблемой в годы Великой Отечественной войны работали ученые Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко. За изобретение ЭЭО они были удостоены Государственной премии СССР. Позднее Б. Р. Лазаренко был избран академиком А. Н. Молдавской ССР, где и работал до конца жизни (1910...1979 гг.).

Большой вклад в развитие методов ЭЭО советские ученые и инженеры Б. Н. Золотых, А. Л. Лившиц, Л. С. Палатник, М. Ш. Отто и другие.

Разработка основ электрохимического метода и технологического его применения принадлежит талантливому ученому В. Н. Гусеву (1904...1956 гг.). В 1929 г. он получил патент на ЭХО. Первые опыты по размерной электрохимической обработке металлов были проведены в 40-х годах прошлого столетия. В 1954 г. он получил патент на заточку сверл с вершинами из карбидов. В последующие годы, как самим Гусевым

вым, так и другими учеными были разработаны различные варианты электрохимической технологии и созданы основы теории электрохимического метода.

Начальный период развития метода характеризуется тем, что наряду с его использованием в производстве (для получения профиля пера турбинных и компрессорных лопаток, ковочных штампов, пресс форм, кольцевых деталей, прошивки отверстий и щелей, заточки инструмента, удаления заусенцев и др.) происходило накопление экспериментальных и статических данных; делались попытки теоретических обобщений, которые позволили бы заранее, без испытаний, предсказать конечные результаты обработки.

Позже появилось стремление к выявлению основных зависимостей процесса, которые позволяют управлять процессом электрохимической обработки. Попытка обобщения накопленного материала в области теории и практики электрохимической обработки с учетом опыта отечественных и зарубежных заводов сделана в монографии И. И. Мороза и др. [4].

Успехи, достигнутые в области электрохимического образования деталей сложной формы, и прежде всего лопаток турбин и компрессоров, а также полостей ковочных штампов, достаточно полно изложены в книге В. А. Головачева «Электрохимическая размерная обработка деталей сложной формы».

В настоящее время значительные успехи достигнуты в области моделирования электрических полей и решении задач формообразования поверхности при ЭХО, сделаны попытки аналитического расчета простых форм инструментов, обеспечивающих достаточно высокую точность изготовления отверстий и полостей. Созданы математические модели, учитывающие гидродинамику потока электролита, для определенной формы поверхности, получаемой при ЭХО, и методики определения погрешностей, припусков и качества обработки.

В области теории разработаны оригинальные методики прогнозирования обрабатываемости металлов и сплавов в условиях ЭХО

[ И.Э.АН.СССР ].

Быстрое развитие технологически развитых отраслей промышленности (авиационной, ядерной и т. д.) сопровождалось повышением доли использования труднообрабатываемых сплавов. Характер металлообработки начинает изменяться. Традиционные способы резания металлов больше не соответствуют современным требованиям. Хотя скорость резания таких материалов, как низкоуглеродистая сталь, в результате

успехов технологии станкостроения и режущих инструментов удваивается примерно каждые 10 лет, предельная прочность на разрыв материалов, которые можно обрабатывать, например, со скоростью 30 м / мин, удваивается примерно только каждые 50 лет. Кроме того, предельная прочность на разрыв используемых материалов, по-видимому, удваивается примерно каждые 20 лет. Следовательно, уже наблюдается упадок технологии металлообработки в некоторых отраслях промышленности.

Предпринимались попытки преодолеть трудности обработки труднообрабатываемых материалов путем горячей обработки, или путем применения абразивных методов или таких как УЗ. обработка. Успех, однако был частичным. Необходимы методы, при которых скорость обработки не зависела бы от твердости детали.

Наметились два основных направления в решении данной проблемы: термические и химические методы обработки.

Термические методы обработки основаны на том, что путем концентрации энергии на маленьком участке детали материал можно расплавить и испарить. Энергия может подаваться в форме:

- теплоты – газопламенная или плазменная обработка;
- света – лазеры;
- электронная бомбардировка – электронный луч и электрическая эрозия.

Из термических существует только один метод, который уже позволяет экономически выгодно удалять довольно большое количество металла с детали со значительной степенью точности: – это процесс электрической эрозии, который разрабатывается с 1940 г.

Однако скорость, с которой можно удалять металл электроискровым методом при условии высокого класса чистоты поверхности, ограничена, более того, высокая производительность процесса приводит к часто наблюдаемому повреждению поверхности, что делает этот способ во многих случаях непригодным. Следовательно, ни один из термических методов не решает полностью проблемы обработки высокопрочных металлов в широком масштабе.

Химические методы, кроме способов травления, включают электрохимическую обработку. Этот метод можно использовать для обработки особо твердых и вязких электропроводных материалов (не зависимо от твердости или прочности детали – скорость съема металла не меняется). При этом достигается:

- высокая скорость съема металла (более 1000 мм/мин);
- высокий класс точности;

- отсутствует износ инструмента;
- отсутствуют остаточные напряжения;
- отсутствуют повреждения материала детали;
- отсутствуют заусенцы на кромках реза.

К числу современных технологических процессов, получивших за последние 30...40 лет практическое применение, принадлежит ультразвуковая размерная обработка труднообрабатываемых материалов (кварц, керамика, фарфор, ферриты, кремний, германий, цветные поделочные и полудрагоценные камни). Сущность ультразвуковой размерной (абразивной) обработки твердых хрупких материалов состоит в направленном разрушении обрабатываемого материала под действием ударов абразивных зерен, находящихся между поверхностями материала и инструмента, колеблющегося с ультразвуковой частотой в продольном (осевом) направлении. Частота – 18...25 тыс. ударов в секунду. Число зерен, участвующих в резании – 30...100 тыс. на один квадратный сантиметр площади. Это разновидность механической обработки материалов. Ультразвуковые процессы основаны на использовании механических колебаний, распространяющихся в газах, жидкостях и твердых телах.

Бурное развитие квантовой электроники, в значительной мере обусловленное выдающимися достижениями научных школ академиков Н. Г. Басова и А. М. Прохорова, удостоенных совместно с американским ученым Ч. Таунсом Нобелевской премии, привело к созданию принципиально новых источников энергии – лазеров. Лазерное излучение характеризуется гигантской концентрацией энергии, сфокусированной на чрезвычайно малую площадь, теоретически соизмеримую с квадратом длины волны излучения.

Лазер – это генератор электромагнитных волн в диапазоне ультрафиолетового, видимого и инфракрасного излучений. Начиная с конца 60-х годов прошлого столетия лазеры (небольшой мощности) получили первое применение в технологии обработки материалов (сначала в приборостроении). Большие потенциальные возможности заложены в применении процессов, осуществляемых с помощью импульсного нагружения – высоковольтный электрический разряд в жидкости – электрогидравлическая обработка. Впервые на разрушительную силу электрического разряда указано в 18 столетии (1767 ... 1769 гг.).

Экспериментальное устройство того времени включало все основные элементы современной установки для осуществления импульсного разряда:

- конденсатор (лейденская банка);
- коммутирующий элемент (воздушный шаровой разрядник);
- электроды, погруженные в жидкость.

Опытная проверка промышленного испытания электрогидравлической обработки началась с середины 50-х годов и установила ряд преимуществ перед методами, использующими в качестве источника энергии – взрывчатые вещества в режиме взрывного химического преобразования:

- возможность управления процессом накопления и выделения энергии;
- отсутствие источников повышенной опасности после отключения установки;
- простота и низкая себестоимость оснастки.

Применение:

1). Формообразование и калибровка деталей из пространственных заготовок диаметром 200 ... 1100 мм при высоте до 1100 мм и толщине до 5 мм и др.;

2). Очистка от окалины и неметаллических покрытий отливок из цветных и черных металлов весом от 1кг до 10 ... 15 т.

Большая роль в развитии технологии электрогидравлической обработки машиностроительных материалов принадлежит С. М. Поляку, Л. А. Юткину, К. Н. Богоявленскому, Б. Г. Красичковой и др. (Физико-технический институт АН БССР)

В современном машиностроении при изготовлении ответственных деталей применяются физико-химические способы размерной и упрочняющее-чистовой обработки. Эти способы дополняют, а иногда заменяют традиционные процессы резания. Постоянно растущие требования к качеству, надежности и долговечности изделий делают актуальными создание и применение новых методов обработки и упрочняющей технологии для повышения износостойкости, коррозионной стойкости, жаропрочности и других эксплуатационных характеристик.

Физико-химические способы имеют следующие достоинства и преимущества перед процессами резания:

1). Копирование формы инструмента сложной формы сразу по всей поверхности заготовки при его простом поступательном движении;

2). Обработка материалов ведется при практической независимости режимов обработки от твердости и вязкости материала;

3). Выполнение уникальных операций (обработка отверстий с криволинейной или спиральной осью, изготовление очень маленьких отверстий, узких и глубоких канавок);

4). Малые значения сил, действующих в процессе обработки, а при некоторых методах отсутствие механического контакта инструмента и заготовки;

5). Используется инструмент менее твердый и менее прочный, чем обрабатываемый материал;

6). Высокая производительность обработки при сравнительно высокой точности получения размеров;

7). Возможность механизации и автоматизации процесса физико-химической обработки, а также многостаночного обслуживания.

Однако физико-химические способы обработки более энергоемки, чем процессы резания. Основные физико-химические способы размерной и упрочняюще – чистовой обработки заготовок следующие:

1. Электроразрядные – электроэрозионный, электроконтактный и абразивно-эрозионный.

2. Электрохимические – электрохимикогидравлический и электрохимикомеханический.

3. Ультразвуковые – размерная ультразвуковая обработка и наложение ультразвуковых колебаний на режущий инструмент.

4. Лучевые – лазерный, электроннолучевой и плазменный.

5. Магнитноимпульсная – индукционная и электродинамическая.

6. Магнитноабразивная.

7. Комбинированные – анодно-механический, электроэрозионно-химический, ультразвуковой-электрохимический и электролазерный.

Технико-экономический эффект их применения тем выше, чем сложнее конфигурация обрабатываемых деталей: время изготовления обычных фасонных поверхностей снижается в 2...3 раза, сложных – в 5...10 раз. Большинство физико-химических методов разработано в СССР.

Основные особенности рабочих процессов физико-химических методов и процесса резания приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Основные особенности рабочих процессов физико-химических методов  
и процесса резания

Способ обработки	Рабочий процесс	Используемая энергия	Мощность удельная, $N_{уд}$ , Вт/см <sup>2</sup>	Рабочая среда	Род обрабатываемых материалов
1	2	3	4	5	6
Электроэрозионный	Эрозия в импульсных разрядах	Тепловая	$10^4 \dots 10^8$	Жидкость диэлектрическая	Электропроводящие
Электроконтактный	Механическое удаление нагретого металла	то же	$10^4$	Воздух, газ	то же
Электрохимический	Анодное растворение	Химическая	$10^3 \dots 10^4$	Электролит	_____»_____
Анодно-механический	Анодно-механическое удаление	Химическая + механическая	то же	то же	_____»_____
Ультразвуковой	Хрупкое разрушение при ударном вдавлении абразивных зерен	Механическая	то же	Абразивная	Металлы и неметаллы (тверд., и хрупк.)
Электронно-лучевой	Эрозия под действием потока электронов	Тепловая	$10^6 \dots 10^8$	Вакуум $10^{-4} \dots 10^{-6}$	Электропроводящие
Ионно-лучевой	Катодное распыление	то же	$10^6 \dots 10^7$	Вакуум $10^{-2} \dots 10^{-4}$	Лучше электропроводящие
Светолучевой	Световая эрозия	то же	$10^6 \dots 10^8$	Газ, жидкость	Любые

Способ обработки	Рабочий процесс	Используемая энергия	Мощность удельная, $N_{уд}$ , Вт/см <sup>2</sup>	Рабочая среда	Род обрабатываемых материалов
Процессы резания	Большие упруго-пластические деформации	Механическая	$10^2 \dots 10^3$	Газ, СОЖ	Любые

### 3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие технологические проблемы возникают в современном машиностроении?
2. Каковы достоинства электрофизических и электрохимических методов обработки?
3. Кто основоположник электроэрозионного способа обработки?
4. Кто разработал основы электрохимического метода обработки?
5. Каковы основные направления в обработке труднообрабатываемых материалов?
6. Как классифицируются физико-химические способы обработки материалов?
7. Каковы преимущества физико-химических методов обработки перед процессами резания?

### 4. ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

Введение. Разработчиками данного метода являются советские ученые Н. И. Лазаренко и Б. Р. Лазаренко. Поместив электроды в жидкий диэлектрик и замыкая электрическую цепь, ученые заметили, что жидкость мутнела уже после первых разрядов между контактами. Они установили: это происходит потому, что в жидкости появляются мельчайшие металлические шарики, которые возникают вследствие электрической эрозии электродов [1,2,3].

Ученые решили усилить эффект разрушения и попробовали применить электрические разряды для равномерного удаления металла (1943 г.). С этой целью они поместили электроды (инструмент 1 и заготовку 3) в жидкий диэлектрик 4, который охлаждая расплавленные ча-



стицы металла и не позволяя им оседать на противолежащий электрод (рис. 4.1).

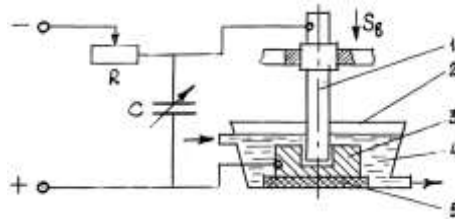


Рис. 4.1. Схема электроискрового станка:

- 1 – электрод-инструмент; 2 – ванна; 3 – заготовка;  
4 – диэлектрическая жидкость; 5 – пластина изолирующая.

В качестве генератора импульсов использовалась батарея конденсаторов ( $C$ ), заряжаемых от источника постоянного тока; время зарядки конденсаторов регулировали реостатом ( $R$ ). Так появилась первая в мире электроэрозионная установка. Электрод-инструмент 1 перемещали к заготовке 3. По мере их сближения возрастала напряженность поля в пространстве между заготовкой и инструментом. Это пространство называют межэлектродным промежутком (МЭП) или просто промежутком (зазором).

При достижении определенной напряженности поля на участке с минимальным расстоянием между поверхностями электродов (минимальным электродным зазором), возникал электрический разряд (протекал импульс) тока, под действием которого происходило разрушение участка заготовки. Продукты обработки попадали в диэлектрическую жидкость 4, где охлаждались, не достигая электрода-инструмента 1, и затем осаждались на дно ванны. Через некоторое время электрод-инструмент 1 прошел заготовку 3. Причем контур отверстия точно соответствовал профилю инструмента.

Так была изобретена электроэрозионная размерная обработка материалов (ЭЭО). Первоначально для осуществления ЭЭО применялись исключительно искровые разряды, создаваемые конденсатором в так называемом  $RC$ -генераторе. Поэтому новый процесс в то время называли электроискровой обработкой.

В начале 50-х годов XX столетия были разработаны специальные генераторы импульсов, благодаря которым обработку можно было проводить не только на коротких искровых разрядах, но и на более продолжительных искро-дуговых и дуговых разрядах. Чтобы отличить но-

вые условия осуществления процесса, его стали называть электроимпульсной обработкой.

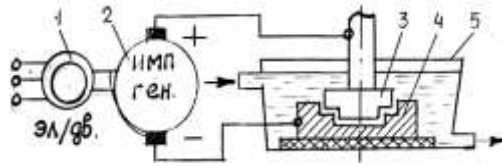


Рис. 4.2. Схема электроимпульсной установки:  
 1 – электродвигатель; 2 – импульсный генератор;  
 3 – электрод-инструмент; 4 – заготовка;  
 5 – ванна для диэлектрической жидкости.

Этот метод основан на том, что полярный эффект при импульсах малой и средней продолжительности приводит к повышенной эрозии анода, что используется при электроискровой обработке. При импульсах большой продолжительности (дуговой разряд) значительно быстрее разрушается катод. Поэтому при электроимпульсной обработке применяют обратную полярность включения электродов и обрабатывают при действии униполярных импульсов, создаваемых электрическими машинами или электронным генератором. Продолжительность импульсов – 500...10000 мкс. Электрод – инструмент изнашивается значительно меньше, чем при электроискровой обработке. Производительность выше, так как мощность импульсов больше.

Метод наиболее целесообразно применять при предварительной обработке штампов, турбинных лопаток, фасонных отверстий в деталях из твердых, нержавеющей и жаропрочных сплавов. При электроимпульсной обработке съем металла в единицу времени в 8...10 раз больше, чем при электроискровой.

Для повышения точности и уменьшения шероховатости обрабатываемых поверхностей заготовок при ЭЭО был предложен метод высокочастотной электроискровой обработки. Он основан на использовании электрических импульсов малой энергии при частоте 100...150 кГц.

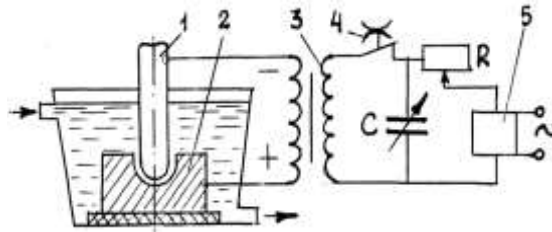


Рис. 4.3. Схема высокочастотной электроискровой обработки:  
1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка; 3 – трансформатор;  
4 – прерыватель; 5 – выпрямитель.

В данной схеме дугового разряда нет, так как электрод-инструмент 1 и заготовка 2 включены во вторичную цепь трансформатора. Производительность метода в 30...50 раз выше по сравнению с электроискровым при значительном увеличении точности и уменьшении шероховатости. Износ инструмента незначителен. Метод исключает структурные изменения и микротрещины в поверхностном слое материала обрабатываемой заготовки.

В настоящее время применяют несколько технологических схем электроэрозионной обработки.

1). Прошивание – удаление металла из полостей, углублений, отверстий, пазов, с наружных поверхностей (рис. 4.1). Прошиванием можно получать поверхности как с прямой, так и с криволинейной осью. Существует два варианта прошивания:

– прямое копирование, когда электрод-инструмент находится над заготовкой (рис. 4.1);

– обратное копирование, когда электрод-инструмент находится под заготовкой. Движение подачи здесь может осуществлять заготовка.

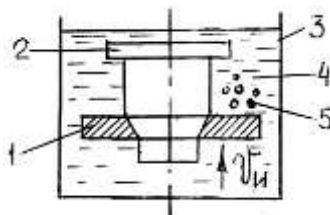


Рис. 4.4. Схема обратного копирования:  
1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка; 3 – ванна; 4 – диэлектрик;  
5 – продукты обработки

Этот вариант облегчает удаление продуктов обработки и за счет сокращения числа боковых разрядов через частицы расплавленного металла в межэлектродном промежутке повысить точность обработки деталей.

## 2). Электроэрозионное шлифование

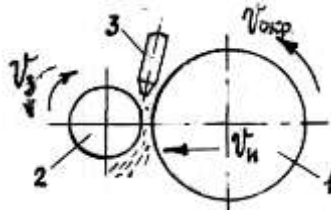


Рис. 4.5. Схема электроэрозионного шлифования:  
1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка; 3 – насадка

Металлический электрод-инструмент 1 в форме диска совершает вращательное и поступательное движения к заготовке 2 со скоростью  $v_{\text{п}}$ . Заготовка может вращаться навстречу или попутно. Жидкость подается поливом из насадки 3. Инструмент чугунный или медный диск. Обработку ведут на постоянном или переменном токе. Используемое напряжение – 10...40 В. Метод не обеспечивает высокой точности и низкой шероховатости, но высокопроизводителен вследствие использования больших электрических мощностей.

Данный метод также используется для обработки плоских поверхностей (рис. 4.6.).

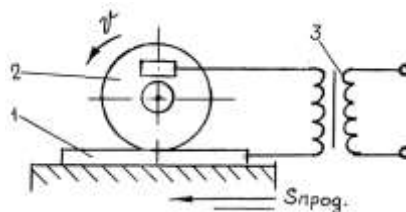


Рис. 4.6. Схема электроконтактной обработки плоской поверхности:  
1 – заготовка; 2 – инструмент; 3 – трансформатор

## 3). Разрезание профильным или непрофилированным инструментом.

Оно включает разделение заготовки на части – отрезание (инструмент – диск или пластина), получение непрямолинейного контура – вырезание, которое выполняется только непрофилированным электродом – инструментом – проволока диаметром 0,02...0,3 мм или стержня, которые могут перемещаться в различных направлениях со скоростью  $v_{\text{п}}$  в любой части заготовки. Материал проволоки – латунь, медь, вольфрам, молибден. На рис. 4.7. дана схема станка для выполнения вырезных работ.

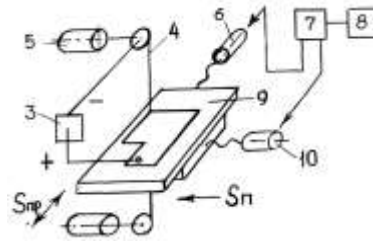


Рис. 4.7. Схема копировально-вырезного электроэрозионного станка с ЧПУ:

- 1 – катушка с проволокой; 2 – электропривод натяжения проволоки; 3 – генератор импульсов; 4 – инструмент-проволока; 5 – электропривод подачи проволоки; 6 – электропривод винта продольной подачи стола; 7 – устройство системы ЧПУ; 8 – считывающее устройство и программоноситель; 9 – стол; 10 – электропривод винта поперечной подачи стола

Для устранения влияния износа электрода-инструмента на точность прорезаемых пазов проволоку или стержень перемещают (обычно перематыванием) вдоль оси с определенной скоростью. Разрезание (вырезание) выполняют в ванне с диэлектрической жидкостью.

4). Электроэрозионное упрочнение, включающее легирование и наращивание поверхности, обычно осуществляют на воздухе. Частицы расплавленного металла инструмента на воздухе не успевают остыть и оседают на поверхности заготовки, образуя на ней слой сплава, насыщенного легирующими элементами электрода-инструмента. Кроме того, нанесенный на заготовку слой закален до высокой твердости и имеет за счет этого повышенную износостойкость.

#### Общее описание процесса

Удаление металла с заготовки происходит в среде диэлектрика за счет микроударов, расплавляющих часть металла. Рассмотрим основные стадии протекания электроэрозионного процесса снятия припуска.

По мере сближения электрода-инструмента с заготовкой напряженность ( $E$ ) электрического поля возрастает обратно пропорционально расстоянию между электродами:

$$E = U/S, \text{ В/м} \quad (4.1)$$

где  $U$  – разность потенциалов электрода — инструмента и заготовки, В;  
 $S$  – зазор между электродами, м.

Наибольшая напряженность возникает на участке, где межэлектродный зазор минимален. Зазор зависит от высоты  $h_b$  местного или макровыступа на заготовке.

Если электроды сблизить до расстояния нескольких десятков мкм, то напряженность поля в районе выступа будет наибольшей, произойдет пробой межэлектродного промежутка в этой точке, возникает электрический разряд, через промежуток протекает ток, то есть имеет место направленное движение электронов. В электрическом поле, возникшем в межэлектродном зазоре, в направлении, обратном движению электронов, происходит перемещение более тяжелых частиц-ионов. Электроны, имеющие меньшую массу, быстро достигают положительно заряженной поверхности заготовки и нагревают металл, вызывая расплавление и испарение его в месте прохождения тока. В результате образуется углубление в форме сферической лунки радиусом  $R$  (рис. 4.8.).

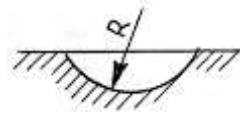


Рис. 4.8. Форма лунки

Вылетевшие из лунки частицы металла охлаждаются жидкостью, которая находится в зазоре, и застывает в виде шариков. В качестве жидкости используют различные диэлектрики: керосин плюс минеральное масло в соотношении 1:1; 1:2; дистиллированную воду. Поверхность приобретает форму с явно выраженными углублениями в виде лунок. Такие лунки формируют микрорельеф, характеризующий шероховатость поверхности. Поверхностный слой дна лунок испытывает воздействие термического цикла нагрева и быстрого охлаждения жидкостью. Свойства этого слоя отличны от свойств металла в глубине заготовки.

В электроискровом режиме большинство ионов, имеющих значительную массу, не успевают достичь отрицательно заряженного электрода и вызвать удаление материала с его поверхности. Съем металла происходит преимущественно с анода, который выбирают в качестве заготовки. Количество и активность ионов, достигающих поверхности инструмента, определяет интенсивность его износа. Очевидно, чем меньше будет износ инструмента, тем точнее можно получить деталь. Для этого стремятся сформировать импульс с меньшей длительностью, чтобы ионы не успевали достичь катода.

Полярность, при которой заготовка является анодом, называется прямой. Если увеличить длительность импульсов тока, то растет интенсивность съема металла с катода (инструмента) потоком ионов. Можно

подобрать такое время протекания тока, при котором доля съема металла электронами составит лишь незначительную часть от общего объема удаленного с электродов материала. Поэтому здесь необходимо катодом выбрать заготовку. Полярность, при которой анодом является инструмент, называется обратной. При электроимпульсном режиме – обратная полярность. Полярность зависит не только от длительности импульса, но и от используемых в качестве электродов материалов. Для снижения износа инструмента (от воздействия потока электронов) его выполняют из материалов, слабо разрушающихся под действием искровых разрядов: графитовых, медно-графитовых композиций.

Количественной оценкой износа является относительный зазор. Это есть отношение массы (объема) съема металла с инструмента к массе (объему) снятого металла с заготовки.

Стадии протекания.

Первой стадией эрозионного процесса является пробой межэлектродного промежутка в результате образования зоны с высокой напряженностью поля. Для диэлектрических жидкостей напряженность ( $E$ ) поля в момент разряда достигает десятков мегавольт на метр. Под действием разряда происходит ионизация промежутка, через который между электродами начинает протекать электрический ток, то есть образуется канал проводимости – узкая цилиндрическая область, заполненная нагретым веществом (плазмой), содержащим ионы и электроны. Через канал проводимости протекает ток, при этом скорость нарастания его силы может достигать сотен килоампер в секунду. На границах канала происходит плавление металла, образуются лунки сферической формы.

Второй стадией является образование около канала проводимости газового пузыря из паров жидкости и металлов. Вследствие высокого давления (до  $2 \cdot 10^7$  Па) канал проводимости стремится расшириться, сжимая окружающую его газовую фазу. Граница канала проводимости движется с высокой скоростью в радиальном направлении. На наружной границе образуется так называемый фронт уплотнения, в котором давление скачкообразно меняется от исходного в жидкости до высокого его значения на границе  $P_{\phi}$ .

Третьей стадией будет прекращение тока, отрыв ударной волны от газового пузыря и продолжение его расширения по инерции. Ударная волна гасится окружающей жидкостью.

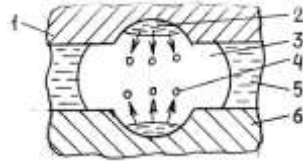


Рис. 4.9. Схема электрического разряда между электродами: 1 – катод; 2 – микропорция металла, выплавленная на поверхности катода; 3 – газовый пузырь; 4 – расплавленные частицы металла; 5 – рабочая жидкость – диэлектрик; 6 – анод

В начале этой стадии в зазоре (0,01...0,05 мм) находятся жидкий металл 2 в углублениях электродов 1 и 6; газовый пузырь 3, внутри которого имеются пары 4 металлов заготовки и инструмента; жидкий диэлектрик 5. Когда газовый пузырь достигнет наибольшего размера, давление внутри него резко падает. Содержащийся в лунках расплавленный металл вскипает и выбрасывается в межэлектродный промежуток.

Не всякий импульс, вырабатываемый генератором, вызывает эрозию электродов: так как велик зазор; мало напряжение; вынос твердых частиц из зазора затруднен и процесс может прекратиться. (Поэтому в крупногабаритных заготовках применяется принудительное прокачивание диэлектрика).

2. Система очистки и подачи рабочей жидкости в электроэрозионном станке.

Для повышения производительности, точности обработки и улучшения поверхности деталей целесообразно осуществлять прокачку рабочей жидкости через межэлектродный промежуток. Для этого предназначена гидравлическая система станка.



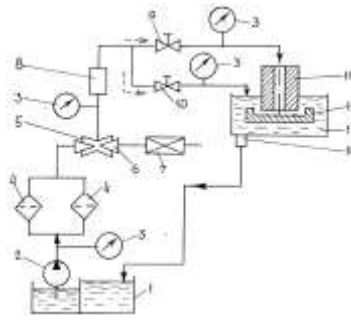


Рис. 4.10. Схема гидравлической системы станка:

1 – бак; 2 – насос; 3 – манометры; 4 – фильтр; 5 – устройство для регулирования расхода рабочей жидкости; 6 – заслонка; 7 – преобразователь; 8 – ротаметр; 9, 10 – краны; 11 – полый электрод-инструмент; 12 – заготовка; 13 – рабочая ванна; 14 – сливное отверстие

Рабочая среда из бака 1 подается насосом через фильтры 4 и устройство 5 регулирования расхода в рабочую зону. При этом возможны два варианта подачи рабочей среды: либо при открытом кране 9 через полый электрод-инструмент 11 в промежуток с заготовкой 12, либо через кран 10 непосредственно в рабочую ванну 13. Бак 1 состоит из нескольких секций для отстаивания рабочей среды. Секции разделены перегородками, через которые жидкость попадает методом перелива из одной секции в другую. Рабочая ванна 13 является частью силовой схемы станка – от ее жесткости зависит точность обработки деталей. В мелких станках ванна непосредственно крепится на столе, а рабочая жидкость периодически сливается в бак. В крупных станках ванна может подниматься и опускаться. Она всегда заполнена жидкостью.

Есть схемы с введением дополнительной емкости (по принципу сообщающихся сосудов), которая опускается и опорожняет рабочую ванну. Насос 2 чаще центробежного типа. Напор-5...10 м, производительность-2...180 л/мин. Если необходимо высокое давление, то используют шестеренные насосы ( $P=0,5...250$  МПа).

Фильтры 4 грубой и тонкой очистки стоят последовательно для задержки шлама:

- бумажные по несколько штук в пакете;
- намывные – со вспомогательными фильтрующими веществами – мелкопористые частицы с большой активной поверхностью;
- сетчатые;
- магнитные, центрифуги, сепараторы, гидроциклоны.

Устройство для регулирования расхода 5 рабочей среды. Оно выполнено в виде эжектора. При отведенной заслонке 6 жидкость отсасы-

вается из межэлектродного промежутка, а при закрытой заслонке 6 она прокачивается через зазор. Таким образом, регулируя положение заслонки 6 преобразователем 7, можно изменять расход рабочей среды через межэлектродный зазор.

В настоящее время выпускаются агрегаты снабжения и очистки рабочей среды, скомпонованные в одном корпусе. Они могут работать в автоматическом режиме по заданной программе или от адаптивной системы.

## **5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Что такое электроэрозионная обработка?
2. Кто был основоположником метода?
3. Какие технологические схемы ЭЭО применяются в промышленности?
4. В чем принципиальное отличие электроимпульсной установки от электроискрового станка?
5. Какие физические явления происходят на электродах при ЭЭО?
6. Перечислите стадии протекания процесса при ЭЭО?
7. От чего зависит производительность процесса ЭЭО и качество поверхности?
8. Какой ток используется при ЭЭО и его величина?
9. Какие диапазоны напряжения используют при ЭЭО?
10. Какое влияние на производительность процесса ЭЭО оказывает площадь обрабатываемой поверхности и глубина внедрения электрода-инструмента в заготовку?
11. Какие среды используют при ЭЭО?
12. Какие исходные данные должен иметь технолог перед началом проектирования процесса ЭЭО?

## **6. РАЗМЕРНАЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА**

Честь открытия новых способов обработки принадлежит русским и советским ученым. Известный русский химик Е. И. Шпитальный в 1911 г. разработал процесс электролитического полирования. В 1928 г. В. Н. Гусев применил этот процесс для размерной обработки станин крупных металлорежущих станков. Электролит не прокачивался. Катод-плиту на время убирали и ручным инструментом удаляли слой продуктов растворения. Процесс был трудоемким и медленным.

В. Н. Гусев и Л. А. Рожков предложили уменьшить зазор между электродами до десятых долей мм, а электролит принудительно прокачивать через межэлектродный промежуток. Это было рождением нового вида обработки – размерной электрохимической обработки (ЭХО) – за счет анодного растворения металла.

Полученные в годы войны результаты по изучению основных физико-химических закономерностей процессов не утратили своего значения и до сего времени. В 1948 г. была создана электрохимическая установка для изготовления отверстий в броневой стали. Тогда же были проведены первые опыты по обработке турбинных лопаток. Значительные успехи в развитии теории и совершенствовании технологии были достигнуты благодаря работам Ю. Н. Петрова, И. И. Мороза, Л. Б. Дмитриева и др. [1,2,4].

Существует несколько основных схем электрохимической обработки.

#### 1) Обработка с неподвижными электродами.

По этой схеме получают местные облегчения в деталях, отверстия в листовых материалах, наносят информацию (порядковые номера, шифры изделий и др.), удаляют заусенцы.

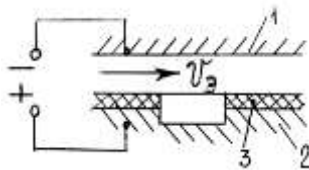


Рис. 6.1. Схема обработки с неподвижными электродами:  
1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка; 3 – диэлектрик

Требуемая форма углубления или отверстия получается за счет нанесения на заготовку 2 слоя диэлектрика 3. Электрод-инструмент 1 не перемещается к обрабатываемой поверхности – межэлектродный зазор по мере съема металла с заготовкой 2 возрастает, а скорость  $V_э$  прокачки электролита снижается. Процесс будет неустойчивым с нестационарным по времени режимом обработки.

#### 2) Прошивание углублений, полостей и отверстий.

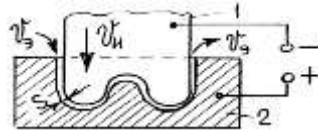


Рис. 6.2. Схема прошивания:  
1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка

При такой схеме электрод-инструмент 1 имеет одно рабочее движение – поступательное движение со скоростью  $V_n$  к детали 2. Межэлектродный зазор ( $S$ ) – постоянный, т. е. режим стационарный. Электролит прокачивается со скоростью  $V_s$ .

По этой схеме изготавливают рабочие полости ковочных штампов, пресс – форм, прошивают отверстия, пазы, перья лопаток турбин, вырезают заготовки различного профиля.

К такой схеме относят и получение отверстий струйным методом.

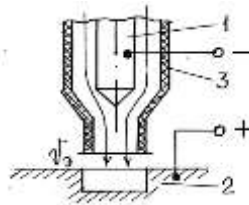


Рис. 6.3. Схема прошивания струйным методом:  
1 – электрод-инструмент (токопровод); 2 – заготовка;  
3 – диэлектрический корпус

Электрод-инструмент состоит из токопровода 1, омываемого потоком электролита. Токопровод находится внутри корпуса 3 из диэлектрика. Электролит создает токопроводящий канал между токопроводом 1 и заготовкой 2.

В месте контакта жидкости с обрабатываемой поверхностью материал заготовки растворяется и образуется углубление. Процесс идет достаточно быстро только при высоких напряжениях (до нескольких сотен вольт). Так получают отверстия диаметром 1,5...2,0 мм и вырезают контуры деталей сложной формы.

3). Точение наружных и внутренних поверхностей.

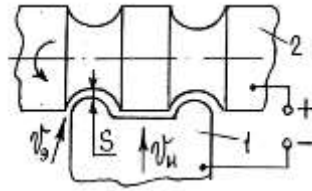


Рис. 6.4. Схема точения наружных поверхностей  
1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка

По такой схеме электрод-инструмент 1 выполняет роль резца, без контакта. В зазор  $S$  прокачивается электролит со скоростью  $V_в$ . При точении внутренней поверхности электрод-инструмент 1 перемещается вдоль заготовки 2 со скоростью  $V_п$ .

Межэлектродный зазор  $S$  может поддерживаться диэлектрическими прокладками 3.

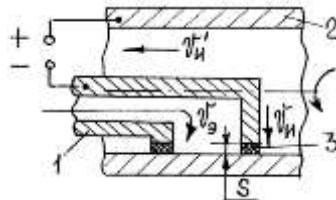


Рис. 6.5. Схема точения внутренних поверхностей:  
1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка;  
3 – прокладки диэлектрические.

4) Протягивание наружных и внутренних поверхностей в заготовках.

Заготовки должны иметь предварительно обработанные поверхности, по которым можно базировать электрод-инструмент. Его устанавливают относительно заготовки с помощью диэлектрических прокладок. Электрод-инструмент продольно перемещается (иногда вращается).

По такой схеме выполняют чистовую обработку цилиндрических отверстий, нарезание резьбы, шлицев, винтовых канавок.

5) Разрезание заготовок.

При разрезании заготовок используется профилированный инструмент (вращающийся диск) или непрофилированный-проволока.

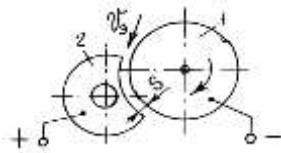


Рис. 6.6. Схема разрезания профилированным инструментом:  
1 – электрод-инструмент (диск); 2 – заготовка

При этой схеме зазор между инструментом-электродом и заготовкой должен быть постоянным.

Для выполнения в заготовках различных фигурных пазов, щелей особенно в нежестких материалах применяется непрофилированный инструмент-электрод в виде проволоки из латуни, меди или вольфрама.

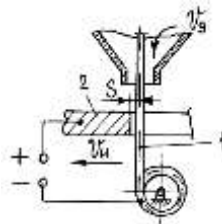


Рис. 6.7. Схема разрезания непрофилированным инструментом:  
1 – инструмент-электрод (проволока); 2 – заготовка

Для устранения влияния износа проволоки на точность обработки проволока непрерывно перематывается с катушки на катушку, что позволяет участвовать в работе все новым ее элементам.

#### б) Шлифование.

При этом используется вращающийся металлический инструмент цилиндрической формы, который поступательно движется вдоль заготовки 2 со скоростью  $v_u$ .

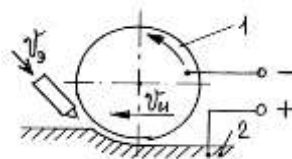


Рис. 6.8. Схема шлифования:  
1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка

Это окончательная операция при изготовлении пакетов пластин из магнитомягких материалов, когда при обработке недопустимы механические усилия, а также для изготовления деталей из вязких и прочных сплавов.

## 6.1. Теоретические основы электрохимического процесса формообразования (ЭХО)

### Законы электролиза М. Фарадея

Майкл Фарадей (1791–1867 гг.) – английский физик, основоположник учения об электромагнитном поле. В 1831 г. он выявил законы электромагнитной индукции, а в 1833...1834 гг. установил законы электролиза.

При ЭХО образующиеся при подключении обрабатываемой детали к положительному полюсу источника питания, положительно заряженные ионы металла отводятся от поверхности анода под действием электрического поля.

Электрическая ячейка состоит в основном из двух не контактирующих электродов, погруженных в электролит, между которыми имеется разность потенциалов.

Если условия электролиза выбраны правильно, прохождение тока через ячейку приводит к растворению материала анода со скоростью, определяемой согласно первому закону Фарадея:

– количество вещества, осажденного или растворенного при электролизе, пропорционально количеству пропущенного электричества

$$m = \varepsilon Q, \text{ г} \quad (6.1)$$

где  $m$  – масса материала, растворенного с анода, г;

$\varepsilon$  – коэффициент пропорциональности (электрохимический эквивалент);

$Q$  – количество электричества, пропущенное через электролит, Кл (А·с).

При использовании постоянного тока количество электричества находится из зависимости:

$$Q = I \cdot \tau$$

где  $I$  – сила тока, А;

$\tau$  – время его прохождения, с.

Тогда зависимость (6.1.) можно записать в виде

$$m = \varepsilon \cdot I \cdot \tau, \text{ г} \quad (6.2)$$

Электрохимический эквивалент ( $\varepsilon$ ) находится следующим образом

$$\varepsilon = \frac{A \cdot n}{F}, \quad \text{г}/(\text{А} \cdot \text{с})$$

где  $A$  – атомная масса элемента;

$n$  – валентность металла;

$F$  – число Фарадея, равное 96500 (это количество электричества, необходимое для растворения 1 грамма – эквивалента металла), Кл/г-экв. или 26,8 А·ч/г-экв.

Числовые значения  $\varepsilon$  для различных элементов приводятся в справочных материалах.

Электрохимический эквивалент  $\varepsilon_c$  любого сплава можно найти через эквиваленты  $\varepsilon_i$  входящих в него элементов и через массовое содержание, %, элемента  $k_i$  в сплаве.

$$\varepsilon_c = 100 / \sum \frac{k_i}{\varepsilon_i} \quad (6.3)$$

Количества различных веществ, осажденных или растворенных одинаковым количеством электричества, пропорциональны их химическим эквивалентам.

Объединенный закон Фарадея гласит, что масса материала в граммах ( $m$ ), осажденного или растворенного на электроде, пропорциональна произведению  $I \cdot \tau \cdot \varepsilon$ . Таким образом, обобщенный закон Фарадея можно записать так

$$m = I \cdot \tau \cdot \varepsilon / 26,8, \text{ г} \quad (6.4)$$

где  $\tau$  – время протекания тока, ч.

Поскольку каждый компонент сплава имеет свой электрохимический эквивалент, то соответственно и свою скорость анодного растворения.

Для практических целей необходимо знать скорость линейного растворения, которая позволяет найти скорость подачи инструмента при изготовлении деталей.

Из уравнения (6.1)  $m = \varepsilon \cdot \tau \cdot I$  массу материала, растворенного с анода, можно записать через площадь обрабатываемого участка  $S$  и перемещение электрода – инструмента  $\ell$  к детали:

$$m = S \cdot \ell \cdot \rho, \text{ г} \quad (6.5)$$

где  $\rho$  – плотность материала, г/см<sup>3</sup>.

Силу тока можно выразить через площадь участка  $S$  и плотность тока  $j$ .

$$I = S \cdot j$$



Тогда уравнение (6.2) примет вид

$$S \cdot \ell \cdot \rho = \varepsilon \cdot S \cdot j \cdot \tau, \text{ г.} \quad (6.6)$$

Если левую и правую части выражения (6.6) разделить на время  $\tau$ , то отношение  $\frac{\ell}{\tau} = V$  называется скоростью линейного растворения материала анода:

$$\frac{S \cdot \ell \cdot \rho}{\tau} = \frac{\varepsilon \cdot S \cdot \tau \cdot j}{\tau}; \quad V \cdot \rho = \varepsilon \cdot j$$

Таким образом  $V = \frac{\varepsilon \cdot j}{\rho}$ , см/с (6.7)

Плотность тока  $j$  по закону Ома может быть выражена через напряжение  $U$  и удельную проводимость  $\lambda_t$ , без учета потерь напряжения на электродах и в токоподводящих цепях.

$$j = \frac{U \cdot \lambda_t}{\ell}, \text{ А/см}^2 \quad (6.8)$$

где  $\ell$  – ход электрода, см.

С учетом формул (6.7) и (6.8) закон анодного растворения может быть записан в следующем виде:

$$V^1 = \frac{\varepsilon \cdot U \cdot \lambda_t}{\rho \cdot \ell}, \text{ см}^3/\text{с} \quad (6.9)$$

Если зазор не изменяется в процессе анодного растворения, то режим ЭХО стационарный. В формуле (6.9) учитывается действие только электрического поля. Не учитываются гидродинамические факторы, а именно принудительное удаление продуктов обработки принудительной прокачкой электролита.

Масса металла, растворимого с анода получается меньше, чем по формуле (6.2) закона Фарадея, так как количество электричества тратится на:

– побочные реакции на электродах; образование газов; вторичные реакции.

Эти потери учитываются коэффициентом  $\eta$  – выходом по току, поэтому

$$V^1 = \frac{\varepsilon \cdot U \cdot \lambda_1}{\rho \cdot \ell}, \text{ см}^3/\text{с} \quad (6.10)$$

$\eta$  – зависит от плотности тока, материала заготовки, скорости прокачки, температуры и степени защелоченности электролита.

Электролит – хлорид натрия:

- для конструкционных и низколегированных сталей  $\eta = 0,8 \dots 0,85$ ;
- для жаропрочных сплавов  $\eta = 0,85 \dots 0,93$ ;
- для титановых сплавов  $\eta = 0,83 \dots 0,85$ ;

Электролит – нитрат натрия:

- для большинства сталей  $\eta = 0,6 \dots 0,7$ ;
- для алюминиевых сплавов  $\eta = 1,1 \dots 1,35$ ;

Для нормального протекания электрохимических реакций необходимо обеспечить интенсивный вынос продуктов обработки из межэлектродного промежутка (из зазора), поэтому электролит должен иметь определенную скорость.

Электролит может иметь ламинарный или турбулентный характер течения. Вынос продуктов при турбулентном течении – быстрее! Однако расчет ламинарного потока значительно проще, поэтому в технологических расчетах принимают течение ламинарным!

Подбор электролита

От состава электролита зависят его электропроводность и скорость растворения металла. Для получения высоких технологических показателей процесса необходимо, чтобы:

- а) в электролите не протекали вовсе или протекали в минимальном количестве побочные реакции, снижающие выход по току;
- б) растворение заготовки происходило только в зоне обработки;
- в) на всех участках обрабатываемой поверхности протекал расчетный ток.

Таких универсальных электролитов не существует, поэтому при подборе состава электролита приходится в первую очередь учитывать те требования, которые являются определяющими для выполнения данной операции.

Для увеличения скорости растворения берут электролиты с большей удельной проводимостью, а для повышения точности лучше использовать электролит с пониженной проводимостью.

Электролиты подбирают в зависимости от обрабатываемого материала.

### Требования при подборе электролита:

1) Содержащиеся в водном растворе электролита анионы («–» – заряженные ионы) и катионы («+» – заряженные ионы) должны хорошо диссоциировать (разъединяться) при любых комбинациях.

2) Потенциал материала электрода – инструмента был более положительным, чем потенциал осаждения катионов. Это препятствует осаждению металлических катионов на электрод-инструмент.

Данное условие выполняется, если катионы электролита обладают большим отрицательным стандартным потенциалом.\*

(\* это потенциал, измеренный относительно нормального водородного электрода, на поверхности которого в стандартных условиях протекает обратимая реакция  $H_2 \leftrightarrow 2H^+ + 2e$ ).

3) Наличие в электролите активирующих анионов, разрушающих под действием тока поверхностные оксидные пленки. Это обеспечивает преимущественное протекание на аноде реакции растворения и высокую производительность.

4) Необходимо, чтобы сродство компонентов обрабатываемого сплава к анионам электролита и их сродство к кислороду были близки между собой. Это обеспечивает избирательность растворения сплава, высокое качество поверхности и точность обработки.

5) Соответствие концентрации анионов, имеющих близкое сродство к тому или иному компоненту обрабатываемого сплава, содержанию этого компонента в сплаве. Это позволяет достичь равномерного анодного растворения всей поверхности заготовки.

6) Обеспечение в ходе реакций в электролите перехода продуктов реакции анодного растворения в нерастворимое состояние. Это дает возможность постоянно удалять продукты обработки из раствора (например, отстоем, фильтрованием, центрифугированием) и поддерживать требуемый состав электролита.

7) Необходимо, чтобы электролит обладал невысокой вязкостью для облегчения прокачки и ускорения процессов тепло – и массопереноса в зазоре.

8) Электролит должен обладать невысокой коррозионной активностью к оборудованию, быть безвредным для здоровья, пожаро- и взрывобезопасным.

В качестве электролитов наиболее часто используют растворы неорганических солей: хлориды (калия хлорид); нитраты (азотнокислые

соли, производные азотной кислоты –  $\text{HNO}_3$  (калийная селитра  $\text{KNO}_3$ ); сульфаты натрия и калия – соли серной кислоты.

В растворы могут вводиться добавки:

– буферные вещества для снижения защелачивания электролита (борная, лимонная, соляная кислоты);

– ингибиторы (от латинского – удерживаю) коррозии (нитрит натрия); производные азотистой кислоты –  $\text{HNO}_2$ ;

– активирующие вещества, которые снижают пассивирующее действие оксидной пленки;

– поверхностно – активные вещества для снижения гидравлических потерь и устранения кавитации (моющая жидкость ОП – 7);

– коагуляторы – ускорители осаждения продуктов обработки (1...5 г/л полиакриламида).

Чаще используются следующие электролиты: 8...18% растворы хлорида натрия ( $\text{NaCl}$ ) и 15...20% растворы нитрата натрия ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

Для каждого электролита удельная проводимость может быть самой различной в зависимости от его состава, концентрации, температуры.

Для хлорида натрия наибольшая удельная проводимость при концентрации – 250 г/л, а для нитрата натрия – 210 г/л.

С увеличением концентрации электролита удельная проводимость растет, достигает максимума, а затем снижается, так как сильнее проявляется взаимное притяжение ионов, которое снижает их подвижность и возможность переноса зарядов.

С повышением температуры возрастает подвижность ионов и растет удельная проводимость

$$\lambda_t = \lambda_0 [1 + \alpha(T - 18)], \text{ 1/Ом}\cdot\text{см} \quad (6.11)$$

где  $\lambda_0$  – удельная электропроводность электролита при  $18^\circ\text{C}$ ,  $1/\text{Ом}\cdot\text{см}$ ;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления ( $\alpha = 0,0225$ );

$T$  – фактическая температура электролита,  $^\circ\text{C}$ .

В процессе ЭХО раствор необходимо подкислять до получения нейтрального состояния. Температура в помещении должна быть постоянной.

Гидродинамические процессы в межэлектродном промежутке.

В результате реакции на обрабатываемой поверхности заготовки образуются продукты обработки, в том числе нерастворимые гидроксиды. Их концентрация в районе протекания анодного растворения в начальный момент превышает концентрацию в электролите. Количество продуктов будет зависеть от скорости анодного растворения.

$$V = \frac{\eta \cdot \varepsilon \cdot \lambda_i \cdot U}{l \cdot \rho} \quad (6.12)$$

Если электролит протекает со скоростью ниже некоторого критического значения (менее 1...2 м/с), то он не успевает вынести из зазора все продукты обработки и скорость анодного растворения через некоторое время после начала процесса снижается.

Поэтому в каждый момент времени требуется обеспечить условие

$$V_s \geq V \quad (6.13)$$

Превышение скорости выноса частиц ( $V_s$ ) над скоростью их образования должно быть незначительным, иначе неоправданно увеличится мощность насосов для перекачки электролита.

Для каждого режима обработки должна быть своя скорость потока. Скорость растворения металла на разных участках различна, поэтому расчет ведут по максимальной скорости. Для нее определяют скорость электролита и находят требуемые напор и подачу насоса.

Средняя скорость электролита  $V_s$  может изменяться в широких пределах ( $V_s = 5 \dots 40$  м/с).

При таких скоростях критерий Рейнольдса  $Re$  может быть больше критического значения ( $Re \geq 2300$ ). Тогда поток жидкости будет турбулентным и рассчитанные скорости течения будут несколько завышенными.

Если длина участка по направлению потока электролита достаточно велика, то необходимо, чтобы температура электролита в зазоре оставалась постоянной. Это позволяет поддерживать расчетную удельную проводимость, определяющую точность обработки и другие технологические показатели процесса.

Вся теплота при анодном растворении заготовки переходит в раствор, а нагрев за счет гидравлических потерь пренебрежимо мало. Тогда можно приравнять количество теплоты, выделившейся по закону Джоуля–Ленца при прохождении тока, количеству теплоты, перешедшей в электролит

$$I \cdot U = C \cdot m_t \cdot \Delta T, \text{ Дж} \quad (6.14)$$

где  $C$  – удельная теплоемкость электролита, Дж/кг·град;

$m_t$  – массовый расход электролита через зазор, кг;

$\Delta T$  – разность температур электролита на выходе из зазора и на входе в него, град.

Силу тока  $I$  в левой части уравнения (6.14) запишем через его плотность  $j$  и площадь  $S$  обрабатываемой поверхности заготовки. В свою очередь  $S = B \cdot \ell_p$ , см<sup>2</sup>.

где  $B$  – ширина межэлектродного промежутка, см;

$\ell_p$  – длина рабочей части электрода-инструмента, см.

В правой части уравнения массовый расход выразим через объемный:

$$m_t = V_t \cdot \rho_3, \text{ г/с}$$

где  $\rho_3$  – средняя плотность электролита, г/см<sup>3</sup>.

$V_t$  – объемный расход электролита, см<sup>3</sup>/с.

Величина  $V_t$  представляет произведение скорости электролита  $V_3$  на площадь сечения зазора  $S^I$ .

$$S^I = B \cdot S^{II}, \text{ см}^2$$

где  $S^{II}$  – межэлектродный зазор, см.

Тогда уравнение (6.14) может быть представлено в виде:

$$U \cdot j \cdot B \cdot \ell_p = C \cdot V_t \cdot \rho_3 \cdot \Delta T = C \cdot V_3 \cdot B \cdot S^{II} \cdot \rho_3 \cdot \Delta T \quad (6.15)$$

Напряжение  $U$  запишем через плотность тока по уравнению (6.8)

$$U = j \cdot S^{II} / \lambda$$

или  $j = U \cdot \lambda / S^{II}$ , тогда  $j^2 \cdot \ell_p = C \cdot V_3 \cdot \rho_3 \cdot \Delta T$

Отсюда скорость электролита равна:

$$V_3 = \frac{j^2 \cdot \ell_p}{\lambda \cdot C \cdot \rho_3 \cdot \Delta T}, \text{ см/с} \quad (6.16)$$

Если инструменту придают вращательное движение, как при разрезании диском, точении, шлифовании, то электролит подают поливом. Он приобретает необходимую скорость за счет контакта частиц жидкости с вращающимся инструментом

$$V_3 = \kappa_n \cdot \pi \cdot D \cdot n, \text{ см/с.}$$

где  $\kappa_n = 0,18 \dots 0,5$  – коэффициент, характеризующий отставание частиц жидкости от инструмента;

$D$  – диаметр инструмента, см;

$n$  – частота вращения инструмента,  $\text{с}^{-1}$ .

По скорости электролита определяют характеристику насоса.

## Напряжение

При прохождении тока через токоведущие шины, электрод – инструмент, зазор и заготовку происходят потери

$$U_o = U + \Delta U_m + \Delta U + \Delta U_3, \quad \text{В}$$

где  $U$  – напряжение, используемое на анодное растворение металла заготовки (расчетное напряжение), В;

$\Delta U_m$  – потери напряжения в зажимах и токоведущих шинах, В;

$\Delta U$  – потери напряжения в двойном электролитическом слое – эти потери представляют собой разность потенциалов анода и катода, В;

$\Delta U_3$  – потери напряжения при прохождении тока через заготовку, В.

Потери  $\Delta U_m$  удастся снизить до долей процента и их, как правило, в расчетах не учитываются.

Потери  $\Delta U_3$  принимают во внимание для деталей больших размеров (лопатки энергетических турбин  $L > 1000$  мм и сечения профиля не более  $200 \dots 250$  мм<sup>2</sup>).  $\Delta U_3 = 4 \dots 5$  В и их следует учитывать в расчетах.

$$U = U_o - \Delta U$$

где  $U_o$  – напряжение на зажимах источника питания, В.

Потери  $\Delta U$  зависят от режима работы, состава металла заготовки и состава электролита, напряжения и др. факторов. ( $\Delta U = 2 \dots 5$  В). Нижний предел  $\Delta U$  в расчетах ограничивают значением, 5 В.

Для того, чтобы процесс анодного растворения шел интенсивно, необходимо повысить напряжение на электродах по сравнению с потенциалом разложения электролита. ( $\varphi_a - \varphi_k$ ).

Однако при  $U > 15 \dots 18$  В начинают возрастать потери в приэлектродных слоях – подводимая мощность растет быстрее, чем полезная.

При напряжении свыше 30 В могут возникнуть пробой межэлектродного промежутка.

Для большинства схем обработки используют диапазон напряжений  $9 \dots 18$  В.

Для титановых сплавов —  $U=25\dots30$  В, при разрезке материалов тоже  $25\dots30$  В, а при шлифовании —  $6\dots8$  В.

## 6.2. Электрохимическое формообразование

### 6.2.1. Копирование электрода – инструмента на заготовке

Точность копирования электрода – инструмента на заготовке зависит от скорости растворения участков заготовки, отстоящих на различных расстояниях от электрода – инструмента.

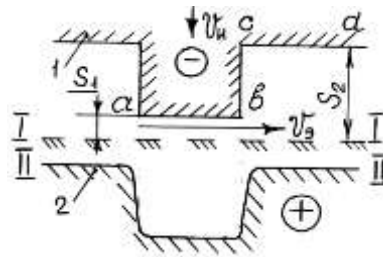


Рис. 6.9. Схема получения углубления при ЭХО:  
1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка

В начале процесса граница заготовки занимает положение I – I. На расстоянии  $S_1$  от нее расположен выступ  $ab$  электрода – инструмента, который перемещается к заготовке с такой скоростью  $V_u$ , чтобы сохранялся постоянный зазор  $S_1$ .

Через межэлектродный промежуток прокачивают электролит со скоростью  $V_3$ .

Если приближенно принять выход по току, удельную проводимость электролита и напряжение одинаковыми по всей длине зазора, то скорость анодного растворения материала под участками  $ab$  и  $cd$  согласно зависимости (6.10):

$$V_{ab} = \frac{\eta \cdot \varepsilon \cdot \lambda_i \cdot U}{\rho \cdot S_1}, \quad V_{cd} = \frac{\eta \cdot \varepsilon \cdot \lambda_i \cdot U}{\rho \cdot S_2}$$

Введем обозначение  $\kappa = \eta \cdot \varepsilon \cdot \lambda_i \cdot U / \rho$ , тогда скорость анодного растворения на участках  $ab$  и  $cd$  будет зависеть только от размеров межэлектродных зазоров между начальной границей заготовки и соответствующей поверхностью электрода-инструмента:

$$V_{ab} = \kappa / S_1, \quad V_{cd} = \kappa / S_2 \quad (6.17)$$



Как видно из рисунка 6.9 в начальный момент обработки зазор  $S_1 < S_2$ , следовательно, скорость растворения на участке  $av$  будет больше, чем на участке  $cd$  в  $S_2/S_1$  раз

$$V_{av}/V_{cd} = S_2/S_1 \quad (6.18)$$

По мере растворения металла заготовки и перемещения электрода — инструмента зазор  $S_2$  уменьшается, но остается справедливым условие  $S_2 > S_1$ , т. е. съем металла под выступом идет быстрее.

Через некоторое время в плоской заготовке будет получено углубление с границей II – II. Форма электрода-инструмента отобразилась на аноде, и достигнута размерная обработка.

То есть формообразование поверхности происходит по методу отражения (копирования).

### 6.2.2. Межэлектродный зазор

Как следует из уравнения (6.17) скорость анодного растворения и точность обработки тем выше, чем меньше межэлектродный зазор. Однако с уменьшением зазора усложняется процесс его регулирования, возрастает сопротивление прокачке электролита, может произойти пробой. Из-за увеличения газонаполнения при малых зазорах снижается скорость анодного растворения.

Следует выбирать такую величину зазора, при котором достигаются оптимальные скорость съема металла и точность формообразования. Для ЭХО отверстий и небольших полостей, лопаток газотурбинных двигателей, а также при разрезании заготовок устанавливают и поддерживают зазор 0,1...0,3 мм; для крупных полостей, лопаток энергетических машин, для схем протягивания и точения задают зазор — 0,3...0,5 мм; при струйном методе обработки расстояние между электродами выбирают в диапазоне 1...15 мм.

При ЭХО используется три способа регулирования зазоров.

1) При работе с неподвижными электродами зазор постоянно возрастает, скорость анодного растворения снижается. Режим является нестационарным.

2) При постоянной скорости подачи инструмента режим обработки с течением времени становится близким к стационарному.

3) При периодическом перемещении электрода — инструмента относительно заготовки через определенные промежутки времени отключают рабочий ток, подводят электрод — инструмент до контакта с заго-

товкой, затем отводят его на расчетное расстояние и вновь включают рабочий ток.

Время между циклами замеряется секундомером, поэтому изменение зазора во времени незначительно и в расчетах его можно принимать равным расчетному, а режим считать стационарным.

### Припуск на обработку

Чтобы получить деталь заданной формы, необходимо знать толщину слоя металла, удаляемого с заготовки, то есть припуск  $Z$ .

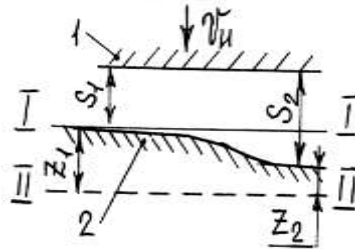


Рис. 6.10. Схема к расчету припуска на обработку:  
1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка

Припуск на заготовке 2 может изменяться в пределах допуска  $(Z_1 - Z_2)$ . При этом зазор также будет менять свой размер от  $s_1$  до  $s_2$ . Минимальный припуск рассчитывают в зависимости от допуска  $[\delta_{\text{дем}}]$  на деталь и глубины анодного растворения металла:

$$Z_{\min} \geq V_1 + [\delta_{\text{дем}}] \quad (6.19)$$

где  $V_1$  – съем металла на участке с минимальным зазором.

Минимальный припуск при обработке неподвижными электродами и протягивании составляет 0,1...0,3 мм в зависимости от его неравномерности (отношения его наименьшего значения к наибольшему). Допустимая неравномерность припуска по такой схеме – 0,4.

По схеме прошивания и разрезания минимальный припуск и его неравномерность не ограничиваются.

При точении и шлифовании с постоянной подачей минимальный припуск при зазоре до 0,5 мм изменяется в пределах 0,1...0,5 мм, а его неравномерность может быть не более 0,5.

## 6.3. Технологические показатели ЭХО

### 6.3.1. Точность обработки

Точность размеров и формы детали зависят от погрешности электрода-инструмента и от погрешности, вызванной отклонениями режима ЭХО от расчетного.

Кроме того, погрешность детали зависит от припуска на обработку, его неравномерности, стабильности процесса анодного растворения по обрабатываемой поверхности, точности оборудования.

В конце обработки погрешность детали  $\Delta_{дет}$  должна быть в пределах допуска  $[\delta_{дем}]$ , то есть  $\Delta_{дем} \leq [\delta_{дем}]$ .

Для идеального процесса ЭХО погрешность детали может быть представлена через погрешность заготовки  $\Delta_o$ .

$$\Delta_{дем} = \Delta_o - [Y_1(\tau) - Y_2(\tau)] \quad (6.20)$$

где  $Y_1$  и  $Y_2$  – съем металла в конце обработки на участках с зазором  $S_1$  и  $S_2$ ;

$\tau$  – время обработки.

Приближенно погрешность детали можно найти в предположении, что зазор

$$S_2 = S_1 + \frac{\Delta_o + \Delta_{дем}}{2} \quad (6.21)$$

Погрешность размеров детали зависит от начальной погрешности размеров заготовки, зазора и припуска на обработку.

Кроме того, рабочей поверхности электрода-инструмента придают форму, несколько отличающуюся от той, которую требуется получить в детали. Этот процесс называют корректированием электрода-инструмента.

Различные факторы неодинаково влияют на общую погрешность обработки:

- наибольшее влияние оказывает нестабильность электропроводности электролита, зазора, выхода по току – до 50%;
- отклонения от расчетного режима течения электролита – до 20%;
- упругие и температурные деформации – до 15%;
- погрешности настройки и установки – до 15% от общей погрешности.

### Пути снижения погрешности:

1. Форма исходной поверхности заготовки должна иметь минимальный припуск с минимальной его неравномерностью;

2. Уменьшение межэлектродного зазора; малые зазоры (0,02...0,05 мм) получают установкой на поверхности инструмента твердых упоров из изоляционных материалов (алмазных игл, абразивных зерен). Для схемы с неподвижными электродами – с периодической перестановкой электродов.

Одним из способов уменьшения межэлектродного зазора является применение импульсного напряжения. В период пауз удаётся добиться полного выноса продуктов обработки из зазора, стабилизировать температуру, состав электролита.

Импульсный ток используют одновременно с ускоренным сближением и отводом электродов.

Напряжение на электроды подают как в момент сближения электродов, отключая его непосредственно перед их касанием, так и во время отводов электродов после касания.

Или другой способ – чередуют включение напряжения и прокачки электролита, что позволяет стабилизировать режим ЭХО и избежать местных дефектов от неравномерного движения потока электролита.

3. Вибрация электродов применяется совместно с импульсным напряжением или при постоянном токе. Вибрация электродов может осуществляться параллельно или перпендикулярно направлению подачи как с одинаковой, так и с разной амплитудой колебаний по обоим направлениям.

4. Локализация процесса анодного растворения позволяет ограничить прохождение тока через участки заготовки, прилегающие к обрабатываемому, и за счет этого повысить точность формообразования;

5. Для чистовой обработки турбинных лопаток применяют растворы NaCl с малой массовой концентрацией (50...60 г/л). За счет малого количества ионов резко снижается степень рассеяния;

6. Введение в электролит воздуха и других газов под напором;

7. Применение локальной обработки заготовки отдельными секциями электрода-инструмента, на которые последовательно подают напряжение. Последовательность включения секций направлена против движения электролита, поэтому все продукты отработки удаляются из зазора, минуя работающую секцию;

8. Наиболее широко применяют локализацию обрабатываемого участка путем диэлектрических покрытий детали (например, с помощью фотохимии).

Если бы удалось получить одинаковые режимы обработки по всей обрабатываемой поверхности, то погрешность при изготовлении деталей любой сложности не превышала бы нескольких мкм.

Так при прошивании точных углублений желательно было бы иметь:

- нестабильность напряжения в пределах  $0,1 \dots 0,2$  В;
- скорость подачи электрода-инструмента – до 1%;
- электропроводимость электролита – 2%.

Стабилизировать параметры в указанных пределах практически не удается, так как они изменяются по длине зазора.

Наиболее сложно добиться постоянства проводимости электролита, которая зависит от температуры, количества газообразных продуктов обработки. Задача облегчается, если в зазоре отсутствуют газообразные продукты обработки.

Советскими учеными предложены электролиты, в которых водород в атомарном виде сразу вступает в реакцию – такие электролиты называются безводородными.

Это хлорид аммония, дихлорид железа, которые вызывают активную коррозию оборудования.

Удаляют газообразные продукты – отсосом по длине зазора (погрешность снижается в 2...3 раза).

Применение комбинированных способов обработки (электроалмазного, электроабразивного) с механической депассивацией поверхности также позволяет повысить точность ЭХО.

В настоящее время ЭХО позволяет получить:

- при обработке неподвижными электродами со съемом по глубине до 0,2 мм – погрешность не более 0,02 мм, при большей глубине – 0,03...0,050 мм;
- при прошивании мелких отверстий ( $\varnothing$  до 2 мм) – точность по 9...10 качеству ;
- при обработке полостей и разрезании – по 12...14 качеству;
- для схем точения точность – 8...10 качеству;
- при шлифовании металлическими, электроабразивными и электроалмазными кругами точность по 6...7 качеству.

### 6.3.2. Качество поверхности

В технологии машиностроения качество поверхности характеризуют:

- геометрическими (микрорельеф) показателями;
- физическими показателями (микротвердость, обезуглероженный слой) слоя материала, прилегающего к поверхности.

#### 6.3.2.1. Шероховатость

Формирование микрорельефа поверхности при ЭХО зависит от:

- структуры материала заготовки;
- состава материала; его температуры;
- скорости прокатки электролита;
- электрических параметров режима.

Все эти факторы постоянно меняются во времени и процесс анодного растворения в каждой точке протекает по-разному.

Если ЭХО выполняют после механической обработки, то в начале процесса анодного растворения микрорельеф повторяет профиль заготовки.

Характер микронеровностей зависит от структуры обрабатываемого материала. Чаще наблюдается межкристаллитное растравливание, так как зерна растворяются медленнее. Оно и определяет шероховатость поверхности.

Чем мельче зерно, тем меньше глубина межкристаллитного растравливания.

Глубина микронеровностей зависит от плотности тока. Для большинства сплавов с увеличением плотности тока шероховатость обрабатываемой поверхности снижается.

Чем ниже температура электролита (при той же плотности тока), тем меньше высота неровностей.

В большинстве случаев температура электролита равна 17...37°C. Для обработки титановых сплавов – 47°C; для чистовой обработки нержавеющей сталей – 4°C.

При обработке в электролитах на базе NaCl шероховатость поверхности различных материалов находится в следующих пределах:

- конструкционных сталей –  $R_a=0,32...0,1$  мкм;
- нержавеющей сталей –  $R_a=1,25...0,32$  мкм;
- титановых сплавов –  $R_a=2,5...1,25$  мкм;

– алюминиевых сплавов –  $R_a=2,5\dots0,63$  мкм.

### 6.3.2.2. Физические свойства поверхности

После ЭХО в поверхностном слое не наблюдается снижение содержания углерода и изменения твердости, отсутствует наклеп. Напряжения повышаются вследствие растравливания – есть концентрация напряжений, так как межкристаллитные углубления имеют меньше радиус закруглений.

Для уменьшения напряжений в поверхностном слое нужно повышать плотность тока, применять охлажденные электролиты, использовать импульсный ток, стабилизировать параметры электролита.

Выделяющийся водород в зазоре приводит к охрупчиванию поверхности и снижению усталостной прочности (особенно у титановых сплавов). Для выноса водорода скорость электролита должна быть не ниже расчетной.

### 6.3.2.3. Влияние качества поверхности после ЭХО на механические свойства материала

При эксплуатации деталей на них могут воздействовать статические, динамические (ударные) и циклические (знакопеременные) нагрузки.

Низкая шероховатость поверхности после ЭХО повышает механические свойства материалов, так как качество поверхности одинаково во всех направлениях.

Отсутствие же наклепа поверхности от воздействия инструмента снижает механические показатели, особенно сопротивление усталости.

Ухудшают качество поверхностного слоя микрорастравливание по границам зерен, которое является концентраторами напряжений и наводораживание сплавов.

Предел прочности при статических и ударных нагрузках образцов из конструкционных сталей после ЭХО при растяжении, сжатии, кручении и изгибе такой же, как у механически обработанных образцов.

У образцов из сплавов, склонных к межкристаллитному растравливанию (никелевых, титановых), предел прочности на растяжение и угол изгиба после ЭХО снижается на 10...15%, поэтому для деталей высоконагруженных конструкций после ЭХО необходимо механически удалять припуск на глубину растравливания:

- для никелевых сплавов припуск – более 0,15 мм;
- для титановых сплавов – более 0,3 мм.

#### 6.3.2.4. Сопротивление усталости

По значению предела выносливости образцы из конструкционных сталей и алюминиевых сплавов после ЭХО близки к шлифованным образцам. Детали из этих материалов после ЭХО можно использовать в конструкциях, работающих в условиях вибраций, знакопеременных нагрузках.

Детали из никелевых и титановых сплавов имеют пониженное сопротивление усталости (из-за растравливания...).

Одним из основных методов повышения механических свойств материалов после ЭХО является последующее полирование (виброполирование) для снятия растравленного слоя и выполнения наклепа.

ЭХО часто используют взамен точения, фрезерования, долбления, после которых шероховатость составляет  $R_z=20...40$  мкм. После ЭХО шероховатость –  $R_{a\leq}0,3$  мкм.

Полностью восстанавливает усталостные характеристики сплава его упрочнение после ЭХО – виброударным, пневмогидравлическим, дробеструйным и ротационными способами только с несколько меньшими усилиями и временем обработки.

#### 6.3.3. Производительность

Производительность процесса можно выразить через скорость подачи электрода-инструмента.

Производительность обработки при неподвижных электродах можно оценить средней скоростью растворения металла

$$V_{cp} = Z/\tau, \text{ мм/с} \quad (6.22)$$

где  $Z$  – припуск на обработку, мм;

$\tau$  – время процесса, с.

В зависимости от припуска и начального межэлектродного зазора средняя скорость растворения составляет:  $V_{cp}=0,001...0,01$  мм/с.

При схемах прошивания, разрезания, точения и шлифования на врезание производительность ( $Q$ ) оценивают скоростью подачи инструмента из уравнения



$$V_u = \frac{\eta \cdot \varepsilon \cdot \lambda_t \cdot U}{\ell \cdot \rho}, \text{ мм/с} \quad (6.23)$$

В зависимости от вида обрабатываемой поверхности скорость подачи лежит в пределах  $V_u = 0,005 \dots 0,1$  мм/с. Время обработки –  $\tau = Z/V_u$ .  
(6.23)

Если используется импульсный ток, то скорость подачи будет  $V_u^1 = V_u / g$ , мм/с.

где  $V_u$  – скорость подачи для постоянного тока, мм/с;

$g$  – скважность.

Для схемы прошивания круглых отверстий с концентричным расположением электрода-инструмента относительно детали скорость подачи вдоль обрабатываемой поверхности находят с учетом длины  $\ell_p$  рабочей части инструмента:

$$V_u = \frac{\ell_p}{\tau} \text{ мм/с.}$$

Подставляя выражение  $\tau$  из уравнения (6.22) получаем

$$V_u = \frac{\ell_p \cdot \eta \cdot \varepsilon \cdot \lambda_t \cdot U}{Z \left( S_o + \frac{Z}{2} \right) \cdot \rho}, \quad (6.24)$$

Для цельнотянутых труб с припуском до 0,5 мм на сторону  $V_u = 1,5 \dots 6$  мм/с.

### 6.3.4. Проектирование технологических процессов

#### 6.3.4.1. Исходная информация

- 1) Материал обрабатываемой заготовки (марка, плотность, структура, твердость, наличие неэлектропроводных включений);
- 2) Допуски на размеры (по чертежу детали);
- 3) Припуск на обработку, его минимальный размер и неравномерность;
- 4) Шероховатость поверхности детали и заготовки;
- 5) Размеры изготавливаемой детали и заготовки;
- 6) Анализ технологичности детали с учетом изготовления ЭХО;
- 7) Сведения о технологических возможностях процесса.

### 6.3.4.2. Технологичность деталей при размерной ЭХО

Для более полного использования преимуществ ЭХО необходимо проектировать детали с учетом особенностей процесса анодного растворения сплавов. Следует учитывать, что при ЭХО нет разделения на черновые и чистовые операции – при любом режиме ЭХО высота неровностей соответствует чистовым операциям механической обработки, и с возрастанием скорости съема металла шероховатость поверхности снижается. В отличие от механической обработки технологические показатели ЭХО даже повышаются с увеличением твердости материала заготовки. Кроме того, при ЭХО инструмент либо вообще не изнашивается, либо изнашивается незначительно.

При использовании ЭХО необходимо удовлетворить следующим требованиям, общим для всех видов заготовок и схем обработки:

1). Поверхность перед ЭХО должна быть очищена от окалины и других неэлектропроводных веществ.

2). В местах, где удаление металла планируют выполнить с применением ЭХО, не допускается местная зачистка поверхности, например, для контроля твердости.

3). ЭХО необходимо проводить после термической обработки заготовки. Это позволяет избежать нарушения точности за счет коробления при термической обработке, предотвращает появления обезуглероженного слоя в готовой детали.

4). При проектировании заготовок припуск не должен быть меньше некоторого предельного значения, определяемого с учетом возможного растворения на обрабатываемых и соседних поверхностях, где металл может раствориться за счет токов рассеяния и ускоренного съема на кромках детали.

5). В технологическом процессе не предусматривают операции и переходы по удалению заусенцев и округлению кромок на поверхностях после ЭХО. Существуют специфические требования к технологичности для каждой схемы обработки.

При схеме с неподвижными электродами съем металла интенсивно протекает не только в зоне обработки, но и на большом удалении от нее. Например, при удалении заусенцев с зубчатых колес профиль зуба со стороны торца утоняется на 10...30 мкм. Это не влияет на точность зацепления.

При схеме прошивания нужно допускать уклон поверхности по направлению подачи инструмента с уклоном  $\alpha=1...5^\circ$ .

При изготовлении посредством ЭХО больших сквозных отверстий их целесообразно прошивать тонкостенным трубчатым электродом – инструментом.

При электрохимическом точении необходимо предусматривать плавные переходы между участками с различными диаметрами.

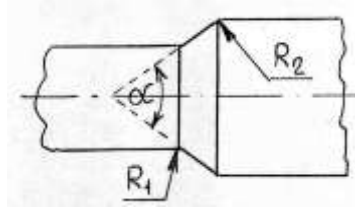


Рис. 6.11. Рекомендуемые плавные переходы между участками при точении

Угол  $\alpha$  выбирают в пределах  $45...80^\circ$ , радиус  $R_1=3...10$  мм,  $R_2=1...3$  мм.

При протягивании погрешность отверстий на концах детали выше, чем на средних участках. Поэтому следует указать в чертежах на концевых участках длиной  $l=5...30$  мм возможность увеличения внутреннего диаметра  $d$  на  $0,030...0,08$  мм (при внутреннем протягивании) или уменьшение наружного диаметра  $D$  на  $0,05...0,1$  мм (при наружном протягивании).

При обработке по схеме шлифования следует предусмотреть свободный выход круга за шлифуемую поверхность.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Кто является создателем метода электрохимической обработки (ЭХО)?
2. Какие технологические схемы используются при ЭХО деталей?
3. Какие классические законы используют при описании процесса ЭХО?
4. Какие химические реакции протекают на электроде-инструменте и заготовке в процессе ЭХО?
5. Каковы требования при подборе электролита?
6. Как определяют необходимую скорость прокачки электролита?
7. Как выбрать напряжение на электродах?
8. Что такое неравномерность припуска на обработку и какова его величина?

9. Каковы пути снижения погрешности обработки?
10. Какие электролиты называются безводородными?
11. Как влияет плотность тока на шероховатость поверхности?
12. Как влияет качество поверхности после ЭХО на механические свойства материалов?
13. Каковы основные пути повышения механических свойств деталей после ЭХО?
14. Какова последовательность построения технологического процесса ЭХО?

## **8. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ**

Введение. Ультразвуковые колебания (УЗ.) – это упругие волны, распространяющиеся в материальных средах (твердых телах, жидкостях, газах).

По частоте УЗ распространяются от верхней границы диапазона слышимости звуков ( $\approx 16 \cdot 10^3$  Гц) до частоты  $10^8$  Гц. Упругие колебания во всех диапазонах частот – звуковых и УЗ – подчиняются одним и тем же физическим законам, но в средах, где распространяются УЗ колебания, возникают специфические эффекты, которые во многих областях техники используются для интенсификации различных процессов.

УЗ применяют также как средство для получения информации при измерении глубины и для обнаружения дефектов в изделиях, он позволяет определять изменение химического состава вещества, вязкость полимерного материала. В медицине УЗИ – для определения пола новорожденного.

С помощью УЗ производят поверхностное упрочнение, размерную обработку, очистку, сварку металлических и неметаллических материалов, пайку, пропитку пористых материалов и тканей, прессование и спекание порошков, дегазацию и т. д.

Теоретические аспекты УЗ изучает акустика, которая как раздел физики получила значительное развитие уже в XIX столетии. Основы теории колебаний и нелинейной акустики были разработаны Дж. У. Релеем. Более глубокое исследование УЗ колебаний стало возможным после открытия эффекта магнитострикции (Дж. П. Джоулем) и пьезоэлектричества (П. Кюри).

Магнитострикция – способность ферромагнитных металлов и сплавов изменять размеры поперечного сечения и длину сердечника в

переменном магнитном поле. Материалы: никель, железокобальтовые сплавы (пермендюр), железоалюминиевые сплавы (альфер), ферриты и др. материалы.

При возникновении электромагнитного поля размеры поперечного сечения сердечника уменьшаются, а так как объем его остается постоянным, то длина сердечника увеличивается. При исчезновении поля первоначальные размеры сердечника восстанавливаются.

При УЗО используются колебания электромагнитного поля с УЗ частотой в пределах 18...44 (16...30) кГц. Амплитуда колебаний сердечника составляет 5...10 мкм. Для увеличения амплитуды колебаний к сердечнику крепят длинный тонкий стержень-концентратор (резонансный волновод переменного поперечного сечения), что позволяет получить амплитуду колебаний его торца до 50...80 мкм. К концентратору крепят рабочий инструмент-пуансон.

Благодаря исследованиям советской школы физиков-акустиков УЗ стал широко применяться в промышленности. В СССР группой исследователей под руководством А. И. Маркова впервые предложены методы интенсификации процессов резания металлическим инструментом и обработки электропроводных материалов при УЗ воздействии. (Большой вклад в развитие технологии и оборудования размерной УЗО внесли Л. Д. Розенберг, В. Ф. Казанцев, Д. Ф. Якимович, Б. Е. Мечетнер).

В конце 50-х годов XX века исследователи обнаружили, что если торец УЗ излучателя приблизить к поверхности сосуда, в котором находится абразивная суспензия, то поверхность в месте контакта торца излучателя с сосудом разрушается, причем форма полученного углубления повторяет рельеф торца излучателя. Это позволило создать новую разновидность размерной обработки [1].

## **8.1. Схема ультразвуковой обработки заготовок**

Существует несколько схем размерной обработки заготовок.

### **8.1.1. Размерная обработка заготовок из твердых хрупких материалов абразивными зёрнами, движущимися за счет действия УЗ инструмента**

Данный способ применяется для обработки стекла, керамики, сталей, кремния, германия, то есть для материалов, обработка которых другими методами затруднена.

Под пуансоном-инструментом 3 устанавливают заготовку 5 и в зону обработки под давлением подают абразивную суспензию, состоящую из воды и абразивного материала: карбида бора, карбида кремния или электрокорунда.

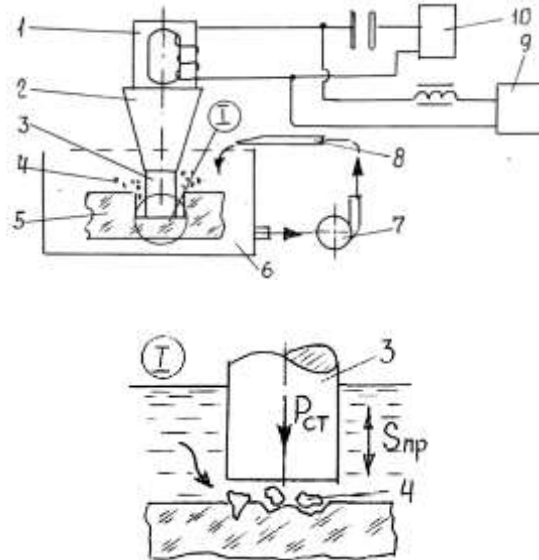


Рис. 8.1. Схема прошивания отверстий:

- 1 – УЗ преобразователь; 2 – концентратор; 3 – инструмент-пуансон;  
 4 – суспензия абразивная; 5 – заготовка; 6 – ванна; 7 – насос;  
 8 – патрубок; 9 – источник тока; 10 – генератор УЗ частоты

Инструмент поджимают к заготовке с силой 1...60 Н. Обработка заключается в том, что инструмент 3, колеблющийся с УЗ частотой, ударяет по зернам абразива 4, лежащим на обрабатываемой поверхности, со статической силой  $P_{ст} = 30...200$  Н; абразивные зерна скалывают частицы материала заготовки 5. Большое число одновременно ударяющихся абразивных зерен, а также высокая частота повторения ударов (до 30 тыс. раз в секунду) обуславливает интенсивный съем материала.

Кавитационные явления в жидкости способствуют интенсивному перемешиванию абразивных зерен под инструментом, замене изношенных зерен новыми, а также разрушению обрабатываемого материала.

Прокачивание суспензии насосом исключает оседание абразивного порошка на дне ванны и обеспечивает подачу в зону обработки абразивного материала.

Между пуансоном и заготовкой обеспечивают постоянный зазор 50...80 мкм.

Сообщая инструменту и заготовке различные виды подач (продольную, поперечную) и меняя профиль сечения инструмента, можно

прошивать глухие и сквозные отверстия, обрабатывать плоскости, углубления, пазы при прямом и обратном копировании, разрезать заготовки больших размеров, обрабатывать криволинейные и кольцевые пазы по копиру, производить шлифование и полирование.

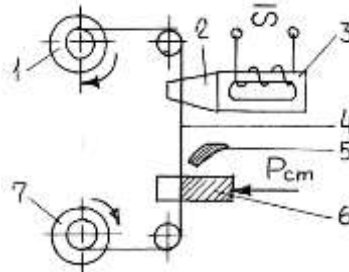


Рис. 8.2. Схема разрезки непрофилированным инструментом – тонкой проволокой:

1,7 – катушки; 2 – концентратор; 3 – преобразователь; 4 – проволока – инструмент; 5 – сопло для подачи суспензии; 6 – заготовка

Принцип работы следующий. Ультразвуковой концентратор 2, соединенный с преобразователем 3, возбуждает колебания в проволоке-инструменте 4, перематываемой с катушки 1 на катушку 7. Заготовка 6 прижимается с небольшим усилием  $P_{ст}$  к проволоке 4, а в зону их контакта подается абразивная суспензия из сопла 5.

По такой схеме производят контурное вырезание, обработку пазов и щелей, разрезание заготовок.

### 8.1.2. Интенсификация процессов резания при сообщении вынужденных УЗ колебаний металлическим или абразивным режущим инструментом

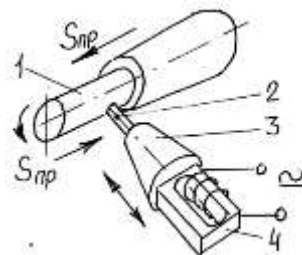


Рис. 8.3. Схема резания:

1 – заготовка; 2 – инструмент; 3 – концентратор;  
4 – УЗ преобразователь

На режущий инструмент 2 подаются УЗ колебания от концентратора 3, соединенного с УЗ преобразователем 4. Режущему инструменту

сообщается продольная подача. Заготовка 1 имеет продольную подачу и вращение. В место контакта инструмента и заготовки подается абразивная суспензия.

Такой способ используется при сверлении, зенкеровании, развертывании, нарезании резьб в труднообрабатываемых материалах; при точении и зубодолблении заготовок из вязких металлов, при шлифовании, абразивно-алмазной доводке.

Ультразвуковая обработка позволяет повысить производительность, качество поверхностного слоя, снизить силы резания и крутящий момент. (Например, при нарезании резьбы метчиками крутящий момент уменьшается на 25...50%).

### 8.1.3. Очистка шлифовальных кругов

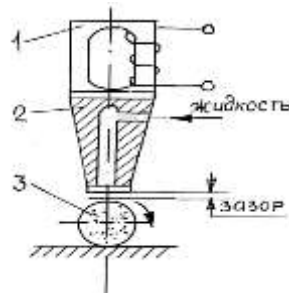


Рис. 8.4. Схема очистки:

- 1 – преобразователь; 2 – концентратор-инструмент;  
3 – шлифовальный круг

Колеблющийся с УЗ частотой инструмент 2, соединенный с УЗ преобразователем 1, располагается на некотором расстоянии от шлифовального круга 3.

В пространство между кругом и инструментом подается очищающая жидкость, в которой при воздействии на нее УЗ колебаний возникают эффекты, способствующие интенсивной очистке поверхности шлифовального круга от засаливания



### 8.1.4. Ультразвуковое упрочнение поверхности

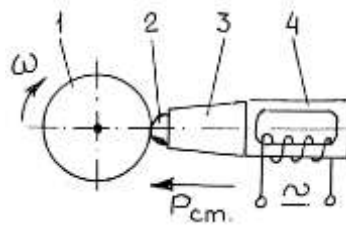


Рис. 8.5. Схема ультразвукового упрочнения:

1 – заготовка; 2 – инструмент; 3 – концентратор; 4 – преобразователь

Это чистовая обработка. Ультразвуковой инструмент 2 выполнен в виде шарика, который связан с концентратором 3 колебаний, поступающих от преобразователя 4.

Шарик 2 может быть жестко закреплен (припаян), но может и не иметь жесткого контакта с концентратором.

Инструмент прижимается с небольшим усилием  $P_{см}$  к вращающейся заготовке 1. Ультразвуковые колебания значительно снижают сопротивление пластической деформации поверхностного слоя заготовки 1, который приобретает наклеп.

Особенно эффективен этот способ при изготовлении нежестких тонкостенных деталей.

### 8.1.5. Обработка мелких деталей свободным абразивом

Данная схема применяется в основном для снятия заусенцев

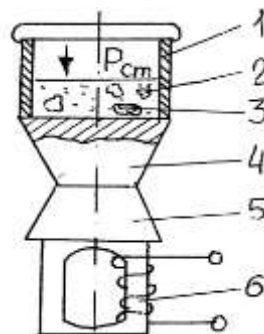


Рис. 8.6. Схема обработки свободным абразивом:

1 – ванна; 2 – абразивная суспензия; 3 – деталь; 4 – инструмент;  
5 – концентратор; 6 – преобразователь

Детали 3 помещаются в ванну 1, в которую заливается абразивная суспензия 2. Ультразвуковые колебания в жидкости возбуждаются ин-

струментом 4, торец которого служит дном ванны. Инструмент соединен с УЗ преобразователем 6 через концентратор 5.

Детали 3 находятся в жидкости во взвешенном состоянии. Для ускорения процесса к жидкости прикладывают статическое давление  $P_{ст}$ . Удаление заусенцев происходит в результате кавитационного разрушения и обработки абразивными зернами.

Чтобы спроектировать технологический процесс, рационально конструировать аппаратуру, необходимо знать физический механизм воздействия УЗ колебаний, уметь правильно подобрать, а при необходимости рассчитать УЗ преобразователь: рассчитать, спроектировать и изготовить рабочие инструменты.

## 8.2. Технологические показатели ультразвуковой обработки

### 8.2.1. Влияние технологических и акустических параметров на размерную обработку

Процесс ультразвуковой размерной обработки зависит от многих технологических параметров, как правило, взаимно влияющих один на другой – твердости и концентрации абразива, частоты и амплитуды колебания инструмента, его износа, статической нагрузки.

Каждый из этих факторов влияет на производительность и качество изготовления.

Материал заготовки в значительной степени определяет характер его разрушения. Все материалы по характеру деформации и разрушения при УЗО разделены на три группы. В основу этого деления положен критерий хрупкости –  $t_x$ . Это есть отношение сопротивления сдвигу к временному сопротивлению на разрыв.

Первая группа,  $t_x > 2$  – стекло, кварц, ситалл, керамика, германий, кремний, ферриты. При УЗО они практически не подвергаются пластической деформации.

Вторая группа,  $1 < t_x < 2$  – твердые сплавы; закаленные, цементированные и азотированные стали, сплавы титана и вольфрама. При УЗО наряду с упругими деформациями происходят и микропластические деформации. Чем большую роль играют пластические деформации, тем хуже обрабатываемость.

Третья группа  $t_x \leq 1$  – почти вся работа абразивных зерен расходуется на микропластическую деформацию поверхностных слоев; разрушения материала почти не наблюдается. Их нецелесообразно подвергать УЗО.

### Абразивная суспензия

Зерна абразива по твердости не должны уступать обрабатываемому материалу.

Обычно применяют карбид бора, который хорошо смачивается водой и благодаря сравнительно небольшой плотности удовлетворительно переносится жидкостью.

Карбид кремния, электрокорунд – применяются для изготовления деталей из стекла, германия.

Если производительность обработки стекла карбидом бора принять за единицу, то производительность обработки карбидом кремния – 0,8...0,85, а электрокорундом – 0,7...0,75.

В качестве жидкости обычно используют воду, обладающую малой вязкостью, удовлетворительной смачивающей способностью и хорошими охлаждающими свойствами. В воду добавляют ингибитор коррозии.

Использование добавок, оказывающих химическое действие на обрабатываемый материал – 15%-ного водного раствора сернокислой меди – повышает производительность обработки твердых сплавов в 1,7...2,5 раза.

Размер зерна абразива – ширина зерна под микроскопом. Уменьшение размера абразивных зерен вызывает снижение производительности (особенно если размеры зерна меньше амплитуды колебаний). С другой стороны, чем меньше зерно, тем выше точность изготовления.

### Концентрация абразива в суспензии

Оптимальная концентрация – по всей обрабатываемой поверхности укладывается один слой зерен абразива.

При большей концентрации (в несколько слоев) – увеличивается доля работы, идущей на измельчение самих зерен.

Амплитуда и частота колебаний инструмента определяют скорость продольных колебаний инструмента, то есть главного движения резания

$$V = \frac{4 \cdot f \cdot A}{10^3}, \text{ м/с} \quad (8.1)$$

где  $f$  – частота колебаний (16...30кГц);

$A$  – амплитуда колебаний инструмента, мкм.

Чем больше амплитуда и частота колебаний, тем выше производительность ( $Q_s$ ).

Оптимальная амплитуда колебаний инструмента связана со средним размером  $d_a$  абразивного зерна основной фракции.

При  $2A/d_a > 1$  происходит главным образом не внедрение зерен в обрабатываемую поверхность, а их дробление.

Если амплитуда колебаний мала, а зерна абразива крупнее  $2A/d_a < 0,5$ , импульс ударной силы, воздействующий на зерно, недостаточен для внедрения зерен в обрабатываемый материал и его разрушения.

Максимальная производительность достигается при условии  $2A/d_a = 0,6 \dots 0,8$ .

Предельно допустимая амплитуда колебаний ограничивается, кроме вышеизложенных соображений, усталостной прочностью материала инструмента и концентратора.

Статическая нагрузка. При УЗО инструмент прижимается к поверхности заготовки с постоянной силой  $P_{cm}$ . Эта сила (сила подачи) оказывает значительное влияние не только на значение ударных импульсов, но и на состояние зерен и концентрацию абразива под торцом инструмента.

Оптимальное значение  $P_{cm}$  зависит от площади и конфигурации инструмента, амплитуды, среднего размера зерен и свойств обрабатываемого материала.

Увеличение  $P_{cm}$  (в определенных пределах) приводит к увеличению импульса ударных сил и глубины внедрения зерен абразива, то есть к увеличению производительности.

С другой стороны, увеличение  $P_{cm}$  уменьшает расстояние между инструментом и обрабатываемой поверхностью заготовки и ухудшает условия поступления в рабочую зону свежего абразива и удаление из нее продуктов износа.

### 8.2.2 Точность размерной обработки

Точность УЗ размерной обработки, т. е. стабильность зазора между контурами изделия и инструмента, определяется многими факторами: геометрическая точность станка и его приспособлений, размер зерен абразива, твердость обрабатываемого материала, форма инструмента и размер поперечных колебаний.

Минимальная погрешность ограничивается предельными изменениями размера бокового зазора. Обычно этот размер в 1,5 раза больше среднего размера зерна абразива  $d_a$  основной фракции.

В основном изнашивается торец инструмента. Продольный относительный износ (отношение длины изношенной части к глубине обработанной полости, %) инструмента зависит главным образом от физико-механических свойств заготовки и материала инструмента, толщины стенок инструмента и зернистости абразива.

Поперечный износ происходит вследствие действия абразива, находящегося между боковой поверхностью инструмента и стенками обрабатываемого отверстия – на инструменте появляется конусность.

Особенно увеличивается поперечный износ при использовании кольцевого инструмента с толщиной стенки менее 1 мм. Оптимальная толщина стенки должна быть в пределах 1...1,5 мм.

Интенсивность износа увеличивается при плохих условиях подвода свежей абразивной суспензии и отвода продуктов обработки.

В то же время сила подачи  $P_{ст}$  и амплитуда не оказывают существенного влияния на его износ.

Чтобы уменьшить износ инструмента прежде всего необходимо подбирать материал, обладающий достаточной износостойкостью. Например, при обработке стекла инструмент должен быть из твердого сплава, а при обработке твердого сплава – из закаленной инструментальной стали.

Целесообразно выполнять инструменты с обратной конусностью или применять «грибковый» инструмент с калибрующей ленточкой высотой 1...3 мм. Причем диаметр калибрующей ленточки должен быть на 0,6...1 мм больше диаметра стержня инструмента.

За счет этого уменьшается сила трения..., улучшается циркуляция суспензии, хорошо удаляются продукты обработки.

Из-за поперечных колебаний инструмента происходит «разбивание» отверстия. Может исказиться и форма отверстия.

Обычно при строгой прямолинейности осей и соосности преобразователя, концентратора и инструмента, а также при точной выверке инструмента и заготовки некруглость отверстий, получаемых при чистовых операциях, не превышает 10 мкм (в неблагоприятных случаях – 30...60 мкм).

Разбивание отверстий возрастает с увеличением размеров абразивных зерен и глубины обработки.

Для уменьшения конусности сквозных отверстий их обрабатывают последовательно с двух сторон.

При сквозном прошивании, сверлении и разрезании используется инструмент, состоящий, из двух участков: черного и чистового (диаметр чистового больше диаметра черного участка).

При УЗ размерной обработке погрешность изготовления достигает 20 мкм.

### 8.2.3. Качество поверхности

Шероховатость поверхности при УЗО зависит от размеров зерен абразива, физико-механических свойств заготовки, амплитуды колебаний инструмента, шероховатости поверхности инструмента и типа жидкости, несущей абразив.

Наибольшее влияние на шероховатость оказывает зернистость абразива. Шероховатость пропорциональна зернистости.

Свойства обрабатываемого материала – структура (крупнозернистая) определяют шероховатость.

Чем выше амплитуда колебаний инструмента, тем более шероховатая поверхность получается при обработке.

Если в качестве жидкости, несущей абразив, применить вместо воды машинное масло, то шероховатость поверхности уменьшается, но производительность в несколько раз снижается, ухудшаются условия подвода и циркуляции абразива.

Шероховатость обрабатываемой поверхности зависит и от шероховатости рабочих поверхностей инструмента – неровности инструмента копируются на поверхности заготовки.

При чистовых операциях высота микронеровностей рабочих поверхностей инструмента должна быть в 2...3 раза меньше требуемой высоты микронеровностей детали.

Кроме шероховатости качество обработанной поверхности характеризуется ее структурным состоянием. При УЗО твердых сплавов и

закаленных сталей происходит упрочнение поверхностного слоя и появляются сжимающие остаточные напряжения.

При УЗО мелкими шлифпорошками (№3) и микропорошками при амплитудах колебаний 15...20 мкм шероховатость поверхности  $R_a=1,2...0,4$  мкм, а при доводке  $R_a=0,2$  мкм.

#### 8.2.4. Производительность размерной УЗО

Производительность УЗ размерной обработки зависит в первую очередь от амплитуды колебаний инструмента, физико-механических свойств обрабатываемого материала, состава и свойств абразивной суспензии и способа ее подвода, силы подачи, площади поперечного сечения инструмента, глубины обработки.

Она характеризуется скоростью съема материала заготовки и при постоянном поперечном сечении инструмента однозначно определяется скоростью подачи.

Производительность  $Q_s$  можно рассчитать по эмпирической формуле

$$Q_s = \psi (A^2 \cdot P_{ct})^a \cdot f^b, \text{ мм}^3/\text{мин} \quad (8.2)$$

где  $\psi$  – коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала и абразивной суспензии;

$A$  – амплитуда колебаний инструмента, мкм;

$P_{ct}$  – сила подачи, Н;

$f$  – частота колебаний, Гц;

$a$  и  $b$  – показатели степени, зависящие от условий обработки ( $a = 0,5...1$ ;  $b = 0,5...1$ ).

Чем выше твердость абразива и размер зерен, тем больше съем материала и производительность (учитывает коэффициент  $\psi$ ).

Оптимальная сила подачи подбирается обычно экспериментально и составляет при размерной обработке  $P_{ct} = 30...200$  Н.

Давление прижима инструмента  $P_{np} = P_{ct} / S$  составляет в среднем 0,1...1 МПа. Здесь  $S$  – площадь торца инструмента.

Производительность обработки зависит от глубины и площади обрабатываемого отверстия, что отражается в значениях показателей степени  $a$  и  $b$ .

Продольный и поперечный износ инструмента влияет на производительность (так как амплитуда колебаний уменьшается).

Амплитуда колебаний уменьшается и при увеличении площади инструмента. Если площадь больше, то хуже условия циркуляции абразива. Повысить производительность можно различными способами.

Улучшение условий циркуляции абразивной суспензии:

- периодически поднимать и опускать инструмент;
- подвод суспензии через полый концентратор;
- подвод суспензии фонтаном снизу;
- применение инструмента с кольцевыми и спиральными канавками на боковых поверхностях;
- применение инструмента с обратной конусностью;
- прокачка суспензии под давлением (0,1 ... 0,5 МПа);
- отсасывание суспензии;
- вращение заготовки или инструмента во время обработки;
- создавая эксцентриситет осей вращения инструмента и заготовки.

Увеличение скорости главного движения (продольных колебаний инструмента) за счет применения материалов с высоким сопротивлением усталости.

Для увеличения сопротивления усталости проводят: дробеструйный наклеп, гидрополирование, ультразвуковую обработку.

В настоящее время широко применяется ультразвуковая обработка алмазным инструментом.

## **9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. В чем заключается эффект магнитострикции?
2. Какие существуют типы УЗ волн?
3. Назовите основные схемы УЗО?
4. Каков механизм разрушения материала при УЗ размерной обработке свободным абразивом?
5. Для каких материалов целесообразно применение УЗ размерной обработки?
6. Как влияют УЗ колебания на упрочняющее-чистовую обработку?
7. Из каких элементов состоит УЗ колебательная система?
8. Чем ограничена максимальная амплитуда колебаний концентратора и рабочего инструмента при УЗО?



## 10. ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

Изобретение электронной лампы положило начало широкому использованию в науке и технике потоков электронов. В конце XIX века был разработан первый электроннолучевой осциллограф, в котором электронный луч использовался для воспроизведения на экране параметров различных быстропротекающих процессов. В 1904 г. профессор Петербургского университета Б. Л. Розинг разработал конструкцию электроннолучевого кинескопа. После изобретения в 1905 г. А. С. Поповым радио бурными темпами начали развиваться радиотехника, электроника, а затем телевидение и радиолокация.

В физике сформировалось специальное направление – электронная оптика, которое изучает вопросы получения электронных пучков требуемой конфигурации и интенсивности.

Необходимость создания электронных приборов привела к возникновению новой отрасли промышленности – электронной техники и способствовала развитию вакуумной техники и технологии.

В настоящее время электроннолучевая технология сформировалась как самостоятельное, обладающее широкими технологическими возможностями направление в области обработки материалов.

Электронный луч как технологический инструмент позволяет осуществлять нагрев, плавку и испарение практически всех материалов, сварку и размерную обработку, нанесение покрытий и запись информации.

Однако электронный луч как источник энергии не везде получил широкое распространение из-за высокой стоимости оборудования, в необходимости высокой квалификации обслуживающего персонала, в сложности средств обеспечения безопасности, создание глубокого вакуума (порядка  $10^{-6}$  мм рт. ст.) или  $10^{-3} \dots 10^{-4}$  Па [1].

Формирование электронного луча для технологических целей можно представить состоящим из следующих основных стадий:

- получение свободных электронов;
- ускорение электронов электростатическим или магнитным полем и формирование электронного пучка;
- изменение поперечного сечения электронного пучка (чаще для его фокусирования на обрабатываемой поверхности);
- отклонение электронного луча и обеспечение требуемой траектории перемещения точки его встречи с обрабатываемой поверхностью.

Для получения электронного луча и управления им применяются устройства, называемые электронными пушками.

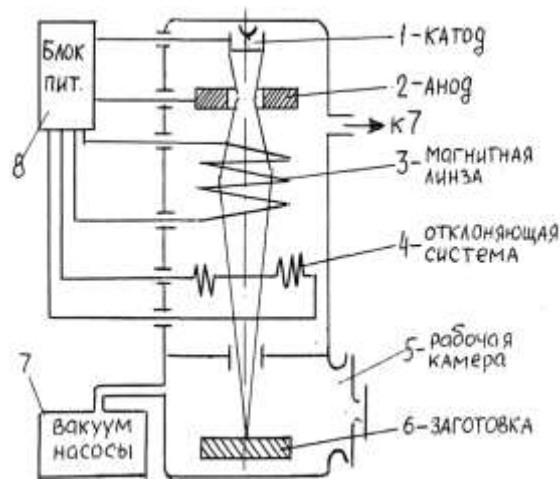


Рис. 10.1. Схема электроннолучевой установки

Источником электронов в установке является термоэмиссионный катод из вольфрама или тантала, обладающих высокими эмиссионными характеристиками. Его температура находится в пределах  $1600 \dots 2800 \text{ }^\circ\text{K}$ . Из-за тяжелых температурных условий срок службы катодов не превышает нескольких десятков часов.

На некотором расстоянии от катода находится анод 2, выполненный в виде массивной детали с отверстием.

Между катодом и анодом от специального высоковольтного источника питания 8 прикладывается ускоряющее напряжение  $30 \dots 150 \text{ кВ}$  (за счет генератора и импульсного трансформатора). Электроны ускоряются этим напряжением до значительных скоростей, большая часть их проходит через отверстие 2, и в заанодном пространстве они движутся по инерции.

Для фокусирования луча из потока в электронной пушке обычно используется система диафрагм и магнитных линз. Магнитная линза 3 представляет собой соленоид с магнитопроводом, создающий специальной формы магнитное поле, которое при взаимодействии с движущимся электроном смещает его траекторию в направлении оси системы.

В фокусе электронный луч может обладать весьма высокой плотностью энергии, достигающей  $5 \cdot 10^{12} \text{ Вт/м}^2$ .

В конструкцию электронной пушки обычно входит так же отклоняющая система 4, служащая для перемещения луча по обрабатываемой поверхности.

Электронная пушка обычно имеет две пары отклоняющих катушек, обеспечивающих перемещение луча по двум взаимно перпендикулярным направлениям.

Электронная пушка обычно выполняется в виде функционального блока, который крепится к рабочей камере 5.

Обрабатываемая заготовка 6 помещается в рабочую камеру 5, снабженную иллюминаторами для наблюдения за процессом обработки.

При малой площади обработки (менее  $10 \times 10$  мм) обычно достаточно перемещения луча, а заготовка может оставаться неподвижной.

## 10.1. Физические основы электроннолучевой обработки

### 10.1.1. Получение свободных электронов

Свободный, не связанный с атомом электрон можно получить, если сообщить атому избыточную энергию, поглощая которую электрон переходит на более удаленные от ядра орбиты и может при этом потерять связь с ядром.

Это происходит при нагреве металлов, которые при этом начинают испускать термоэлектроны.

Этот процесс называется термоэлектронной эмиссией. Для этого необходимо получить плотность тока на катоде порядка  $(0,1 \dots 1,5) \cdot 10^{-4}$  А/м<sup>2</sup>. При этом температура катода должна быть 2400...2700 °К. Чем больше температура, тем меньше срок его службы.

Для гексаборида 5 лантана  $\text{LaB}_6$   $T=1600 \dots 2000$  °К.

Помимо термоэмиссионных катодов применяют плазменные катоды, использующие электроны из плазмы газового разряда. Эти катоды не содержат накаливаемых элементов, более просты по конструкции и имеют значительно больший срок службы даже в самых тяжелых условиях эксплуатации.

### 10.1.2 Ускорение электронов

Для сообщения электронам необходимой энергии используют самый простой и наиболее распространенный способ – ускорение электронов электрическим полем.

На электрон в поле действует электростатическая сила

$$F = e \cdot E \quad (10.1)$$

где  $e$  – заряд электрона ( $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл(с·А));

$E$  – напряженность поля.

При движении в поле разность потенциалов  $U$  под действием силы  $F$  электрон приобретает энергию:

$$W = e \cdot U \quad (10.2)$$

Это приращение энергии электрона происходит за счет увеличения кинематической энергии (скорости) его движения:

$$e \cdot U = m_e \cdot (V^2 - V_0^2) / 2 \quad (10.3)$$

где  $m_e$  – масса электрона ( $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$  кг);

$V$  – конечная скорость электрона, км/с;

$V_0$  – начальная скорость электрона ( $V_0 = 0$ ).

Поэтому  $e \cdot U = m_e \cdot V^2 / 2$ , отсюда

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot U}{9,109 \cdot 10^{-31}}} = 593,2 \quad \text{км/с}$$

То есть при ускоряющем напряжении 1В скорость электрона составляет 593,2 км/с.

В электронных пушках ускоряющее напряжение может достигать  $2 \cdot 10^5$  В (200000 В).

Низковольтные системы ( $U = 15 \dots 30$  кВ) наиболее просты по конструкции и в эксплуатации и применяются в основном для операций, связанных с плавлением и сваркой различных материалов.

### 10.1.3. Управление электронным лучом

Электронным лучом можно управлять с помощью электростатических или магнитных полей. На практике шире распространены магнитные системы фокусировки и управления перемещением луча.

На движущийся в магнитном поле электрон, согласно законам электродинамики, действует сила

$$F = B \cdot V \cdot \sin \alpha, \quad \text{Н} \quad (10.4)$$

где  $B$  – магнитная индукция,  $T_{л} = B$  б/м<sup>2</sup>;

$V$  – скорость движения электрона, км/с;

$\alpha$  – угол между вектором скорости и магнитной силовой линией поля.

Под действием этой силы электрон будет двигаться в магнитном поле по окружности, перпендикулярной силовым линиям поля. Траектория движения электрона (под действием магнитного поля и инерционных сил) выглядит в виде спирали.

Создавая по оси электронного луча с помощью специальной магнитной системы-магнитной линзы – магнитное поле определенной формы, можно обеспечить сходимость траектории электронов в одной точке (фокусировку).

Для перемещения электронного луча по обрабатываемой поверхности обычно используют его взаимодействие со скрещенными поперечными магнитными полями, создаваемыми отклоняющей системой.

Благодаря малой массе электронов достаточно легко перемещать луч по обрабатываемой поверхности в широком диапазоне скоростей при любой форме траектории.

### 10.1.4. Вакуум как необходимый фактор электроннолучевой технологии

Электронный луч можно получить только в вакууме, так как за счет соударений с молекулами атмосферных газов электроны отдают им свою энергию и луч «рассеивается».

### 10.1.5. Взаимодействие электронного луча с веществом

В результате встречи потока электронов с обрабатываемым веществом кинетическая энергия движущихся электронов превращается в другие виды энергии.

Мощность, или плотность потока энергии, электронного пучка в месте встречи его с обрабатываемым материалом равна:

$$P = U \cdot I_{\lambda} \cdot \eta, \text{ Вт} \quad (10.5)$$

где  $U$  – ускоряющее напряжение, В;

$I_{\lambda}$  – сила тока луча, А;

$\eta$  – эффективный КПД нагрева.

Удельная поверхностная мощность луча в зоне его воздействия на вещество:

$$P_0 = P/S, \text{ Вт/м}^2 \quad (P_0 = 10^{12} \dots 10^{13}) \quad (10.6)$$

где  $S$  – площадь сечения луча на поверхности вещества.

При данном (max) значении  $P_0$  можно проводить размерную обработку материалов за счет их локального испарения.

При меньших значениях  $P_0$  (за счет расфокусировки луча) проводят плавку, сварку, нагрев в вакууме.

При ускоряющем напряжении  $U = 20$  кВ и удельной поверхностной мощности  $P_0 = 10^{10}$  В/м<sup>2</sup> за время  $\tau = 10^{-5} \dots 10^{-6}$  с в поверхностных слоях различных материалов развиваются следующие температуры (в скобках указаны  $T_{\text{кипения}}$ ), °К.

Al – (2593) 4423; Ti – (3773) 5313; нерж. сталь – (3323) 5373; Si – (2773) 6273; Ni – (3273) 7113; W – (5673) 15873.

Съем металла с обрабатываемой поверхности за счет его испарения и взрывного вскипания лежит в основе размерной электроннолучевой обработки.

Падающий на поверхность обрабатываемой заготовки электронный поток вызывает вторичную электронную эмиссию с обрабатываемой

мой поверхности и термоэлектронную эмиссию из разогретой зоны обработки.

Теряемая мощность при этом составляет 1%.

Давление потока электронов  $P_e$  (Па) на обрабатываемый материал определяется как отношение суммы импульсов к площади поверхности. Его находят по эмпирической формуле

$$P_e = 3,5 \cdot 10^{-6} \cdot j \cdot \sqrt{U}, \text{ Па} \quad (10.7)$$

где  $j$  – плотность тока в луче, А/м<sup>2</sup> ( $1,3 \cdot 10^{-4}$  А/м<sup>2</sup>);

$U$  – ускоряющее напряжение, В ( $U=20$  кВ).

Плотность тока в луче находится в пределах  $j = (0,1 \dots 1,5) \cdot 10^{-4}$  А/м<sup>2</sup>.

## 10.2. Основные технологические процессы электроннолучевой обработки

### 10.2.1. Особенности электронного луча

Главные достоинства электроннолучевой обработки с технологической точки зрения:

- 1) возможность за счет фокусировки луча плавно изменять в широких пределах удельную энергию в зоне нагрева;
- 2) большая мощность (от десятков ватт до мегаватт);
- 3) сравнительная простота управления пространственным положением луча с помощью магнитной системы и возможность модулирования луча по мощности;
- 4) наличие вакуума как рабочей среды;
- 5) возможность получения малоразмерной (прецизионной) зоны воздействия электронного луча на обрабатываемый материал.

Недостатки:

- 1) необходимость обеспечения высокого вакуума, что для ряда изделий трудно осуществимо;
- 2) сложность изготовления и эксплуатации электроннолучевого оборудования, дороговизна, должна быть защита от рентгеновского излучения.

Все основные технологические операции электроннолучевой обработки можно условно разбить на три группы:

- плавление (локальный переплав, плавка в вакууме, сварка);

- испарение (испарение в вакууме, размерная электроннолучевая обработка);
- термообработка без изменения агрегатного состояния вещества.

### 10.2.2. Локальный переплав

Он дает возможность получать чрезвычайно высокие скорости кристаллизации металла в зоне плавления.

Получаются другие структуры: расширяются границы растворимости для твердых растворов, измельчается микроструктура, значительно повышаются пластичность и твердость.

Быстрое остывание расплавленного металла приводит к последующей дополнительной закалке и за время  $\tau = 10^{-3} \dots 1$  с температурного цикла нагрев-охлаждение у закаливаемых сталей образуется структура мелкозернистого мартенсита с весьма высокой твердостью.

Включение этих зон в более пластичный основной металл повышает износостойкость поверхности.

Иногда такое поверхностное оплавление материала называют «облагораживающим» – исходный материал используют недорогой.

### 10.2.3. Электроннолучевая плавка

Она применяется в тех случаях, когда необходимо выплавлять особо чистые металлы, в том числе химически активные.

Электроннолучевая плавка позволяет получать более высокий перегрев жидкого металла в ванне и наиболее полно производить дегазацию металла, отгонку летучих примесей, удаление неметаллических включений (рафинирование).

Сплавы на основе Ti, W, Mo, Ni – выплавляют в вакууме.

Начиная с 60-х годов XX столетия все тугоплавкие и химически активные металлы выплавляются в электроннолучевых печах при давлении  $P = 10^{-1} \dots 10^{-4}$  Па получают слитки массой до 20 т.

Для выплавки стали имеются печи мощностью 1200 кВт, в которых получают слитки массой по 12 т. Они идут на изготовление валов и лопаток турбин, камер сгорания, высокоскоростных шарикоподшипников.

Переплавляемый металл может быть в любом виде: шихта, пруток, лом, спеченные штабики, губка.



### 10.2.4. Электроннолучевая сварка

Отличительной особенностью данной сварки является получение швов с глубоким проплавлением. Его называют «кинжальным». Такое проплавление дает возможность за один проход сваривать без разделки кромок заготовки толщиной до 100 мм.

Глубокое проплавление позволяет получать сварные соединения принципиально новой формы, которые нельзя получить другими способами, а именно: стыковое при большой толщине и тавровое.

Малый объем ванны расплавленного металла, получаемый при электроннолучевой сварке, резко снижает деформации сварных изделий.

Открывается возможность сваривать конструкции из уже окончательно обработанных деталей.

Возможна также сварка термообработанных изделий. Зона разупрочнения очень мала, что не сказывается на работоспособности изделия в целом.

Пример изготовления шевронного колеса. Сначала изготавливают два отдельных косоzubых блока с помощью пальцевой фрезы, а затем их сваривают. Их устанавливают в весьма ответственных конструкциях авиационных двигателей.

Изготовление толстостенных конструкций – проплавление глубиной до 200...300 мм (атомные реакторы, бойлеры электростанций).

Микросварка для соединения микросхем. Сваривают различные выводы и контактные элементы толщиной менее 0,3 мм и проводники диаметром 10...300 мкм.

Производство заготовок для ленточных пил. Ножовочное полотно из инструментальной стали высотой до 3 мм приваривается к вязкой конструкционной стали – основанию.

Сварка электронным лучом рассматривается как один из основных процессов для монтажа и ремонта в космосе различных конструкций и агрегатов. На высоте 200 км давление находится в пределах  $P = 10^{-4}$  Па

В 1969 году на «Союз–6» впервые были проведены эксперименты на установке «Вулкан».

### 10.2.5. Электроннолучевое испарение материала

Испарение материала из охлаждаемого тигля дает возможность получать тонкие пленки покрытия высокой чистоты, так как при этом почти полностью исключается реакция испаряемого материала с материалом тигля.

Можно осуществлять испарение разных веществ и из одного тигля, если в него подают материалы из нескольких бункеров.

Такими способами получают, например, тройной псевдосплав из 90% титана, 6% алюминия и 4% ванадия.

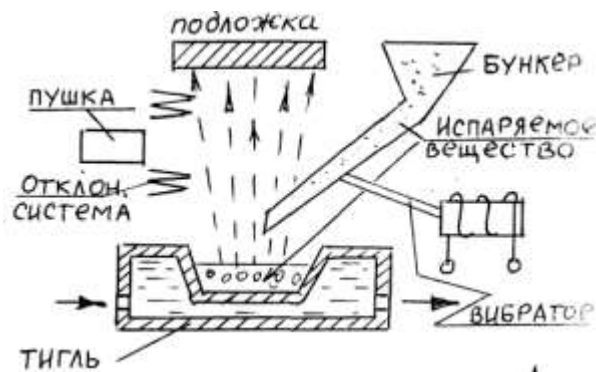


Рис. 10.2. Схема испарения материалов

Данная технология применяется в микроэлектронике, оптической промышленности

### 10.2.6. Размерная обработка электронным лучом

Чтобы получить точные размеры без оплавления краев необходимо:

– обеспечить строгое дозирование энергии электронного луча путем импульсного действия луча на поверхность, либо организовав перемещение луча по поверхности со строго заданной скоростью.

Таким образом, можно определить три режима размерной обработки:

- 1) Моноимпульсный, когда отверстие получают за время одного импульса.
- 2) Многоимпульсный.
- 3) Многоимпульсный с перемещением электронного луча по заготовке с определенной скоростью.

Параметры электроннолучевой размерной обработки связаны с физическими характеристиками материала заготовки (температурой плавления, теплоемкостью, удельной теплотой испарения, упругостью

пара) и не зависят от его механических свойств (прочности, твердости, пластичности).

Электронный луч нашел применение в первую очередь для размерной обработки твердых материалов – алмазов, кварца, керамики, кристаллов кремния и германия.

Образование полостей электронным лучом ведут в многоимпульсном режиме ( $\tau_u = 10^{-7} \dots 10^{-3}$  с) на глубину не более 15...20 мм. Лучшие образцы установок позволяют при глубине резания до 5 мм получать уклон стенок  $\alpha \leq 1^\circ$ .

Минимальная ширина реза может достигать 5...10 мкм.

Особой разновидностью размерной обработки является перфорация (получение мелких сквозных отверстий) различных материалов – металлические и керамические элементы фильтров, искусственную кожу – для воздушной проницаемости. При этом производительность составляет  $10^5$  отверстий в секунду.

Погрешность размеров всего  $\pm 5$  мкм. Шероховатость поверхности  $R_z = 5$  мкм.

При производстве искусственных волокон широко применяются фильеры из различных твердых сплавов, керамики, стекла. Выпускают фильеры диаметром до 30...50 мм при толщине 1...3 мм; они могут содержать до 500 отверстий. Поперечное сечение отверстий может быть разнообразным размером 20 мкм.

### 10.2.7. Термообработка

Закалка применяется для упрочнения лезвий инструмента из быстрорежущей стали (ресурс работы увеличивается в 2 раза).

Термообработка листового материала или фольги обычно проводится в специальных установках для получения материалов с покрытиями; их наносят в вакууме на обезжиренный и предварительно нагретый до 200...400°C металл.

Для равномерного нагрева материала обычно используют сканирование – (управляемое пространственное перемещение светового луча, пучка электронов) луча по обрабатываемой поверхности с помощью магнитной отклоняющей системы.

## 11. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие основные этапы формирования электронного луча?
2. Требования к катодам электронных пушек.
3. Принцип ускорения электронов в ... пушках.
4. Каким образом можно управлять положением электронного луча в пространстве?
5. Какова роль вакуума в электроннолучевой технологии и какова должна быть его величина?
6. В чем особенности взаимодействия луча с веществом?
7. Для каких целей используется электроннолучевой нагрев поверхности?
8. В каких областях применяют электроннолучевую плавку?
9. В чем основные особенности электроннолучевой сварки?
10. Где наиболее целесообразно применение электроннолучевого испарения?
11. Преимущества и недостатки размерной электроннолучевой обработки.

## 12. СВЕТОЛУЧЕВАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

Свет как источник энергии издавна привлекал к себе внимание человека. По мере развития науки и техники различные физические явления, связанные со световым излучением, находят все более широкое применение в научных и промышленных целях.

Создание волновой теории света и усовершенствование технологии изготовления оптических линз, стекол и зеркал позволили создать целый ряд разнообразных оптических приборов. Была установлена принципиальная возможность фокусирования светового потока на относительно небольших поверхностях и получение высоких удельных плотностей энергии, достаточных для нагрева и плавления различных материалов. В качестве источника светового излучения использовалось Солнце. Солнечная энергия, попадающая на земную поверхность (около  $40 \text{ Вт/м}^2$ ), стимулирует развитие различных способов ее преобразования в другие виды энергии (прежде всего в тепловую и электрическую).

Дальнейшее изучение физической природы светового излучения привело к открытию его квантового характера (фотон оптического излучения), что позволило осуществить новый подход к получению све-

товой энергии. В начале XX века у физиков сложилось мнение, что обычный полихроматический (многоцветный) свет (семь волн различной длины) может быть получен излучением различных тел или из электрического газового разряда.

В 1917 г. А. Эйнштейн высказал предложение, что световые волны строго определенной длины можно получить за счет индуцированного (вынужденного) излучения атомов и молекул вещества. [1].

Это было новое направление науки и техники – квантовая электроника. Она изучает различные эффекты, связанные с получением и применением электромагнитных колебаний оптического диапазона. Особую ценность представляет получение когерентного (монохроматического) света, то есть световой волны строго определенной длины.

В 1940 г. советский ученый В.А. Фабрикант впервые экспериментально подтвердил выдвинутое А. Эйнштейном положение об вынужденном излучении, а в 1952 г. был предложен (Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым) новый принцип генерации и усиления сверхвысокочастотных электромагнитных колебаний на основе использования вынужденного излучения.

Были созданы квантовые генераторы и усилители волн сантиметрового и дециметрового диапазонов, известные сейчас под названием мазеров.

В 1961 г. был разработан первый образец оптического квантового генератора (ОКГ), в котором в качестве рабочего тела был синтетический рубин.

Термин Лазер получился по первым буквам английского выражения: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (усиление света с помощью индуцированного излучения).

В 1961 г. был создан газовый лазер (рабочее тело – гелий+неон). Это наиболее мощные лазеры. С их помощью можно получить непрерывное излучение мощностью до сотен кВт. Затем появились полупроводниковые лазеры.

Рабочий диапазон излучения ОКГ охватывает область от ультрафиолетового с длиной волны 0,3 мкм до инфракрасного с длиной волны 300 мкм.

Лазеры нашли широкое применение (для передачи информации и связи, для измерения расстояний с большой точностью).

Особое место занимает лазерная технология – использование ОКГ для нагрева, плавления, испарения, сварки и резки материалов.

По плотности потока энергии (до  $10^{13}$  Вт/м<sup>2</sup>) лазер пока не имеет себе равных.

## 12.1. Физические основы получения и применения светолучевых источников энергии

### 12.1.1. Полихроматический свет и его использование для технологических целей

Обычное световое излучение – полихроматический свет – состоит из различных частот, лежащих в диапазоне видимой части спектра.

По длинам волн  $\lambda$  (мкм) диапазон светового излучения условно делится на несколько областей:

ИК	750...0,76 мкм
Красная	0,76...0,62 мкм
Оранжевая	0,62...0,59 мкм
Желтая	0,59...0,56 мкм
Зеленая	0,56...0,50 мкм
Голубая	0,50...0,48 мкм
Синяя	0,48...0,45 мкм
Фиолетовая	0,45...0,40 мкм
УФ	0,40...0,005 мкм.

Полихроматическое излучение возникает в результате нагрева тел. Это излучение происходит в виде отдельных порций – квантов или фотонов.

$$\text{Энергия фотона: } \varepsilon = h \cdot f, \text{ Дж} \quad (6.1)$$

где  $h=6,625 \cdot 10^{-34}$  – постоянная Макса Планка (1858...1947 гг.) – немецкого физика, в 1918 г. получившего Нобелевскую премию;

$f$  – частота излучения, Гц.

В обычных условиях атомы вещества излучают одновременно кванты различной энергии, так как переход электронов с одних орбит (с дальних на ближние) на другие не носит организованного характера.

Для применения энергии света для тех или иных технологических процессов требуется фокусировка луча; полихроматичность играет в данном случае отрицательную роль.

Так как волны разной длины имеют различный коэффициент преломления, то полихроматичный свет (проходя через линзу) фокусируется в виде пятна довольно значительных размеров.

Это явление носит название хроматической аберрации (отклонение от норм, искажение ...).

Диаметр светового пятна достигает сотен и тысяч мкм. В результате максимальная плотность энергии в пятне нагрева не превышает  $10^7$  Вт/м<sup>2</sup>, что соизмеримо с нагревом от пламени газовой горелки и в  $10^4 \dots 10^5$  раз меньше, чем для монохроматического луча лазера.

Система линз  $\varnothing 75 \dots 120$  мм не дает возможность получить в фокусе пятно диаметром менее  $1 \dots 2$  мм, а сферическое зеркало диаметром  $1$  м фокусирует солнечные лучи в пятно диаметром  $20 \dots 60$  мм.

В промышленности световую энергию используют от источников света в виде ламп накаливания или дуговых газоразрядных ламп. Их мощность до нескольких десятков кВт (в кварцевых корпусах).

Кварцевые лампы нагревают поверхности до температуры  $600 \dots 1200$  °К; газоразрядные (с системами фокусировки) – до  $1800 \dots 2000$  °К, что вполне достаточно для плавления ряда материалов.

### 12.1.2. Когерентное излучение

Если частота  $f$  и длина волны  $\lambda$  постоянны и не зависят от времени  $t$ , то волна монохроматична.

Если амплитуда, частота, фаза, направление распространения и поляризация электромагнитной волны постоянны во времени или изменяются по определенному закону, то такая волна когерентна.

Монохроматичная волна всегда когерентна, а когерентность двух немонахроматических волн означает, что они обладают одинаковым набором частот  $f$  и разность их фаз постоянна во времени.

Для монохроматического излучения теоретически достижимый диаметр сфокусированного луча составляет  $0,4 \dots 1$  мкм (но из-за отсутствия идеальной монохроматичности и когерентности луча этот диаметр несколько больше).

Получить когерентное световое излучение удалось средствами квантовой электроники.

### 12.1.3. Основная схема ОКГ

Любой ОКГ независимо от конструктивного выполнения содержит следующие основные элементы;

1) рабочее тело (вещество), состоящее из ансамбля атомов и молекул, для которых может быть создана инверсия населенности (неравновесное состояние вещества);

2) систему, позволяющую осуществлять инверсию;

3) оптический резонатор (струна, стержень), который служит для осуществления взаимодействия излучения с рабочим веществом и в котором происходит отбор энергии от ансамбля генерирующих излучение частиц;

4) устройство для вывода энергии из резонатора;

5) систему управления концентрацией энергии и пространственным положением полученного пучка света;

б) различные специальные системы, связанные с конкретным применением ОКГ.

Для инверсии населенности в ОКГ применяют следующие виды накачки:

– оптическую накачку за счет облучения вещества мощным световым потоком;

– электрическую накачку (прохождение через вещество электрического тока);

– химическую накачку, когда инверсия возникает за счет химической реакции, в которой принимает участие рабочее вещество.

В зависимости от режима ОКГ делятся на устройства, работающие в непрерывном и импульсно – периодическом режимах.



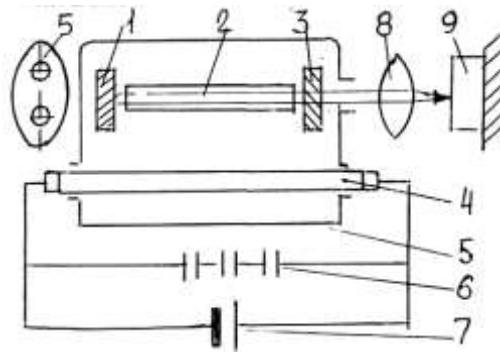


Рис. 12.1. Схема твердотелого ОКГ

- 1 – зеркало с плотным непрозрачным слоем серебра;  
 2 – рубиновый стержень; 3 – зеркало посеребренное (коэффициент пропускания света  $\sim 8\%$ ); 4 – газоразрядная лампа – вспышка;  
 5 – отражающий кожух с поперечным сечением в форме эллипса;  
 6 – высоковольтная батарея конденсаторов; 7 – источник питания;  
 8 – система оптических линз; 9 – заготовка.

Работа ОКГ основана на принципе стимулированного генерирования светового излучения.

Атом вещества, имея определенный запас энергии, находится в устойчивом энергетическом состоянии и располагается на определенном энергетическом уровне. Для выведения атома из устойчивого (стабильного) энергетического состояния его необходимо возбудить.

Возбуждение («накачку») активного вещества осуществляют световой импульсной лампой. Частота повторения импульса света лампы-вспышки зависит от времени зарядки батареи конденсаторов, а также от условий охлаждения стержня (рубинового) – резонатора.

Импульс света длится до  $10^{-6}$  секунд с интервалами между ними  $3 \cdot 10^{-6} \dots 10^{-3}$  с.

Возбужденный атом, получив дополнительный фотон от системы накачки, излучает сразу два фотона, в результате чего происходит своеобразная цепная реакция генерации лазерного излучения.

В твердом ОКГ рабочим элементом-веществом является рубиновый стержень, состоящий из окиси алюминия ( $Al_2O_3$ ), активированного 0,05% Cr (хрома).

Для рубина поглощаемая кристаллом мощность накачки составляет  $\sim 2$  кВт на  $1\text{ см}^3$  объема кристалла. Коэффициент использования световой энергии лампы-вспышки составляет 10...15%, поэтому ее мощность должна составлять десятки, а то и сотни кВт.

40...70% энергии, поглощенной стержнем идет на его нагрев. Чтобы генерация когерентного излучения не прекратилась, стержень нужно охлаждать (воздухом, водой или жидким азотом).

Начавшееся в рабочем теле (стержне) ОКГ излучение распространяется по всему объему стержня – резонатора и из-за многократного отражения от зеркал вовлекает в процесс генерации когерентного излучения все оптически активные атомы в направлении оси стержня.

Часть когерентного излучения выходит через полупрозрачное зеркало 3 из резонатора.

Спустя 0,5 микросекунды более половины атомов хрома приходит в возбужденное состояние, система становится неустойчивой и вся запасенная в стержне рубина энергия одновременно высвобождается и кристалл испускает ослепительный яркий красный свет – красная флюоресценция рубина-фотоны с длиной волны  $\lambda = 0,6943$  мкм.

Суммарная мощность рубинового ОКГ при энергии импульса лампы от 20 до 100 Дж и частоте их повторения до нескольких десятков герц может достигать десятков кВт (длина стержня при этом составляет 200...250 мм, диаметр 15 мм).

Эта энергия выделяется в миллионные доли секунды и сосредотачивается в луче диаметром 10 мкм за счет системы оптических линз. Что обеспечивает температуру в пределах 6000...8000°C.

В результате этого поверхностный слой материала заготовки 9, находящийся в фокусе луча, мгновенно нагревается и испаряется.

## **12.2. Технология светолучевой обработки материалов**

### **12.2.1. Технологические особенности излучения ОКГ**

Использование мощных ОКГ дает целый ряд технологических преимуществ, что и определяет их широкое применение.

1) Энергию в виде светового луча можно передавать на расстояние (по специальному световоду или через прозрачную разделительную перегородку).

2) Отсутствует механический и электрический контакт между источником энергии с изделием в месте обработки.

3) Высокая концентрация энергии в пятне нагрева простой фокусировке.

4) Можно плавно регулировать плотность лучистого потока в пятне нагрева за счет изменения фокусировки луча.

- 5) Высокие температуры в зоне воздействия излучения.
- 6) Можно получить импульсы весьма малой длительности (до  $10^{-9}$  с.), так и непрерывное излучение.
- 7) Малые размеры зон обработки (до нескольких мкм.).
- 8) Можно перемещать луч с высокой точностью и скоростью.
- 9) Мощность луча можно модулировать по требуемому закону.
- 10) Технологический процесс можно вести в любой оптически прозрачной среде.

### **13. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Кто является основоположником разработки ОКГ-лазера и когда?
2. В чем состоят основные достоинства и недостатки полихроматического света как источника энергии для технологических целей?
3. Какие основные физические принципы положены в основу работы ОКГ?
4. Как получают когерентное излучение с помощью ОКГ?
5. Какие вещества используются в лазерах для генерации излучения?
6. Как осуществляется накачка (возбуждение) энергией в твердотельных ОКГ?
7. Как производится вывод излучения из ОКГ?
8. С помощью чего осуществляется фокусирование излучения лазера?
9. Каковы основные особенности взаимодействия светового излучения с веществом?
10. Где наиболее целесообразно технологическое применение лазерного излучения?
11. Назовите основные достоинства и недостатки обработки материалов с помощью ОКГ.

### **14. ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА**

В 1923 г. американские физики Л. Тонкс и И. Ленгмюр предложили называть среду, в которой значительная часть молекул или атомов ионизирована-плазмой. Плазма является состоянием вещества, наиболее распространенном в космосе.

Плазму получают чаще всего в электродуговом разряде, в высокочастотном электрическом поле, с помощью энергии лазерного излучения.

Физические свойства плазмы – высокие значения температур, энтропия и электропроводность – позволяют осуществлять ряд интересных физических и технических проектов.

В атомной физике, например, «горячая» плазма с температурой выше  $10^6$  К рассматривается как средство проведения управляемых термоядерных реакций синтеза.

Функционируют ряд магнитогидродинамических (МГД) генераторов, в которых высокоскоростной плазменный поток служит для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую.

Существуют электрореактивные плазменные двигатели.

Плазма нашла применение в металлургии, в сварочном производстве.

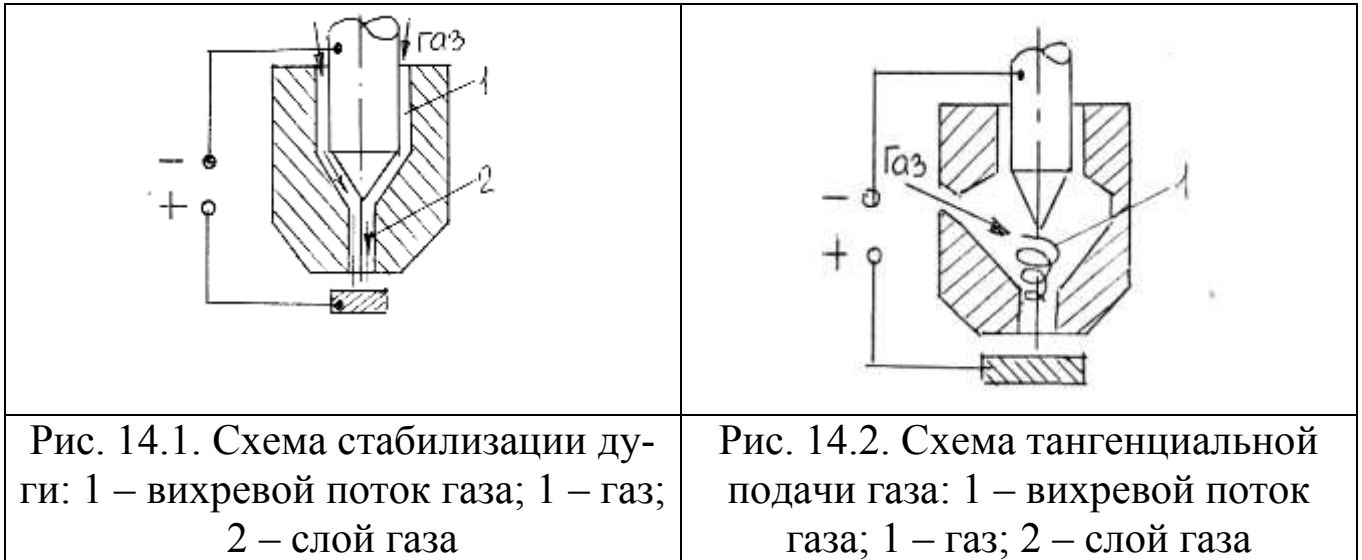
Для технологических целей используют так называемую «низкотемпературную» плазму с температурой  $10^3 \dots 10^5$  К, представляющую собой частично ионизированный газ.

Для получения плазмы разработаны плазмотроны или плазменные горелки.

В дуговых плазмотронах плазма с требуемыми характеристиками может быть получена при различных видах взаимодействия дуги с плазмообразующим газом: аргоном, гелием, азотом, водородом, кислородом и воздухом [1].

Стабилизация дуги в плазмотроне может осуществляться аксиальным потоком газа 1, создающим слой 2, ограничивающий столб дугового разряда.

При тангенциальной подаче газа в дуговую камеру плазмотрона стабилизация дуги достигается за счет вихревого потока 1 плазмообразующего газа.



Весьма эффективным способом стабилизации дугового разряда в плазмотроне и повышения его удельных энергетических характеристик является ограничение диаметра столба дугового разряда охлаждаемой стенкой.

Плазмообразующий газ, используемый в плазмотроне, в значительной мере определяет технологические возможности плазменной струи, и его нужно выбирать в зависимости от целей процесса.

Молекулярные газы – азот, водород, кислород и воздух позволяют увеличить эффективность нагрева за счет реакций диссоциации (разложения)-ассоциации (объединения). При этом происходит дополнительное поглощение теплоты в столбе дугового разряда.

При попадании на обрабатываемую поверхность плазмообразующий газ ассоциирует (превращается из атомного в молекулярный); при этом выделяется теплота, затраченная на его диссоциацию.

## 14.1. Основные физические характеристики и свойства плазмы

### 14.1.1. Степень ионизации плазмы

Это количественная характеристика, определяющая соотношение в плазме заряженных нейтральных частиц:

$$X = n/N \quad (14.1)$$

где  $n$  – концентрация в плазме заряженных частиц одного знака (ионов или электронов);

$N$  – число нейтральных молекул или атомов газа до его ионизации.

Степень ионизации плазмы зависит от многих факторов (прежде всего от температуры). Для низкотемпературной плазмы ее значение может меняться в широких пределах – 0...100 %.

### 14.1.2. Квазинейтральность

Квазинейтральность плазмы означает, что в определенном объеме число отрицательно заряженных частиц-электронов, равно числу положительно заряженных частиц-ионов, иначе должны возникнуть электрические поля, приводящие к перераспределению зарядов.

По мере снижения давления число частиц в объеме уменьшается и может наступить момент, когда количество частиц будет настолько мало, что условия квазинейтральности не будут выполняться.

Объем, где нарушается квазинейтральность плазмы, определяется дебаевским радиусом (от имени голландского физика П. Дебая):

$$r_D = \sqrt{\frac{T_e}{n}}, \quad (14.2)$$

где  $T_e$  – температура (электронная), К;

$n$  – концентрация электронов, см<sup>-3</sup>.

Если размеры рассматриваемой области плазмы больше дебаевского радиуса  $r_D$ , условие квазинейтральности выполняется ( $n_e \approx n_i$ ), то есть концентрации в плазме заряженных электронов и ионов равны.

Если же рассматривается объем плазмы радиусом  $r$  меньше  $r_D$ , в этом объеме плазму нельзя считать квазинейтральной.

Понятие квазинейтральности позволяет более четко определить плазму как форму вещества, в которой число электронов и ионов в объеме настолько велико, что даже небольшое нарушение равенства  $n_e = n_i$  невозможно из-за образования сильных электрических полей. В реальных плазменных устройствах, применяемых в технологических целях и в вакууме, величина  $r_D$  определяется значениями  $10^{-2} \dots 10^{-3}$  см.

### 14.1.3. Температура плазмы

Температура плазмы является важнейшей характеристикой, и в реальных плазмотронах она может достигать  $(2...5) \cdot 10^4$  К. В ряде случаев плазму можно рассматривать как идеальный газ, так как при высоких температурах концентрация частиц в плазме, несмотря на сравнительно высокие давления, мала и для нее можно считать справедливым уравнение идеального газа, в том числе основной закон газового состояния:

$$P \cdot V = R \cdot T \quad (14.3)$$

где  $p$  – давление газа, Па;

$V$  – объем, м<sup>3</sup>;

$T$  – температура, К;

$R$  – универсальная газовая постоянная, ( $R = 8,31$  Дж/моль·К).

Для плазмы это уравнение удобнее представить в следующей форме:

$$p = \frac{n \cdot R \cdot T}{N}, \quad (14.4)$$

где  $n = n_e + n_i + n_0$  – суммарная концентрация заряженных и нейтральных частиц в плазме;

$N$  – число Авогадро ( $N = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> – число молекул или атомов в 1 моле вещества).

Моль – количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг.

Авогадро закон, открытый в 1811 г. итальянским физиком и химиком, гласит – в равных объемах идеальных газов при одинаковых давлениях и температурах содержится одинаковое число молекул.

При рассмотрении плазмы как совокупности заряженных частиц различных знаков (электрон – «-» и ионов – «+») вводят понятие:

– электронной температуры –  $T_e$ ;

– ионной температуры –  $T_i$ .

Такой подход позволяет более детально рассмотреть энергию отдельных частиц, составляющих плазму.

В отличие от обычной газовой смеси, все частицы которой имеют одинаковую среднюю кинематическую энергию беспорядочного теплового движения, у электронов, ионов и нейтральных атомов эта энергия различна. При понижении плотности (давления) плазмы разница электронной температуры  $T_e$  и ионной  $T_i$  температур может достигнуть нескольких порядков.

Для плазмы, используемой в технологических устройствах, где давление достаточно велико и концентрация частиц, составляет более  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ , можно с достаточной для практических целей точностью считать, что  $T_e = T_i = T_a$ , то есть температуры всех частиц равны.

Такая плазма носит название термической.

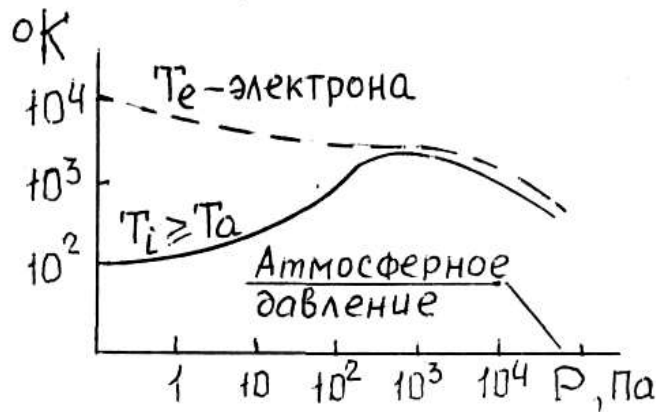


Рис. 14.3. Зависимость температур от давления (плотности плазмы)  
Энтальпия плазмы

Это важная энергетическая характеристика плазменной струи и зависит как от температуры, так и от рода применяемого плазмообразующего газа.

Энтальпия моноатомных газов увеличивается с повышением температуры благодаря повышению энергии теплового движения атомов газа и их ионизации.

У молекулярных газов в процессе нагрева энтальпия газа даже при сравнительно невысоких температурах резко возрастает за счет процесса диссоциации, а затем уже начинается повышение энтальпии за счет ионизации.

Поэтому для технологических процессов, когда не нужны очень высокие температуры (свыше  $10^4 \text{ K}$ ), в качестве плазмообразующих газов целесообразно использовать азот, водород, кислород и воздух.



Для получения более высоких температур необходимо применять плазму одноатомных газов (аргона, гелия).

На энтальпию плазменного потока сильно влияет расход плазмообразующего газа. Увеличение расхода газа приводит, как правило, к снижению эффективности теплопередачи от дугового или высокочастотного разряда к газовому катоду, и энтальпия газа уменьшается.

В технологических процессах используют водородно-азотную или водородно-аргоновую смесь газов, в которых объемное содержание водорода составляет 10...20 %.

#### 14.1.5. Виды плазменных источников энергии

При нагреве плазмой деталей передача энергии может осуществляться или только за счет процессов теплообмена нагретого газа с твердой или жидкой фазой (деталь электрически не связана с источником питания), или за счет суммарного действия теплообмена и электрического взаимодействия заряженных частиц плазмы с электродом-заготовкой.

В связи с этим в практике плазменной технологии сложилось три основных принципиальных схемы плазмотронов.

В двух схемах (рисунок 14.4 *а*, *б*) для получения плазмы используют электрический дуговой разряд; в схеме (рисунок 14.4 *в*) нагрев газа и образование плазмы осуществляется за счет безэлектродного (высокочастотного индукционного разряда).

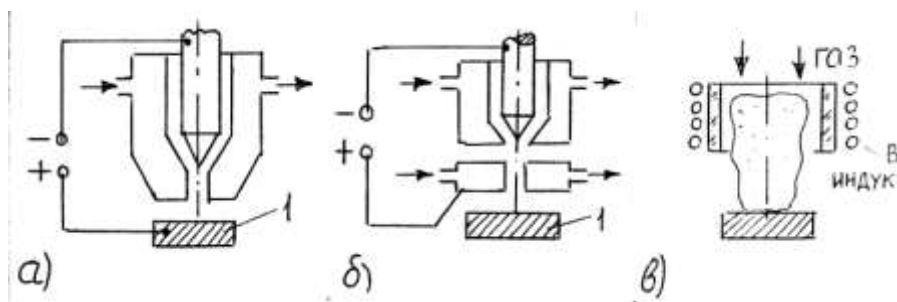


Рис. 14.4. Основные схемы плазмотронов

*а* – прямого действия; *б* – косвенного действия;

*в* – плазмотрон с высокочастотным индукционным разрядом

Схема (*а*) получила название плазменной дуги, а плазмотрон для ее получения – плазмотрон прямого действия. В схеме (*б*) изделие 1 гальванически не связано с электродом, поэтому схема называется

плазменной струей, а плазмотрон носит название плазмотрона косвенного действия.

#### 14.1.6. Характеристики плазменного источника

Основными характеристиками плазменного источника энергии является его эффективная тепловая мощность и коэффициент сосредоточенности, определяющий распределение удельного теплового потока по поверхности обрабатываемого изделия.

Для плазменной дуги эффективная тепловая мощность равна:

$$q = U \cdot I \cdot \eta_u, \text{ Вт}$$

где  $U$  – напряжение дуги, В;

$I$  – сила тока дуги, А;

$\eta_u$  – эффективный КПД процесса плазменного нагрева, учитывающий потери энергии при передаче ее к изделию.

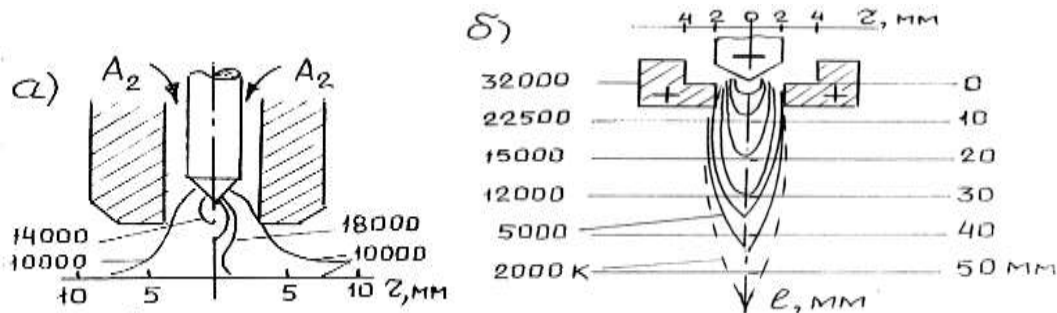


Рис. 14.5. Распределение температуры плазменной дуги (а) и плазменной струи (б) по радиусу  $r$  и по длине  $l$

Распределение температуры плазменной дуги и плазменной струи по радиусу ( $r$ ) и по длине ( $l$ ) крайне неравномерны. Максимальная температура наблюдается в центре на оси плазменного потока, причем она значительно выше, чем у открытой дуги.

Плотность теплового потока для плазменных источников энергии также выше, чем для открытой дуги, и достигает  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>.

Нагрев газа в плазмотроне приводит к резкому уменьшению плотности газа. За счет этого увеличивается скорость его истечения. Скорость потока максимальна в центре, где наблюдается максимальная температура и минимальный массовый расход газа  $\rho \cdot V^2$ . Максимальная

температура составляет 17000 °С, а максимальная скорость достигает 2 км/с.

Большая скорость потока плазмы при выходе его из плазмотрона позволяет получать значительный газодинамический напор, который растет с увеличением силы тока.

В большинстве случаев расход газа в плазмотроне превышает 1 л/с и течение горячего газа носит турбулентный характер.

Уменьшение расхода газа до значений менее 0,1 л/с позволяет получать ламинарные плазменные струи, которые отличаются большей длиной (до 0,4 м) и высокой стабильностью.

В потоке плазмы можно получить практически любое вещество в молекулярной или паровой фазе. Плазменный нагрев позволяет получать в паровой фазе нитриды и карбиды, оксиды тугоплавких металлов и неметаллы высокой чистоты. При этом можно значительно увеличить выход продуктов реакции по сравнению с другими способами проведения химических реакций.

Примером таких процессов может служить плазмохимическое получение абразивных материалов на основе бора, осаждение на рабочей поверхности металлорежущего инструмента нитрида титана и т. д.

## **14.2. Технология плазменной обработки**

### **14.2.1. Плазменный нагрев**

Нагрев деталей и материалов до невысоких температур (ниже точки их плавления) с помощью плазменных горелок используется сравнительно редко, однако в последнее время все чаще применяется плазменно-механическая обработка металлов, где осуществляется такой нагрев. Сущность метода состоит в том, что при обработке, например, резанием высокопрочных металлов и сплавов перед резцом устанавливается плазмотрон, нагревающий узкую зону обрабатываемого материала.

Прочность снижается, а пластичность повышается. Можно без ущерба для качества поверхности увеличить глубину резания и подачу. Нет окисления поверхности.

Применение плазменного нагрева при обточке цилиндрических заготовок диаметром 100...350 мм из жаропрочных никелевых сплавов, вольфрама и молибдена показало, что производительность обработки

увеличивается в 6...8 раз при уменьшении износа резцов в 5...6 раз. Скорость съема металла при этом может достигать 3...4 кг/мин.

Плазменный нагрев до более высоких температур может приводить к оплавлению шероховатостей механически обработанной поверхности, улучшая тем самым технологические показатели.

### 14.2.2. Плавление вещества

Плавка металлов и сплавов, а также неметаллических материалов с использованием плазменного нагрева получило широкое распространение. Данный способ отличается высокой стабильностью, простотой и гибкостью технологического процесса. Плазменная плавка позволяет использовать самые различные среды и исходные материалы при минимальных потерях легирующих компонентов.

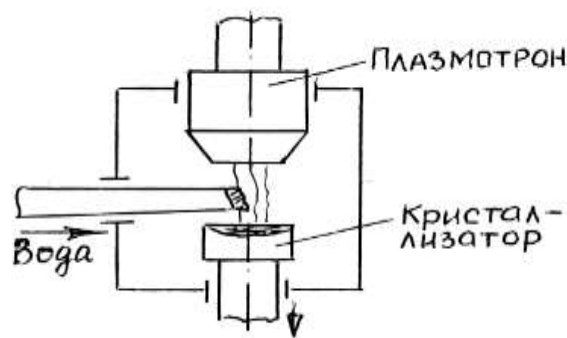


Рис. 14.6. Схема печи для плавки в водоохлаждаемый кристаллизатор

Наиболее распространена схема печи для плавки в водоохлаждаемый кристаллизатор. В таких печах обычно выплавляют сложнолегированные сплавы, например, инструментальные сплавы. При этом, благодаря небольшому содержанию в металле неметаллических включений в виде оксидов и кислорода, его механические свойства (особенно пластичность) заметно повышаются.

Плазменный нагрев используется также для плавки металла с последующим измельчением расплава и кристаллизацией его в виде малоразмерных капель.

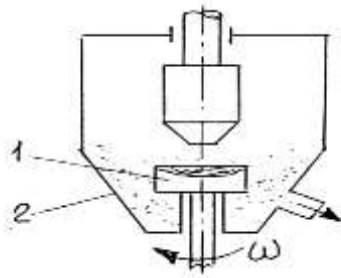


Рис. 14.7. Схема плавки с получением малоразмерных капель:  
1 – тигель; 2 – кристаллизатор

Плазменный нагрев используется также для плавки металла с последующим измельчением расплава и кристаллизацией его в виде малоразмерных капель.

В дальнейшем этот материал применяют как исходный продукт порошковой металлургии, для наплавки и т. д.

Измельчение металла чаще всего получают разбрызгиванием расплавленного металла при вращении тигля 1. Попадая на холодные стенки кристаллизатора 2, капли жидкого металла затвердевают и в виде гранул собираются на дне камеры, причем большая скорость охлаждения расплавленного металла позволяет получать неравновесные структуры со специфическими свойствами.

### 14.2.3. Сварка и наплавка

Сварка с использованием плазменных источников энергии применяется все шире, так по сравнению с обычной свободно горящей электрической дугой удается получить большую глубину проплавления и меньшую ширину шва и, соответственно, более узкую зону термического влияния. Процесс идет с большей скоростью при улучшении качества сварного шва.

Плазменной сваркой за 1 проход сваривают детали толщиной до 20мм, что дает возможность существенно повысить производительность процесса, уменьшить возникающие при сварке деформации и получить в конечном счете более работоспособное сварное соединение.

Микроплазменная сварка является разновидностью процесса плазменной сварки и характеризуется силой тока плазмы порядка 0,1...10 А. Толщина свариваемых заготовок обычно составляет 0,025...1,0 мм (фольга) – другими методами невозможно сварить (детали радиоэлектронной техники).

Плазменная наплавка используется для нанесения на обрабатываемые заготовки поверхностных слоев (чаще всего из металлов и сплавов, отличных по составу от материала подложки) с целью повышения эксплуатационных свойств деталей. Для наплавки обычно применяют материалы со специальными свойствами (высокой твердостью, повышенной износостойкостью, коррозионной и термостойкостью).

Наплавка позволяет получать изделия из дешевых конструкционных материалов с рациональным распределением свойств по отдельным элементам.

При этом значительно снижается расход дорогостоящих легирующих материалов. Толщина наплавленных за 1 проход слоев может достигать 4...5 мм; возможно многослойная наплавка.

Наплавку проводят плазменной струей, что дает возможность регулировать глубину проплавления основного металла посредством изменения расстояния между горелкой и заготовкой. Чтобы обеспечить защиту ванны расплавленного металла от взаимодействия с атмосферными газами, в качестве плазмообразующих газов используют аргон и водород.

Наплавка рабочих лезвий инструментов позволяет экономить дефицитные и дорогостоящие инструментальные стали (P18, P6M5). Масса наплавленной инструментальной стали (на обычную углеродистую сталь) обычно не превышает 4...5 % от общей массы инструмента.

С помощью плазменной наплавки в ремонтных целях восстанавливают дорогостоящие узлы и детали (штампы, пресс-формы, валки и т. д.) металлообрабатывающего оборудования.

#### 14.2.4. Напыление

Существует две основные разновидности процесса:

- подача материала в плазмотрон в виде прутка или проволоки;
- подача материала в плазмотрон в виде порошка (оксиды, нитриды, карбиды).

Плазменным напылением обычно получают слой малой толщины ( $10^{-6} \dots 10^{-3}$  м).

Металлические покрытия, получаемые с помощью плазменного напыления, чаще всего состоят из вольфрама, молибдена, никеля, кобальта и др. металлов и сплавов с достаточно высокой температурой плавления.

Производительность процесса может достигать нескольких кг напыляемого материала в час, а плотность напыляемого слоя составляет обычно 80...90 % от плотности монолитного металла. Тонкие (до 0,1...0,3 мм) напыленные слои имеют большую плотность и лучшее сцепление с напыляемым подслоем, чем более толстые.

Покрyтия по назначению бывают разными: жаростойкие, коррозионостойкие, защитные. Для последних используют оксиды алюминия и циркония.

Напыление повышает стойкость кокилей, изложниц для литья; износостойкость фильер для протягивания (волочения) молибденовых прутков при напылении увеличивается в 5...10 раз.

Одной из разновидностей процесса плазменного напыления является ионная технология нанесения покрытий с помощью плазменных ускорителей.

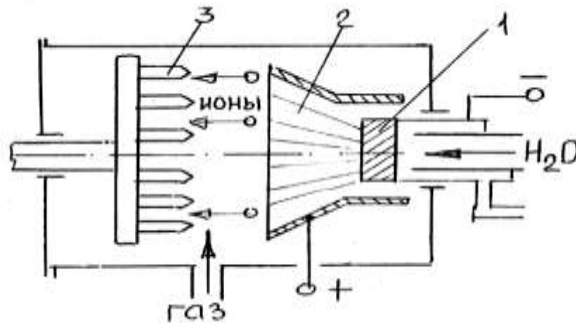


Рис. 14.8. Схема ионной технологии нанесения покрытий:

1 – катод водоохлаждаемый; 2 – плазма;

3 – обрабатываемая поверхность

В промышленности ионная технология используется для увеличения срока службы металлорежущего инструмента и штампов. При этом износостойкость инструмента увеличивается в 2...5 раз.

Материал покрытия получают испарением в вакууме водоохлаждаемого катода 1. Затем его ионизируют в электрическом разряде и превращают в плазму 2, которая с помощью электромагнитного поля ускоряется и фокусируется в поток по направлению к обрабатываемой поверхности 3.

Значительная энергия, которую можно сообщить ионам в плазме, позволяют глубоко внедрять их в обрабатываемые поверхности и получать прочные поверхностные покрытия (и металлические пленки).

Плазменным формованием деталей с помощью напыления получают тонкостенные детали и заготовки сложной геометрической формы из трудно обрабатываемых металлов (вольфрама, молибдена). Материал в виде плазмы напыляют на оправки или шаблоны, которые в дальнейшем могут или растворяться химическим путем (если они изготовлены из алюминия или меди), или разбираться на части.

Как правило, полученный после напыления слой хрупок, имеет слоистую структуру. После отжига он приобретает равновесную мелкозернистую структуру и механические свойства, позволяющие подвергать его механической обработке и использовать в конструкциях.

Формование деталей плазменным напылением используется для тиглей, деталей ракетных двигателей и МГД-генераторов.

### 14.2.5. Резка

Это термическая резка, независимая от свойств разрезаемых материалов. Возможность разрезания заготовок значительной толщины (до 250...300 мм), получение резов любой конфигурации.

Существуют две основные разновидности плазменной резки: разделительная и поверхностная – строжка (рис. 14.9.)

При ручных работах используется напряжение в 180 В, для машинных работ-500 В.

При строгании и точении (для удаления деформированного слоя) плазменную головку ставят под углом 40...60° к обрабатываемой поверхности.

При микроплазменной резке используется величина тока в 5...100 А для разрезания заготовок толщиной 6...8 мм. При этом ширина реза получается не более 0,8...1,0 мм.

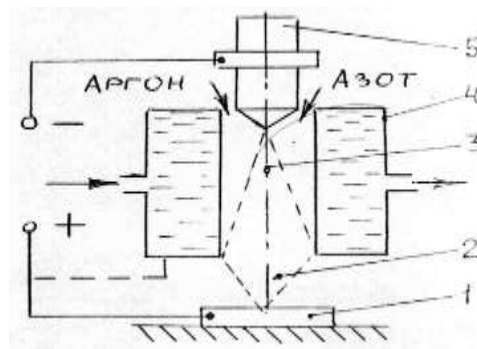


Рис. 14.9. Схема плазменной головки: 1 – заготовка; 2 – плазменная струя; 3 – дуговой разряд; 4 – медный водоохлаждаемый электрод; 5 – вольфрамовый электрод



## 15. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое плазма?
2. Чем отличается плазменная дуга от свободно горящей электрической дуги?
3. Каковы основные физические характеристики плазмы?
4. Каковы основные физико-химические эффекты при взаимодействии плазмы с веществом?
5. Когда появился термин «плазма»?
6. Основные схемы плазмотронов.
7. Какой эффект дает плазменная обработка при упрочнении поверхности?
8. В чем сущность процессов плазменной резки и строжки?
9. В каких случаях целесообразно применять плазменный прогрев при обработке металлов резанием?
10. Для каких изделий применяется плазменное формование поверхностей?
11. В каких случаях целесообразно применение плазменной строжки?

## 16. ЭЛЕКТРОВЗРЫВНАЯ ОБРАБОТКА

Процесс электровзрывной обработки относится к методу обработки давлением.

Быстрая деформация заготовки 1 вызывается силами  $F_3$ , действующими на ее поверхности. Заготовка деформируется и при ударе о стенки матрицы 2.

Силы  $F_3$  создаются вследствие взрывного испарения некоторого вещества 3 при пропускании через него кратковременного импульса тока  $I$ . Жидкость 4 служит для передачи механических усилий к заготовке 1, фиксируемой уплотняющими деталями 6.

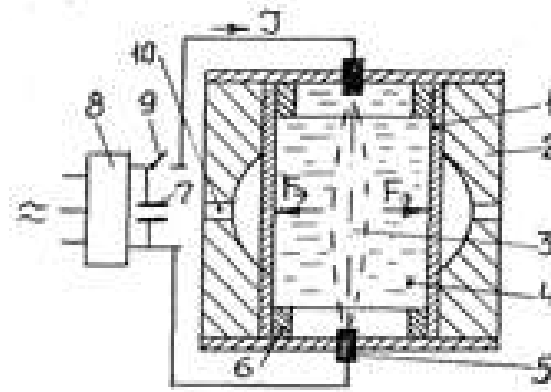


Рис. 16.1. Схема электровзрывной обработки:

1 – заготовка; 2 – матрица; 3 – вещество; 4 – жидкость; 5 – электроды;  
6 – уплотняющие детали; 7 – конденсаторная батарея; 8 – выпрямитель;  
9 – переключатель; 10 – отверстие для удаления воздуха

Импульсный ток получается при разряде конденсаторной батареи 7, которая подсоединяется к электродам 5 с помощью переключателя 9. Конденсаторы предварительно заряжаются до высокого напряжения от выпрямителя 8. При деформации заготовки воздух из полости матрицы 2 удаляется через отверстие 10.

Электровзрывная обработка применяется как для формообразования, так и для разделения заготовки (штамповки, гибки, чеканки, вытяжки, раздачи, а также для дробления хрупких материалов, очистки крупных отливок от пригара, резки, развальцовки труб) [1].

Сама обработка происходит очень быстро.

Известны две основные разновидности электровзрывного формообразования, в которых применяют:

1) высоковольтный разряд при пробое диэлектрической жидкости, которая используется как испаряемое вещество, а также для передачи механических усилий к заготовке;

2) электрический взрыв проводникового испаряемого вещества, помещенного в жидкость, которая служит передатчиком усилий к заготовке.

При высоковольтном разряде, иначе называемом электрогидравлической обработкой, используют электрогидравлический эффект.

На возможность использования импульсных электрических разрядов в жидкости для обработки металлов и для создания кумулятивных струй было указано в работах Лазаренко Б. Р. и Н.И. в 1944 г. «Электрическая эрозия металлов».

Возможности использования импульсного электрического разряда как источника высоких давлений в технологических процессах штамповки, дробления, очистки литья и т. д. сформулированы в работах Юткина Л. А. «Электрогидравлический эффект и некоторые возможности его применения», 1955 г. (1959 г.).

Рабочим веществом, как правило, служит техническая вода. Электрический разряд протекает в герметичной камере. В окрестности канала разряда происходит почти мгновенное испарение жидкости, образуется ударная волна — это источник силы для деформации заготовки, а также высокое давление в возникающем газопаровом пузыре.

Энергия разряда может достигать десятков килоджоулей, а длительность составляет несколько десятков микросекунд (мс), мгновенная сила тока достигает 50 кА при длине разрядного промежутка в несколько сантиметров.

Скорость фронта ударной волны заметно превышает скорость звука в воде и доходит до 3000 м/с (скорость звука в воде составляет 1500 м/с).

Начальная скорость стенок газового пузыря может быть больше 100 м/с, наибольший радиус пузыря — несколько сантиметров, максимальное давление в нем — до  $10^{10}$  Па.

Размеры обрабатываемых листовых заготовок толщиной до 5 мм могут превышать один метр.

При электрическом взрыве конденсатор разряжается на проводник в виде тонкой проволоки (или нескольких проволок, фольги или сетки). Проводник располагают в диэлектрической жидкости. Начальное напряжение разряда в данном случае несколько киловольт (значительно меньше, чем в первой разновидности процесса).

При протекании тока большей силы проводник нагревается и происходит его взрывное испарение. Возникает газовый пузырь, давление в котором достигает  $10^{10}$  Па. В качестве материалов проводников применяют медь, нихром, константан-сплав меди (основа) плюс 40% никеля и 1,5% марганца. Длина прямой проволоки — до нескольких десятков сантиметров, диаметр — 0,1...0,3 мм.

Достоинства электрогидравлического формообразования:

- а) простота оснастки;
- б) равномерность нагружения заготовки;
- в) сохранение исходного качества поверхности листовой заготовки;
- г) возможность изготовления разнообразных деталей из заготовок одного вида;

- д) не нужны дополнительные операции;
- е) оборудование легко встраивается в автоматические линии.

Электрогидравлические установки в зависимости от назначения различаются устройством камер, расположением заготовки, конфигурацией электродов. Ударная волна может иметь сферическую, цилиндрическую или плоскую форму.

Применяют еще одну разновидность электровзрывной обработки – электрический взрыв в вакууме электропроводного материала (обычно металлической проволоки) с целью нанесения покрытия. Покрытия наносят на различные материалы (в том числе керамику и стекло) без предварительного нагрева изделия.

Этим способом изготавливают детали рентгеновской аппаратуры и электронных приборов, цилиндров автомобильных двигателей и др.

## 16.1. Физика процесса

### 16.1.1. Формообразование под действием электрического разряда в жидкости

В схеме рис. 16.1. напряжение  $U_c$  на обкладках конденсатора должно быть достаточным для пробоя межэлектродного промежутка. Когда напряжение  $U_c$  достигнет пробивного значения  $U_{np}$ , в разрядной цепи быстро нарастает сила тока  $I$ . В жидкости возникает канал разряда и газопаровой пузырь. Вследствие высокого давления в рабочей камере заготовка 1 деформируется и заполняет полость в матрице 2.

#### Пробой жидкости

Начальная энергия конденсатора подсчитывается по формуле

$$E_c = \frac{C \cdot U_c^2}{2} \quad (16.1)$$

где  $C$  – емкость батареи конденсаторов, Ф;

$U_c = U_{np}$  – полагают так, В.

Механизм пробоя рабочей среды в общем такой же, как и при ЭЭО. Однако техническая вода обладает некоторой электропроводностью, благодаря чему происходит ее местное вскипание еще тогда, ко-

гда напряжение на электрод  $U_c < U_{np}$ . Поэтому заметная часть энергии расходуется еще до пробоя (из-за электропроводности воды).

После пробоя в жидкости образуется канал разряда начальным диаметром в десятые доли мм. В окружающей жидкости возникает ударная волна. Чтобы большая часть энергии конденсаторов преобразовалась в энергию ударной волны, необходим разряд с высокой скоростью нарастания силы разрядного тока  $I$ . Этого добиваются подбором параметров разрядной цепи.

После разрядов в воде накапливаются продукты эрозии электродов и газовые пузырьки. Если жидкость не менять, то продолжительность ее использования влияет на значение пробивного напряжения, на устойчивость пробоя и последующего разряда, а также на показатели самой обработки.

Разряд иногда стабилизируют продольным магнитным полем.

Процессы в разрядной цепи

Для описания технологических процессов разрядную цепь представляют схемой замещения – совокупностью идеализированных элементов: индуктивных и емкостных.

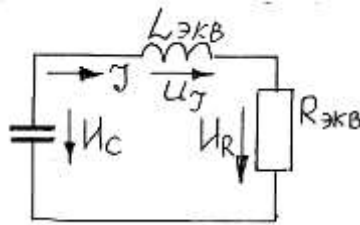


Рис. 16.2. Схема замещения разрядной цепи

Схема замещения содержит емкость  $C$  конденсаторной батареи, а также небольшую индуктивность  $L_{экв}$  подводящих проводов и самого канала разряда. Активным сопротивлением  $R_{экв}$  учитывают все необратимые потери энергии, главным образом в канале разряда.

Обычно принимают, что разрядная цепь линейная, а  $R_{экв} = \text{const}$ . Электрическое состояние цепи описывают уравнением, вытекающим из 2-го закона Кирхгофа для мгновенных напряжений:

$$U_C + U_L + U_R = 0, \quad (16.2)$$

где  $U_c$ ,  $U_L$ ,  $U_R$  – мгновенные напряжения соответственно на емкостном, индуктивном и резистивном элементах.

Из электротехники известно, что эти напряжения связаны с мгновенным значением силы разрядного тока  $I$ :

$$U_c = \frac{1}{C} \int I \cdot d\tau; \quad U_L = L \frac{dI}{dt}; \quad U_R = R_{\text{экв}} \cdot I;$$

Технологические показатели обработки в большой степени зависят от характера разряда.

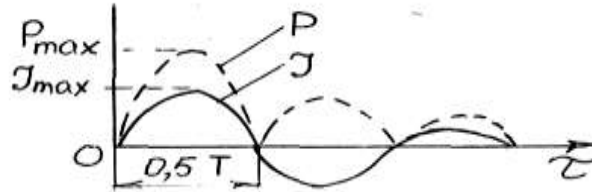


Рис. 16.3. Характер разряда

При большом эквивалентном сопротивлении  $R_{\text{экв}}$  разряд аperiodический, а при малом сопротивлении  $\left( R_{\text{экв}} < 2\sqrt{\frac{L_{\text{экв}}}{C}} \right)$  – затухающий периодический с периодом  $T$ .

Чтобы было быстрое нарастание силы тока  $I$  сопротивление, должно быть

$$R_{\text{экв}} < 2\sqrt{\frac{L_{\text{экв}}}{C}}, \text{ Ом} \quad (16.3)$$

а также мгновенной мощности  $P = I^2 \cdot R_{\text{экв}}$  в канале.

Это необходимое условие создания мощной ударной волны и преобразование значительной части электрической энергии в механическую.

За первый полупериод  $0 \leq \tau \leq 0,5T$  в канале выделяется значительная часть энергии конденсаторной батареи. Амплитуда силы тока и выделяемая в канале энергия уменьшается по мере затухания колебательного процесса в разрядной цепи.

При начальном условии, т. е.  $R_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{L_{\text{экв}}}{C}}$ , наибольшая сила тока в первом приближении равна:

$$I_{\text{max}} = 0,5 \cdot U_{\text{np}} \sqrt{C/L_{\text{экг}}}, A \quad (16.4)$$

Эта сила тока достигается примерно за время  $\tau = \frac{T}{4}$ , где  $T$  — период колебаний разрядной цепи.

Как известно из электротехники:

$$T = 2\pi\sqrt{L \cdot C}, \text{ с} \quad (16.5)$$

откуда  $\frac{T}{4} = 1,6\sqrt{L \cdot C}$ ,

где  $L$  — индуктивность, Гн;

$C$  — емкость, Ф.

В этом момент мгновенная мощность равна

$$P = R_{\text{экг}} \cdot I_{\text{max}}^2, \text{ кВт} \quad (16.6)$$

В течение первой четверти периода мгновенная мощность разряда изменяется примерно по линейному закону (см. рисунок). Можно принять, что мгновенная мощность увеличивается пропорционально времени:

$$P = P_{\text{max}} \cdot \tau / 0,25 \cdot T, \text{ кВт} \quad (16.7)$$

Канал разряда между электродами для окружающей жидкости представляет цилиндрический источник энергии. Интенсивность процесса определяется удельной мощностью  $P/\ell_n$ , где  $\ell_n$  — длина промежутка между электродами.

Если в соотношение (16.7) подставить выражения (16.4), (16.5), (16.6), то в течение первой четверти периода удельная мощность окажется пропорциональной времени разряда:

$$P/\ell_n = K_p \cdot \tau, \quad K_p = \frac{0,15 \cdot U_{\text{np}}^2}{L_{\text{экг}} \cdot \ell_n} \quad (16.8)$$

где

Постоянная  $K_p$  — одна из важнейших характеристических величин, определяющих технологические показатели электрогидравлической обработки.

Из электротехники также известно, что в магнитном поле индуктивного элемента накапливается энергия

$$E_L = \frac{L_{\text{экс}} \cdot I^2}{2}$$

Эта энергия максимальна в конце первой четверти периода, когда сила тока достигает значения  $I_{\text{max}}$ . Когда ток в течение второй четверти периода уменьшается, энергия магнитного поля переходит в энергию электрического поля конденсаторов.

Запасение энергии в магнитном поле уменьшает долю энергии конденсаторов, расходуемой в течение первой четверти периода на создание ударной волны. Для повышения КПД процесса необходимо уменьшать индуктивность разрядной цепи.

Ударная волна – это область повышенного давления, распространяющаяся в жидкости в радиальном направлении от канала разряда. На небольшом расстоянии от канала разряда ударная волна имеет форму цилиндра, а при удалении от области разряда становится сферической.

На фронте ударной волны величины, описывающие состояние жидкости, изменяются скачком. В частности давление увеличивается от  $P_a$  до очень высокого давления на фронте  $P_{\text{ф}} \gg P_a$ . Вследствие сжатия повышается плотность жидкости от нормальной  $\rho_{\text{ж}}$  до  $\rho_{\text{ф}}$ . На фронте ранее неподвижные частицы жидкости приобретают скорость  $V_{\text{ср}}$ . Фронт ударной волны движется со скоростью  $V_{\text{у.в.}}$ .

Для расчета показателей электрогидравлической обработки необходимо знать значения указанных величин на фронте ударной волны.

Если в системе координат, движущейся вместе с фронтом, составить закон сохранения, то величины оказываются взаимосвязанными. В такой системе неподвижная жидкость перед фронтом обладает относительной скоростью  $-V_{\text{у.в.}}$ , а скорость жидкости относительно фронта равна  $V = V_{\text{у.в.}} - V_{\text{ф}}$ .

Согласно закону сохранения масс

$$\rho_{\text{ж}} \cdot V = \rho_{\text{ф}} \cdot (V_{\text{у.в.}} - V_{\text{ф}}) \quad (16.9)$$

В соответствии с законом сохранения импульса

$$P_a + \rho_{\text{ж}} \cdot V^2 = P_{\text{ф}} + \rho_{\text{ф}} (V_{\text{у.в.}} - V_{\text{ф}})^2 \quad (16.10)$$



После пробоя жидкости от оси канала расходится ударная волна. Скорость фронта ударной волны (из теории ударных волн) равна:

$$V_{y.в.} = 0,74 \sqrt{\frac{K_p}{\rho_{ж}}}, \text{ м/с} \quad (16.11)$$

Обычно при  $\tau < (0,1 \dots 0,3)$  мкс скорость фронта  $V_{y.в.} \approx 10^4$  м/с, а радиус  $r_{\phi} \approx 1$  мм.

Скорость фронта  $V_{y.в.}$  не может быть меньше скорости звука в жидкости  $V_{зв.}$ , и постоянная  $K_p$  имеет наименьшее допустимое значение  $K_{p.min}$ , определяется согласно выражению (16.11)

$$0,74 \sqrt{\frac{K_{p.min}}{\rho_{ж}}} > V_{зв.} \quad (16.12)$$

Согласно выражению (16.8) и (16.12), в применяемой рабочей жидкости ударная волна может возникать только при определенных соотношениях между начальным напряжением разряда  $U_{np}$ , длиной промежутка и индуктивностью разрядной цепи  $L_{эжб}$ .

Таким образом, неравенством (16.12) устанавливаются условия осуществимости электрогидравлического формообразования.

Давление на фронте расходящейся ударной волны  $P_{\phi}$  можно найти, если подставить величину  $(V_{y.в.} - V_{\phi})$  из выражения (16.9) в уравнение (8.10) и принять, что для воды существует связь между давлением и плотностью:

$$P_{\phi} - P_a = 3 \cdot 10^9 \left( \frac{\rho_{\phi}}{\rho_{ж}} - 1 \right), \text{ Па}$$

Для воды давление на фронте ударной волны можно оценить по формуле:

$$P_{\phi} = \rho_{ж} \cdot V_{y.в.}^2 - 3 \cdot 10^9, \text{ Па} \quad (16.13)$$

Если в соотношение (16.13) подставить выражения (16.8) и (16.11), то

$$\rho_{\phi} = 0,5 \sqrt{\rho_{ж} \cdot K_p} - 3 \cdot 10^9 = 0,2 \cdot U_{np} \sqrt{\frac{\rho_{ж}}{L_{эжб} \cdot \ell_n}} - 3 \cdot 10^9 \quad (16.14)$$

Также, как и скорость фронта, давление на фронте не зависит от емкости разрядной цепи, но растет с повышением напряжения, уменьшением индуктивности и длины промежутка.

Соотношением (16.14) предопределяются основные показатели электрогидравлической обработки при цилиндрической ударной волне.

Обычно скорость частиц на фронте  $V_\phi > 100$  м/с. После того, как рост мощности разряда прекращается, т. е. при  $\tau \geq 0,25T$ , скорость фронта, давление и скорость частиц жидкости начинают уменьшаться.

При большом удалении от оси канала ударная волна переходит в мощную акустическую волну, скорость фронта которой немного повышает скорость звука (в воде около 1500 м/с).

Деформация заготовки вызывается силами, возникающими при подходе к заготовке фронта ударной волны. Как известно из физики, сила, с которой поток действует на неподвижную преграду (в данном случае на заготовку), представляет сумму гидростатического  $P_\phi$  и динамического  $(0,5 \cdot \rho_\phi \cdot V_\phi^2)$  давлений.

Плотность поверхностных сил  $f_n$  максимальна, когда фронт ударной волны подходит к еще неподвижной заготовке и  $V_3 = 0$ , а гидростатическое давление потока равно давлению  $P_\phi$  на фронте ударной волны. Поэтому

$$f_n = P_\phi + 0,5\rho_\phi \cdot V_\phi^2 \quad (16.15)$$

Давление на фронте сохраняется постоянным примерно всю первую четверть периода, т. е. до тех пор, пока ударная волна не отойдет от оси канала на расстояние  $0,25 \cdot T \cdot V_{y.v.}$ .

Если заготовка расположена от оси разряда на расстоянии  $\ell < 0,25 \cdot T \cdot V_{y.v.}$ , то давление на фронте наибольшее и определяется соотношением (16.14).

Плотность поверхностных сил должна превышать предел текучести, т. е.  $f_n > \sigma_\tau$ .

Экспериментально установлено, что давление на фронте ударной волны в десятки и сотни раз превышает  $\sigma_\tau$ .

Когда фронт ударной волны достигнет поверхности заготовки, то спустя некоторое время ( $\approx 100$  мкс) начинается само формообразование. Ударная волна частично отражается, а частично переходит в заготовку, где распространяются продольные и поперечные волны.

При отражении ударной волны от заготовки в жидкости возможна кавитация.

Абсолютные скорости деформации заготовки превосходят 100 м/с.

### Штамповка фасонных деталей

На рис. 16.4. дана зависимость межэлектродного промежутка  $\ell_n$  от напряжения на электродах  $U_c$ .

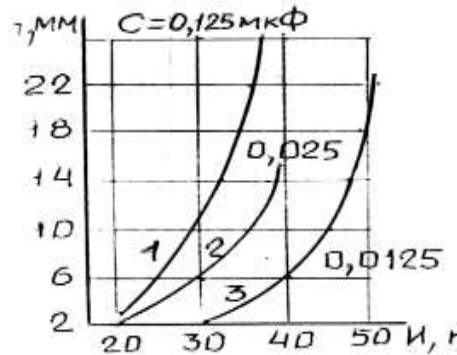


Рис. 16.4. Зависимость  $\ell_n$  от напряжения на электродах  $U_c$

Кривая 1 соответствует камере малой емкости, кривые 2 и 3 — большей емкости.

При обработке в воде оптимальную длину межэлектродного промежутка можно определить по соотношению:

$$\ell_n = 1,14 \cdot 10^{-6} \cdot U_c \sqrt{L_{\text{экв}} \cdot C}, \quad \text{мм} \quad (16.16)$$

где  $U_c$  — заданное напряжение на конденсаторах, В;

$L_{\text{экв}}$  — индуктивность, Гн;

$C$  — емкость конденсаторов, Ф.

Для электрогидравлического формообразования с взрывающимся проводником оптимальные длину  $\ell_n$  и диаметр  $d_{np}$  проволоки также определяют по эмпирическим формулам в зависимости от показателей установки:

$$\ell_{np} = 2 \cdot 10^{-6} \cdot U_c^4 \sqrt{L_{\text{экв}} \cdot C}, \quad \text{мм} \quad (16.17)$$

$$d_{np} = 2,1 \cdot 10^{-3} \sqrt[4]{\frac{U_c \cdot \sqrt{C^5}}{2 \sqrt{L_{экс}} \cdot \gamma_{np} \cdot \rho_{np} \cdot q_{np}}}, \text{ мм} \quad (16.18)$$

где  $\gamma_{np}$  – удельная проводимость материала проволоки,  $1/\text{Ом} \cdot \text{см}$ ;

$\rho_{np}$  – плотность проволоки,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;

$q_{np}$  – теплота, необходимая для нагрева и испарения единицы массы проводникового материала,  $\text{Дж}/\text{г}$ .

## 16.2. Схема электровзрывной обработки

### 16.2.1. Штамповка

Для электрогидравлической штамповки применяются импульсы высокого напряжения, так как напряжение на электродах менее 30 кВт дает неустойчивый разряд. Кроме того, при повышении напряжения растет КПД процесса.

Электрогидравлическая объемная штамповка и ковка может осуществляться с помощью вспомогательного элемента, передающего усилие к заготовке, например металлического поршня. Причем, работа гидросистем 1 должна быть строго согласована по времени с электрическими разрядами между электродами.

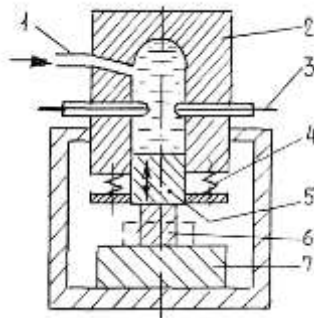


Рис. 16.5. Схема электрогидравлического процесса:  
1 – гидросистема; 2 – камера; 3 – электроды; 4 – пружина;  
5 – поршень; 6 – заготовка; 7 – стол

Известна также электрогидравлическая штамповка экструзией (от позднелатинского слова – *extrusion*-выталкивание). Экструдер может быть шнековый или червячный.

Для этой цели несколько пар электродов располагают в пространстве последовательно. Если разряды в них возникают также последова-

тельно с небольшой задержкой, то в камере можно получить высокое давление. Заготовку помещают за последними электродами в ресивере, в котором имеется фильера с выходом в атмосферу. Благодаря высокому давлению в ресивере возможно экструзионное выдавливание металла заготовки через отверстие фильеры.

### 16.2.2. Очистка изделий

Очистка изготовленных деталей – одна из самых распространенных операций в технологии машиностроения. Использование электрогидравлической очистки значительно повышает производительность этой операции для многих видов изделий.

В известных способах очистки, например литья – гидropескоструйной, дробеструйной, дробеметной и др. очень трудно добиться полной автоматизации процесса.

С этой точки зрения при очистке литых деталей сложного профиля из высокопрочных материалов преимущества электрогидравлической очистки проявляется в полной мере.

При использовании одного электрода необходимо поддерживать постоянную высоту его расположения над заготовками, так как от нее зависят параметры разряда, а следовательно, и качество очистки изделий.

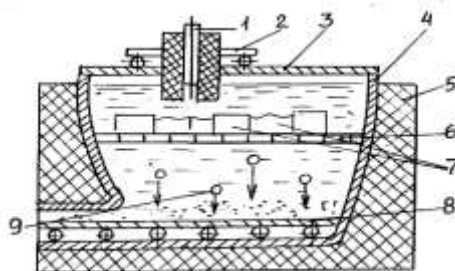


Рис. 16.6. Схема установки для электрогидравлической очистки литых деталей: 1 – электрод; 2 – тележка; 3 – траверса; 4 – ванна; 5 – основание; 6 – решетка; 7 – заготовки (детали); 8 – транспортер; 9 – осажденные частицы

Обычно для этого применяют механические копиры, с помощью которых электроды перемещаются в зависимости от изменения положения обрабатываемых поверхностей заготовок. Площадь поверхности заготовки, надежно очищаемая одним разрядом, обычно ограничена окружностью диаметром 150...400 мм.

Поэтому необходимо согласовывать время между разрядами с расстоянием, пройденным электродом.

При очистке несколькими электродами их устанавливают на расстоянии 300...400 мм друг от друга.

Очистку надо проводить сразу после литья. Под действием электрических разрядов формовочная смесь отделяется от опок и литья и вместе со стержневыми составами выпадает через решетку в транспортер 8. Отходы идут снова в производство.

### **16.2.3. Электрогидравлическая очистка непрерывно движущейся ленты**

Схема очистки ленты состоит в следующем. Лента через уплотнение входит в ванну с водой. Electroды установлены над загрязненной стороной ленты. Скорость ленты и число электродов выбирают из вышеприведенных условий.

#### **16.2.3.1. Электрогидравлическая очистка в барабанах**

Мелкие заготовки очищают в данных устройствах. В барабан заливают рабочую жидкость. Один или несколько электродов испускают разряды. При вращении барабана действие разрядов постепенно испытывают все заготовки.

Для стабилизации процесса необходима определенная загрузка по объему барабана (коэффициент заполнения) заготовками.

Очистка барабана производится прокачкой рабочей жидкости.

#### **16.2.3.2. Электрогидравлическая очистка крупных заготовок**

Крупные заготовки ... очищают по схеме «швабры» (рис. 16.7.). На заготовку 6 через прокладку 1 устанавливается шарообразный колпак 3, в котором смонтированы патрубки 2 для подачи рабочей жидкости, а также электроды 5 и механический манипулятор 4 для перемещения колпака по заготовке.

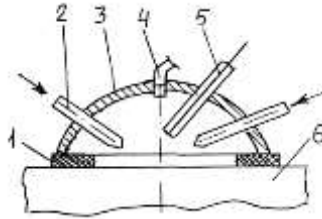


Рис. 16.7. Схема электрогидравлической очистки крупных заготовок:  
 1 – резиновая прокладка; 2 – патрубок для рабочей жидкости;  
 3 – колпак шарообразный; 4 – механический манипулятор;  
 5 – электроды; 6 – заготовка

Достоинства способа – простота устройства, малый расход рабочей жидкости. Применяется для очистки корпусов судов «на плаву».

Электрогидравлическая очистка осуществляется по схеме, когда в результате разряда в полости из нее через узкое сопло выбрасывается струя абразивной суспензии с очень большой скоростью.

Абразивный материал можно добавлять в рабочую жидкость непосредственно перед выходом ее из сопла.

Для повышения эффективности очистки в качестве рабочей среды используют электролит, а на заготовку или на рабочую среду подают потенциал.

Таким способом можно производить и разрезание заготовок толщиной до 6 мм.

### 3. Получение неразъемных соединений электрогидравлическим способом

Электрогидравлическую обработку используют для развальцовки, обжатия и других подобных технологических операциях. Это позволяет механизировать наиболее массовые операции, ранее производимые вручную. В судостроении, энергетическом машиностроении, химической промышленности широко применяются трубчатые теплообменники. Чтобы улучшить рабочие свойства теплообменников, их изготавливают из высоколегированных сталей, плохо поддающихся сварке.

Для крепления труб в трубных решетках стали применять электрогидравлическую запрессовку. Процесс осуществляется с помощью специальных патронов одно – или многоразового действия.

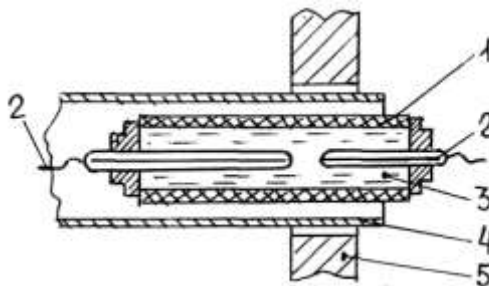


Рис. 16.8. Патрон одноразового использования:

1 – герметизированная резиновая трубка; 2 – электроды;  
3 – рабочая жидкость; 4 – труба; 5 – трубная решетка (коллектор)

При электрогидравлической обработке получается гарантированный натяг. Качество соединения трубы с коллектором улучшают целым рядом конструктивных и технологических мероприятий.

Так на поверхности отверстий коллектора предусматривают особые канавки, которые при разряде заполняются пластически деформированным металлом трубы. Тем самым повышается сцепление трубы. Тем самым повышается сцепление трубы с коллектором (плотность).

Иногда на сопрягаемые поверхности коллектора и трубы наносят слой вещества, которое при запрессовке заполняет все неровности на поверхностях сцепления.

Для повышения качества запрессовки необходимо соблюдать ряд условий:

1) диаметральный зазор между внутренней поверхностью трубы и наружной поверхностью патрона не должен составлять более 4% внутреннего диаметра трубы;

2) длина гильзы патрона равна или немного меньше длины запрессовки (толщины трубной решетки – коллектора);

3) зазор между трубой и стенкой отверстия в коллекторе не должен превышать 2% наружного диаметра трубы;

4) соединяемые поверхности должны быть тщательно зачищены и обезжирены.

Патрон многоразового действия отличается тем, что область разряда вынесена за пределы трубы.



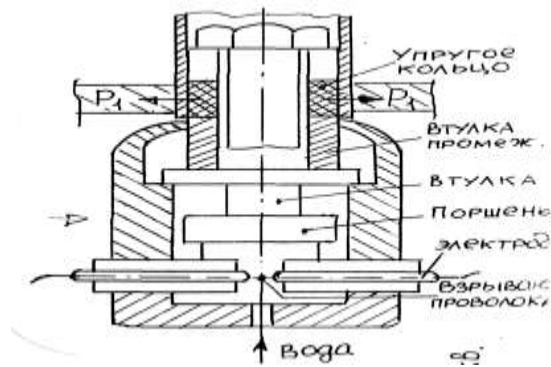


Рис. 16.9. Схема патрона многоразового действия

Принцип его работы основан на том, что после взрыва проволоки ударная волна воздействует на упругое кольцо через поршень и две втулки.

В результате упругое кольцо сжимается в осевом направлении и раздается в радиальном; появляется сила  $P_1$ , которая осуществляет развальцовку.

Для операции обжата взрывающуюся проволоку наматывают на изолированную поверхность цилиндрической заготовки, предварительно покрытую изоляционным материалом (например, лаком). Шаг намотки и размер проволоки выбирают так, чтобы необходимую деформацию заготовки получить за 1 разряд.

При подаче импульсного напряжения проволока взрывается и деталь обжимает основу. Прочность соединения на 20...30% выше, чем при запрессовке механическим способом. Производительность выше, расход энергии меньше, себестоимость меньше в 2,5 раза.

Электровзрывной обработкой можно исправить бракованные изделия:

- восстанавливать раздечей размеры изношенного поршневого пальца;
- править помятости на заготовке, помещаемой в контрольную форму и т. д.

### 16.3. Дробление материалов

Электрогидравлическое дробление применяется для измельчения только хрупких материалов.

Известно два способа обработки: внешним или внутренним разрядом.

При внешнем разряде один электрод устанавливают над измельчаемым материалом, который служит вторым электродом. При многократных разрядах материал постепенно измельчается и проваливается через сетчатое дно (сито).

При внутреннем разряде в измельченном теле просверливают отверстия, в которые входят электроды. Дробление происходит вследствие разрядов в объеме самого тела.

Если необходимо измельчать куски металла, то их смешивают с каким-нибудь вязким диэлектриком (пластмассой) в объемном отношении 1:5. В результате разрядов разрушаются преимущественно куски металла, которые затем отделяются от вязкого наполнителя благодаря разнице плотностей.

На показатели процесса дробления существенно влияет частота следования разрядов. При большой частоте снижается КПД процесса, так как свойства рабочей среды не успевают восстанавливаться.

В несменяемой рабочей среде оптимальная частота разрядов составляет 15...25 Гц, а при сменяемой рабочей среде частота разрядов выше.

На степень измельчения влияет скорость поступления материала в разрядную зону. Избыток материала приводит к его уплотнению, но не к измельчению.

При электрогидравлическом дроблении у измельченных частиц остаются острые края, возникающие при хрупком раскалывании более крупных кусков.

Так бетон, полученный на щебне, измельченном на электрогидравлической установке, обладает повышенной прочностью, так как увеличивается суммарная поверхность измельченных частиц.

Или еще. Абразив после электрогидравлической обработки не имеет плоских и игольчатых зерен, что улучшает его технологические свойства, так как получается больше граней, острых кромок. При электрогидравлическом дроблении зона обработки занимает не большой объем. Поэтому можно использовать оборудование, не отличающееся высокой прочностью к ударным нагрузкам.

Оборудование имеет простое устройство и низкую металлоемкость. Производительность при дроблении мелких фракций достигает 450 кг/ч, а при дроблении крупных фракций – до 2,5 т/ч.

## **16.4. Изменение свойств поверхности**

Электрогидравлический эффект используют для изменения свойств поверхности, в частности: для нанесения покрытий, упрочнения и наклепа, спекания и уплотнения.

### **16.4.1. Нанесение покрытий**

Можно наносить как металлические, так и неметаллические покрытия на поверхности заготовок. Процесс протекает в вакууме или газовой рабочей среде.

Проволочному электроду придают форму поверхности заготовки и располагают его на расстоянии, при котором область действия электрического взрыва охватывала бы всю напыляемую поверхность.

Параметры импульса напряжения задают из условия, чтобы весь проволочный электрод превратился бы в пар, а не в капли расплава. При этом обеспечивается надежное сцепление наносимого металла с поверхностью заготовки.

Если наносится неметаллическое покрытие, то исходный материал помещают в полый проволочный электрод. При взрыве проводника этот материал, испаряясь, покрывает обрабатываемую поверхность.

Параметры выбирают на испарение материала, а не на его сжигание.

Можно получить многокомпонентное, а также многослойное покрытие, благодаря последующему чередованию процессов с различными испаряющимися материалами.

### **16.4.2. Упрочнение и наклеп**

Эти два явления почти всегда сопутствуют электрогидравлическому формообразованию, так как на заготовку действуют значительные механические нагрузки.

Можно осуществить и специальную технологическую операцию, в ходе которой на заготовку действуют также усилия, которые вызывают только упрочнение и наклеп, но не изменяют ее формы.

Если требования к качеству поверхности детали невысокие, то вместо второго электрода используют саму заготовку.

В противном случае применяют два электрода, а усилие к заготовке передают через промежуточное диэлектрическое упругое («не слабое» звено) тело.

Данную технологическую операцию применяют, например, для упрочнения проволоки, а в качестве электрода служит непрерывно подаваемая проволока.

### 16.4.3. Спекание и уплотнение

При электрогидравлическом разряде в массе опилок или стружек благодаря высокому давлению материалы уплотняются, а термическое воздействие тока приводит к их спеканию. Этот процесс применяют для брикетирования стружки.

Известны и другие области применения электрогидравлического эффекта: обезгаживание (удаление газов), перемешивание жидкостей, удаление шлаков и примесей, получение эмульсий расплавов металлов, деэмульгирование, для создания вибрации заготовок.

Электрогидравлический эффект можно использовать совместно с другими воздействиями на заготовку.

Так, при штамповке или деформации крупных и толстостенных заготовок сначала применяют электрогидравлическое формообразование (при котором снижается  $\sigma_t$  обрабатываемого материала). Затем без паузы на данный участок заготовки воздействуют взрывом обычного взрывчатого вещества, чем и заканчивается деформация заготовки.

Электрогидравлический эффект применяют для прокачки рабочих сред при ЭХО или ЭЭО, когда несколько пар электродов устанавливают по тракту движения рабочей среды и последовательным их включением осуществляется прокачка среды.

## 17. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите две основные разновидности электровзрывного формообразования.
2. Каков принцип электрогидравлического формообразования при электрическом разряде в жидкости?
3. Поясните принцип нанесения покрытий электрическим взрывом проводников.
4. Каковы основные технологические схемы электрогидравлического формообразования?

5. Объясните принцип электрогидравлической штамповки.

6. В чем принцип электрогидравлической запрессовки элементов и каковы особенности данной операции?

7. Поясните процесс электрогидравлического дробления материалов и изменения свойств поверхности.

## 18. МАГНИТОИМПУЛЬСНОЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕ

Магнитоимпульсное формообразование относится к методам обработки давлением. По технологическим параметрам этот вид обработки близок к электровзрывному формообразованию. Сила, вызывающая деформацию, создается за счет электромагнитных эффектов непосредственно в самой заготовке, выполненной из электропроводного материала.

В данном случае никаких промежуточных рабочих сред для передачи механических усилий на заготовку не требуется. Схема метода показана на рис. 18.1.

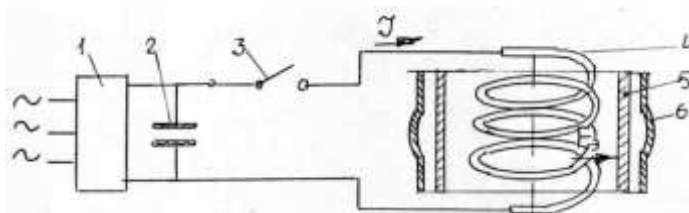


Рис. 18.1. Схема магнитоимпульсного формообразования:

- |                               |                          |
|-------------------------------|--------------------------|
| 1 – выпрямитель;              | 4 – обмотка возбуждения; |
| 2 – батарея конденсаторов;    | 5 – заготовка;           |
| 3 – переключающее устройство; | 6 – матрица              |

От выпрямителя 1 заряжается батарея конденсаторов 2, в электрическом поле которых к началу обработки накапливается энергия:

$$E_c = \frac{C \cdot U_c^2}{2} \quad (18.1)$$

где  $C$  – емкость батареи конденсаторов, Ф;

$U_c$  – напряжение на обкладках конденсаторной батареи, кВ.

Емкость батареи достигает 100 мкФ,  $U_c$  – десятков киловольт.

С помощью переключающего устройства 3 заряженная батарея конденсаторов подсоединяется к обмотке 4 возбуждения, предназначенного для создания магнитного поля определенной пространственной конфигурации.

Конденсаторы в течение очень короткого времени разряжаются на обмотку возбуждителя, максимальная сила разрядного тока  $I$  достигает сотен и тысяч килоампер.

В окрестности возбуждителя, где установлена заготовка 5, создается быстроизменяющееся магнитное поле, которое приводит к возникновению электромагнитной силы  $F_z$ . Эта сила вызывает деформацию листовой заготовки, которая принимает форму матрицы 6.

Таким образом, в данном процессе энергия электрического поля конденсаторов преобразуется в энергию магнитного поля возбуждителя, а затем в работу деформации заготовки и частично в теплоту.

Формообразование протекает очень быстро. Время операции определяется в основном длительностью зарядки конденсаторов и вспомогательным временем на замену заготовок.

Установка для магнитоимпульсной обработки (МИО) во время деформации заготовки не взаимодействует с внешней средой, время обработки длится 100 мкс.

МИО применяется для изготовления деталей толщиной менее 3 мм из листовых заготовок из стали, латуни, алюминия, меди и даже из сплавов с малой пластичностью.

Первая установка была создана академиком П. Л. Капица в 20-х годах XX столетия. На этой установке удалось достичь напряженности магнитного поля  $H = 10^7$  А/м.

В конце 50-х – начале 60-х годов были построены исследователями установки, создающие магнитные поля с напряженностью  $H = 10^9$  А/м.

Одновременно в СССР и США разрабатывались устройства промышленного назначения МИО для технологических целей.

Достоинства магнитоимпульсного формообразования:

- простота оборудования;
- отсутствие инструмента;
- возможность получения деталей сложной конфигурации;
- отсутствие движущихся узлов;
- простота автоматизации процесса;
- отсутствие рабочей среды;
- нет необходимости герметизировать рабочее пространство;
- формообразование можно проводить через непроводящую оболочку.

Однако требуется тщательное обоснование применения данного метода, поскольку силы, вызывающие деформацию, существенно зависят от физико-химических и геометрических свойств заготовки. [7]

## 18.1. Физика процесса

### 18.1.1. Разновидности магнито-импульсного формообразования

Оно осуществляется двумя способами:

- электродинамическим – при взаимодействии токов в возбuditеле и заготовке, включенной в цепь разряда конденсаторов;
- индукционным – при взаимодействии импульсного магнитного поля, которое создается возбuditелем, с токами, наведенными в заготовке самим же полем; при этом заготовку не включают в электрическую цепь.

1) Электродинамический способ основан на электромеханическом взаимодействии проводников, в которых протекают токи.

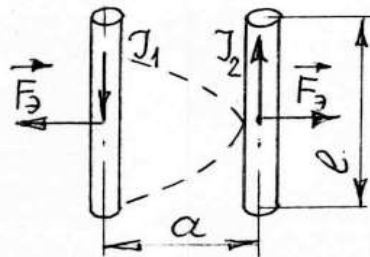


Рис. 18.2. Схема электромеханического взаимодействия проводников

Как известно из электротехники, параллельные провода с одинаково направленными токами  $I_1$  и  $I_2$  притягиваются, а с противоположно направленными – отталкиваются.

Сила притяжения (или отталкивания) прямо пропорциональна произведению сил токов  $I_1, I_2$ , длине проводов  $l$  и обратно пропорциональна расстоянию между проводами  $a$ :

$$F_3 = \frac{K_F \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{a} \quad (18.2)$$

где  $K_F$  – коэффициент пропорциональности.

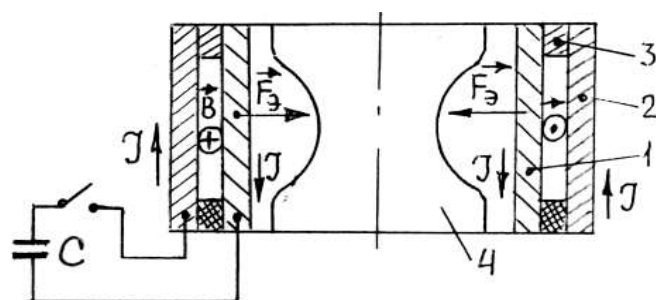


Рис. 18.3. Схема электродинамического способа формообразования:  
1 – заготовка; 3 – кольцевая перемычка;  
2 – возбуждатель; 4 – матрица

В данном случае цилиндрическая заготовка 1 и возбуждатель 2 соединены последовательно с помощью электропроводной кольцевой перемычки 3 и подключены к конденсаторной батарее.

Током  $I$  разряда в возбуждателе 2 создается магнитное поле с индукцией  $B$ , которое, взаимодействуя с током  $I$  той же силы в заготовке 1, создает в ней сжимающие силы  $F_э$ . Заготовка опрессовывает матрицу 4.

Поскольку токи в заготовке и возбуждателе соответствующим образом распределены по их объемам, то общие соотношения для расчета электромагнитных сил  $F_э$  оказываются довольно сложными.

Эти силы растут с увеличением силы токов и уменьшением расстояния между возбуждателем и заготовкой.

Недостатком электродинамического способа является необходимость включения в разрядную цепь деформируемой заготовки, что не всегда возможно.

2) Индукционный способ более распространен. Заготовку не включают ни в какие электрические цепи.

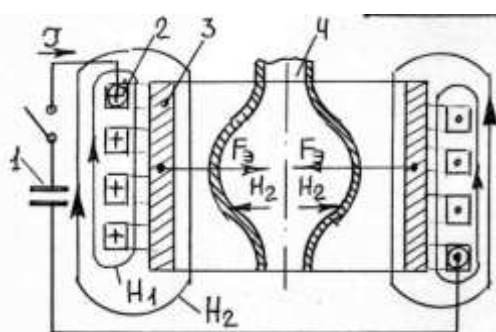


Рис. 18.4. Схема индукционного способа формообразования:  
1 – батарея конденсаторов; 3 – заготовка;  
2 – возбуждатель; 4 – матрица



Например, внутри возбуждителя 2 установлена трубчатая заготовка 3, которая под действием электромагнитных сил  $F_3$ , опрессовывает форму (матрицу) 4.

Из физики известно, что плотность энергии магнитного поля равна  $0,5\vec{B} \cdot \vec{H}$ .

где:  $B$  – магнитная индукция, Вб;

$H$  – напряженность магнитного поля, А/м.

$$\text{Для воздуха: } \vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} \quad (18.3)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнитная постоянная, Гн/м.

В начале разряда конденсатора 1 (в течение десятков мкс) вблизи обмотки 2 на внешней стороне заготовки 3 напряженность магнитного поля  $H_1$  велика, а на внутренней стороне напряженность  $H_2$  мала.

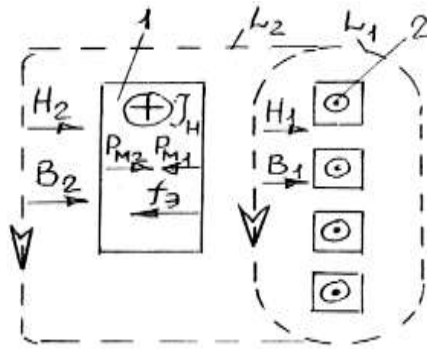


Рис. 18.5. Фрагмент индукционного способа

В единичном объеме пространства внешней части заготовки плотность магнитной энергии равна:

$$0,5\vec{B}_1 \cdot \vec{H}_1 = 0,5\mu_0 \cdot H_1^2 \quad (18.4)$$

то же во внутренней части:

$$0,5\vec{B}_2 \cdot \vec{H}_2 = 0,5\mu_0 \cdot H_2^2 \quad (18.5)$$

где  $\vec{B}_1$ ,  $\vec{B}_2$  – значения магнитной индукции соответственно на внешней и внутренней сторонах заготовки.

Размерность плотности энергии такая же, как и у давления. Поэтому плотностям энергии по обе стороны заготовки соответствуют различные магнитные давления  $P_{m1}$  и  $P_{m2}$ .

Плотностью  $f_3$  электромагнитных сил на участке заготовки 1 называется разность магнитных давлений  $P_{M_1} - P_{M_2}$  с внешней и внутренней сторон.

Эти магнитные давления перпендикулярны вектору  $\vec{B}$  и численно равны местным плотностям магнитной энергии.

$$P_{M_1} = 0,5 \cdot \mu_0 \cdot H_1^2; \quad P_{M_2} = 0,5 \cdot \mu_0 \cdot H_2^2$$

Поверхностная плотность электромагнитных сил будет равна:

$$f_3 = P_{M_1} - P_{M_2} = 0,5 \cdot \mu_0 (H_1^2 - H_2^2) \quad (18.6)$$

Вектор  $f_3$  направлен в ту сторону, где магнитное поле слабее.

Чтобы произошло магнитоимпульсное формообразование, необходимо чтобы напряженности магнитного поля по обеим сторонам листовой заготовки существенно отличались друг от друга.

Напряженность  $H_2$  магнитного поля внутри заготовки ослабляется за счет тока  $I_n$ , наведенного изменяющимся магнитным полем тока  $I$  в электропроводной заготовке.

По правилу Ленца наведенный ток имеет такое направление, что его магнитное поле встречно тому, которое создается возбудителем 2 внутри контура, где возникает наведенный ток.

Заготовка, а точнее цепь наведенного тока, обладает определенной инерционностью, характеризуемой в простейшем случае постоянной времени  $\tau_n$ .

$$\tau_n = L_n / R_n \quad (18.7)$$

Чем больше  $\tau_n$  в сравнении с длительностью протекания разрядного тока, тем сильнее выражена электромагнитная инерционность электропроводной заготовки и тем слабее в начале разряда магнитное поле, характеризующееся величинами  $\vec{B}_2$  и  $\vec{H}_2$  на ее внутренней стороне.

Отсюда вывод: время разряда конденсаторной батареи – то есть время нарастания магнитного поля, должно быть как можно меньшим.

Иногда электромагнитные силы  $F_3$  создают быстро падающим магнитным полем, получаемым разрывом цепи (например, с помощью плавкого предохранителя).

На нагрев заготовки тратится до 20% энергии, накопленной конденсатором.

Так как магнитное давление действует перпендикулярно вектору магнитной индукции, то последний должен быть направлен параллель-

но исходной поверхности заготовки. Для этого подбирают соответствующую конфигурацию возбудителя. Например, для трубчатой заготовки индукция магнитного поля должна быть направлена вдоль боковой поверхности заготовки. Для листовой заготовки – магнитное поле должно быть параллельно плоскости листа.

Чтобы увеличить местную деформацию заготовки, магнитное поле в определенной области сосредотачивают насадками из электропроводных материалов.

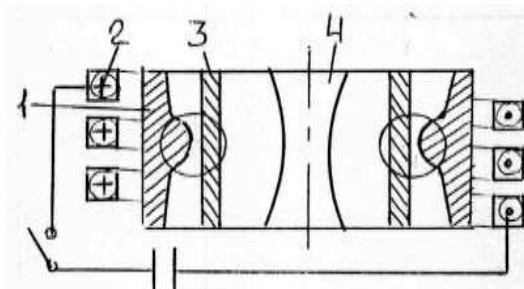


Рис. 18.6. Схема сосредоточения магнитного поля насадком:  
1 – насадок; 3 – заготовка;  
2 – возбудитель; 4 – матрица

Из электротехники известно, благодаря поверхностному эффекту быстро изменяющийся магнитный поток не проникает вглубь проводника. Поэтому линии магнитного поля как бы обтекают поверхность насадка, принимая в окрестности заготовки необходимую конфигурацию.

Известны и другие способы передачи механических сил заготовке:

– для заготовок из материалов с низкой удельной проводимостью между заготовкой и возбудителем устанавливают тонкие электропроводные (алюминиевые) прокладки (спутники);

– также применяют жидкость, которая сжимается деформируемой прокладкой.

## 19. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните принцип действия установок для магнитоимпульсного формообразования индукционным и электродинамическим способами.

2. Кто создал первую установку для получения сильных магнитных полей и когда?

3. Можно ли непосредственно использовать магнитоимпульсное формообразование для изготовления деталей из неэлектропроводных материалов?

4. Почему невозможно магнитоимпульсное формирование очень тонких заготовок?

5. Почему нельзя беспрестанно сокращать время зарядки конденсатора с целью повышения производительности установки?

## **20. МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА**

Состояние поверхностей и приповерхностного слоя деталей и режущих инструментов в значительной мере определяют их эксплуатационные свойства.

Для изделий и инструментов, к которым предъявляются требования долговечности и надежности, важны такие характеристики поверхности, как: коэффициент трения, длительность приработки, износостойкость, наличие дефектов в виде микротрещин, внутренние остаточные напряжения, коррозионная стойкость.

Для других изделий могут оказаться важными светоотражающие свойства поверхности, ее способность поглощать газы и атомные частицы, электрическая и магнитная проводимость приповерхностного слоя.

Общеизвестно, что физико-химические и механические свойства приповерхностного слоя могут существенно отличаться от свойств основного материала детали. При этом окончательные свойства поверхности являются результатом воздействия на деталь в процессе ее изготовления и особенно на финишных операциях.

Возрастающие и расширяющиеся требования к поверхностям вызывают потребность совершенствовать существующие технологические способы, расширяющие возможности отделочной и упрочняющей технологии.

Отдельное внимание приходится уделять состоянию поверхностей режущих инструментов, поскольку от них зависит стойкость и расход инструментов, а также производительность, качество обработки инструментами, стабильность ее результатов.

Появление магнитно-абразивного полирования (МАП) и магнитной обработки (МО) деталей и инструментов является следствием названных выше тенденций.

Первые предложения использовать магнитное поле для абразивной обработки относятся к 1938 году.

Первые публикации об исследованиях и применении абразивной обработки с использованием магнитного поля появились в 60-х годах XX столетия и принадлежат советским ученым: Барону Ю. М., Верезу-бу В. Н., Герасеменку Ю. В., Хохлову Б. А., Шальному В. А., Шулеву Г. С.

Большой вклад в эту работу внесли: Калининградский технологический институт рыбной промышленности и хозяйства, Ленинградский политехнический институт, Физико-технический институт А. Н. БССР, Уфимский авиационный институт, Московский технологический институт легкой промышленности, Институт проблем материаловедения А. Н. УССР, Институт сверхтвёрдых материалов А. Н. УССР.

В процессе магнитно-абразивного полирования обрабатываемый материал подвергается: механическому абразивному воздействию; воздействию переменного по величине и направлению магнитного поля, которое благоприятно отражается на эксплуатационных свойствах поверхностного слоя изделий.

Это обстоятельство позволяет магнитную обработку выделить в самостоятельный способ упрочняющей обработки [7].

## 20.1. Разновидности магнитно-абразивной обработки

### 20.1.1. Удаление заусенцев

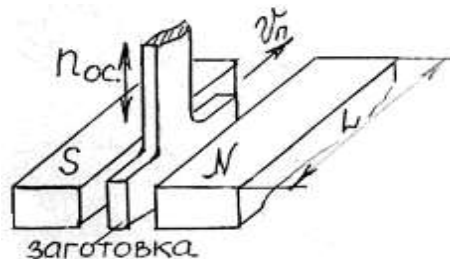


Рис. 20.1. Схема МАО по удалению заусенцев

Заготовка, совершая движение осцилляции  $n_{oc}$  в вертикальном направлении, двигается поступательно со скоростью  $V_n$  в межполюсном пространстве электромагнита, заполненном ферромагнитным абразивным порошком.

Таким способом на заготовках из стали марки 10X18H9T исходные заусенцы (после вырубки) высотой 0,2...0,4 мм удаляются полностью за 12...15 с машинного времени.

Ферромагнитный абразивный порошок – крошка закаленного чугуна зернистостью 1000/630 мкм.

### 20.1.2. Скругление кромок и удаление заусенцев в рассверленных отверстиях

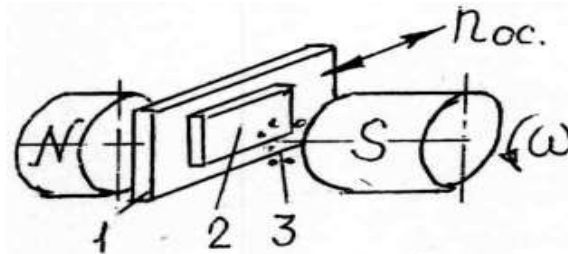


Рис. 20.2. Схема скругления кромок:

- 1 – пластина; 2 – заготовка;  
3 – ферромагнитный абразивный порошок

Пластина 1 с заготовкой 2 устанавливается в межполюсное пространство электромагнита. Туда же засыпается ферромагнитный абразивный порошок.

Пластина вместе с заготовкой совершает рабочее движение – осцилляцию с частотой  $n_{oc} = 12...23 \text{ с}^{-3}$ . Один полюс электромагнита вращается с частотой  $n = 12...23 \text{ с}^{-3}$ . При вращении он увлекает вместе с собой ферромагнитный абразивный порошок 3, осуществляющий удаление заусенцев и скругление кромок [Патент 112092 ГДР].

### 20.1.3. Очистка катаной проволоки от окалины

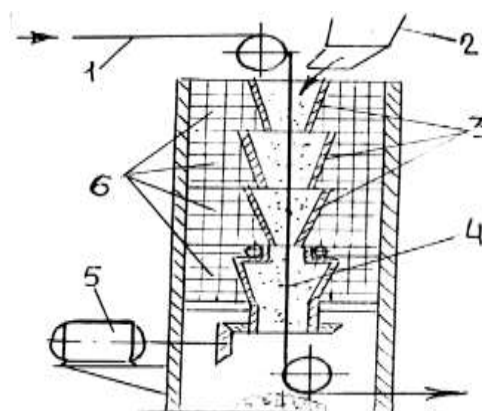


Рис. 20.3. Схема очистки проволоки:

- 1 – проволока; 4 – воронка подвижная;  
2 – бункер для абразивного порошка; 5 – электропривод;  
3 – воронки неподвижные; 6 – электромагнитная катушка

Проволока 1 с высокой скоростью протягивается через воронки 3 и 4, заполняемые ферромагнитным абразивным порошком из бункера 2.

Воронки (не магнитные) размещены внутри электромагнитных катушек 6, питаемых постоянным током.

Для повышения интенсивности очистки проволоки нижнюю воронку 4 приводят во вращение с помощью электропривода 5.

#### 20.1.4. Очитка печатных плат

В процессе изготовления и последующей эксплуатации на печатных платах (на медном покрытии) появляются оксидные пленки, которые ухудшают их электропроводность. Периодически оксидную пленку необходимо удалять. Для этого применяется следующий способ (рисунок 20.4):

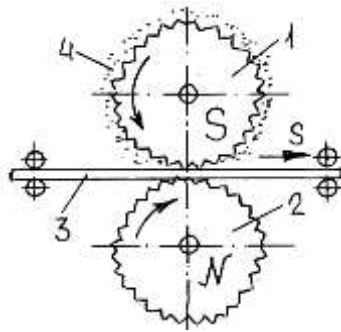


Рис. 20.4. Схема очистки печатных плат

1,2 – полюсы электромагнита; 3 – печатная плата;

4 – ферромагнитный порошок

Полюсы электромагнита выполнены в виде рифленых валиков 1 и 2, вращающихся с определенной окружной скоростью навстречу друг другу. В зазоре между ними протягивается загрязненная печатная плата 3, на которую подается ферромагнитный порошок 4. За счет магнитных сил порошок постоянно находится на ведущем валике 1 и удаляет оксидную пленку с печатной платы 3.

### 20.1.5. Получение рельефных изображений на поверхностях

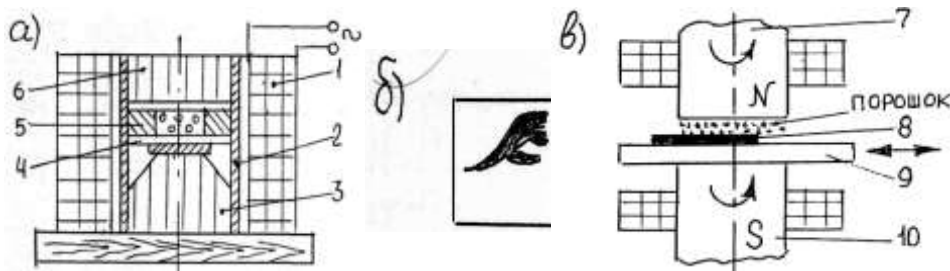


Рис. 10.5. Схема получения рельефных изображений на поверхностях

- |                        |                               |
|------------------------|-------------------------------|
| 1 – соленоид;          | 5 – форма;                    |
| 2 – немагнитная труба; | 7,10 – полюсы электромагнита; |
| 3,6 – сердечники;      | 8 – шаблон;                   |
| 4 – заготовка;         | 9 – заготовка.                |

Внутри соленоида 1 размещают немагнитную трубу 2 с вмонтированными в ней сердечниками 3 и 6. Над заготовкой 4 из хрупкого материала располагают форму 5, полость которой своим контуром повторяет контур будущего рельефного изображения. Полость заполняют кусочками постоянных магнитов. Поверхность каждого кусочка покрыта абразивным слоем.

При подключении соленоида к источнику переменного тока магнетики внутри полости формы 5 получают вертикальные перемещения и производят абразивную обработку. (Это устройство может быть использовано для сверления сквозных отверстий в хрупких материалах).

Напряженность магнитного поля составляет 10...100 А/м, а частота импульсов –  $10^4 \dots 10^5$  Гц.

Здесь заготовку 9 с шаблоном 8 помещают между вращающимися полюсами электромагнитов 7 и 10. Пространство между обрабатываемой поверхностью и верхним полюсом заполнено ферромагнитным абразивным порошком. Заготовке сообщают возвратно – поступательное движение. При этом порошок осуществляет удаление определенного припуска с участков верхней поверхности заготовки, не защищенных шаблоном.

### 20.1.6. Измельчение материалов

Установка для измельчения материалов устроена следующим образом.



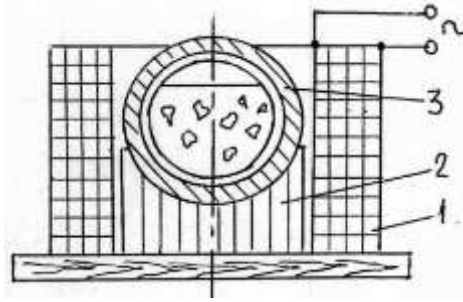


Рис. 20.6. Схема устройства для измельчения материалов:  
1 – соленоид; 2 – сердечник; 3 – контейнер

Внутри соленоида 1 размещается сердечник 2 и на нем контейнер 3 из немагнитного материала.

В контейнер помещают смесь измельчаемого материала и постоянных магнитов с абразивным покрытием. При включении переменного магнитного поля магнитным частицам сообщается движение со значительными амплитудами. В контейнер дополнительно подают циркулирующую жидкость.

С помощью наложения магнитного поля можно интенсифицировать галтовку, виброабразивную, пескоструйную обработку.

Например, при включении электромагнита 1 (рис. 20.7), охватывающего вибрирующий контейнер 2, импульсное или вращающееся магнитное поле препятствует движению ферромагнитных заготовок вместе с абразивной средой.

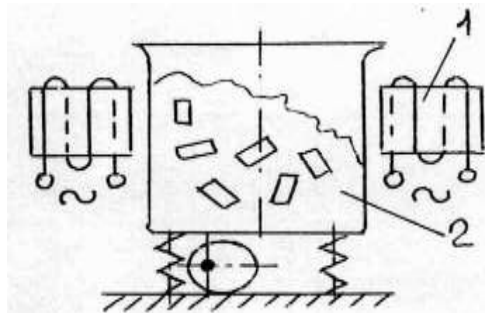


Рис. 20.7. Схема установки для интенсификации обработки с помощью наложения магнитного поля:  
1 – электромагнит; 2 – контейнер; 3 – вибратор

В результате увеличивается скорость перемещения абразивных элементов относительно заготовок и увеличивается производительность виброабразивной обработки.

В случае немагнитных заготовок для получения аналогичного эффекта абразивная среда должна обладать ферромагнитными свойствами.

Наиболее распространенной областью применения магнитно-абразивной обработки (МАО) является снижение шероховатости на обрабатываемых поверхностях с одновременным повышением качественных характеристик поверхностного слоя.

Совокупность способов, преследующих именно эти цели, называется магнитно-абразивным полированием (МАП).

## 20.2. Магнитно-электрическое шлифование

Сущность магнитно-электрического шлифования (МЭШ) заключается в том, что электропроводный шлифовальный круг вводится в контакт с обрабатываемой поверхностью детали, а на круг и деталь подается постоянный электрический ток, причем зона обработки помещается в магнитное поле, вектор магнитной индукции которого перпендикулярен вектору электрического тока. Деталь и шлифовальный круг приводятся во вращение с разной угловой скоростью.

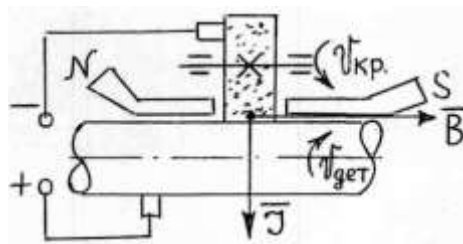


Рис. 20.8. Схема магнитно-электрического шлифования

Физическая сущность МЭШ заключается в следующем:

1) При контакте инструмента-круга с поверхностью обрабатываемой детали замыкается электрическая цепь «круг-деталь», при этом происходят все физические явления, свойственные контактной магнитно-электрической обработке (МЭО) (разогрев поверхности, ее размягчение, расплавление, выброс расплава и пластичного материала).

2) При контакте абразивного круга с обрабатываемой поверхностью образуется стружка, которая по мере движения зерна увеличивается и замыкает межэлектродный промежуток  $\delta$  между деталью и кругом.

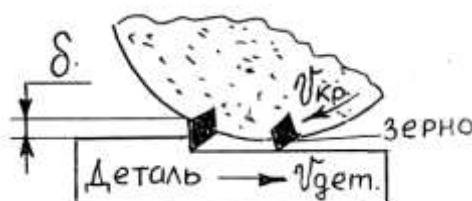


Рис. 20.9. Схема взаимодействия зерна круга с деталью

Такое короткое замыкание приводит практически к мгновенному ее расплавлению, распылению магнитным полем и удалению продуктов расплава с большой скоростью из зоны обработки, при этом очищается зерно и круг не засаливается, а расплав нагревает и обрабатывает набегающую поверхность детали.

При подобном явлении сзади стоящего (последующего) зерна расплав и пластичный материал создают дополнительную опору задней поверхности зерна, увеличивая режущую способность, так как может воспринимать большее усилие.

Исследованием было установлено, что абразивные зерна обладают пьезоэлектрическим эффектом (изменением объемов при наложении разности потенциалов; либо изменение потенциала при его деформации).

Так как процесс протекает при импульсном токе разных частот и гармоник, то зерна вибрируют, осциллируя с той же частотой, что интенсифицирует процесс шлифования, улучшает качество поверхности и изменяет физико-механические свойства.

Пользуясь этим эффектом, можно управлять процессом МЭШ, так как наибольший импульс происходит при разрушении зерна.

Если звук усиливать через усилитель, то можно услышать, как зерно «кричит», что сигнализирует о его предельной режущей возможности.

Так как часто в качестве абразивного материала шлифовальных кругов используется электрокорунд ( $Al_2O_3$ -рубин), то при наложении электрического потенциала магнитного поля происходит возбуждение энергии кристалла (его «накачка»), следовательно, он может излучать кванты энергии.

Это в свою очередь воздействует на обрабатываемую поверхность, интенсифицирует процесс, дополнительно снимает материал детали и приводит к изменениям физико-механических свойств поверхности.

Все эти основные факторы позволяют вести процесс шлифования с производительностью значительно выше производительности обычного шлифования.

### **20.2.1. Особенности абразивного резания при магнитно-абразивном полировании**

Схема перемещения зерен порошка в рабочей зоне при наружном круглом полировании дана на рис. 20.10:

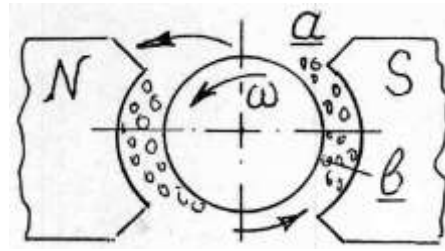


Рис. 20.10. Схема перемещения зерен порошка в рабочей зоне

Заготовка 1 размещается между полюсами магнитного индуктора. Пространство между полюсами индуктора частично или полностью заполнено магнитно-абразивным порошком. Это – рабочая зона. Пространство между полюсами индуктора и обрабатываемой поверхностью называется рабочим зазором.

Порция магнитно-абразивного порошка при включении магнитного поля удерживается силами магнитного поля в рабочем зазоре, оказывается прижатой к обрабатываемой поверхности и при вращении заготовки относительно индуктора (или наоборот) осуществляет полирование.

При этом удаляется припуск и формируется поверхность с новым микрорельефом и измененными физико-механическими свойствами поверхностного слоя.

Механизм образования резания (зафиксированный с помощью скоростной киносъемки) сводится к следующему.

Вся порция порошка в рабочем зазоре под действием сил трения со стороныдвигающейся заготовки смещается к выходу из рабочего зазора и уплотняется, встречая там основное противодействие со стороны магнитного поля.

Силы трения между зернами и поверхностью полюса помогают магнитному полю удерживать порошок внутри рабочего зазора. Не связанные между собой зерна порошка перемещаются внутри рабочего зазора.

В частности, граничащие с заготовкой зерна «а» медленно двигаются к выходу из рабочего зазора. Скорость зерна значительно меньше скорости обрабатываемой поверхности. При скорости обрабатываемой поверхности в пределах 0, ... 2,1 м/с скорость зерна составляет всего лишь 0,01...0,02 м/с, то есть меньше в 60...105 раз.

С учетом этого отношения можно принять, что скорость резания – это есть разность между скоростями обрабатываемой поверхности и зерна.

Подойдя к границе рабочего зазора, каждое из зерен «а» может либо остановиться (совершая здесь колебательные движения вдоль дуги окружности), либо выйти из рабочего зазора вместе с обрабатываемой поверхностью.

При небольшой частоте вращения заготовки эти зерна могут переходить в противоположный зазор вместе с вращающейся поверхностью заготовки.

При увеличении скорости заготовки на переходящие зерна действуют увеличенные центробежные силы, которые совместно с магнитными силами заставляют переходящие зерна отрываться от заготовки и оседать на нерабочих поверхностях полюсов.

Разбрасывание зерен является одной из причин постепенного снижения интенсивного удаления припуска с увеличением длительности полирования.

Свободные места зерен «а» могут занимать зерна «в» (кратковременно) из более глубоких слоев порошковой массы.

На каждое зерно действует сила резания  $P_z$  (если зерно внедрилось в поверхность и осуществляет микрорезание), либо силы трения  $F_{тр}$ .

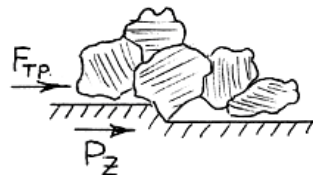


Рис. 20.11. Силы, действующие на зерно

Эти силы стремятся увлечь контактирующее зерно вместе с движущейся поверхностью и повернуть его относительно собственного момента инерции. Движению зерна вместе с поверхностью заготовки и их поворотам препятствуют окружающие зерна, которые под действием сил магнитного поля образуют достаточно плотную массу.

Если сила резания превысит сопротивление повороту зерна (из-за увеличенной микронеровности), то такое зерно поворачивается и в контакт с заготовкой вступают его новые участки и новые режущие кромки.

Именно этими поворотами объясняется прерывистый характер рисок – следов абразивного резания на поверхности заготовки.

При сообщении порошковой массе дополнительных движений с помощью осцилляции (колебаний) заготовки (или полюсов) или пульсирующего магнитного поля контакт зерен с заготовкой приобретает более прерывистый характер.

Силы трения  $F_{mp}$  уменьшаются и порошок лучше удерживается магнитными силами в рабочем зазоре.

Одновременно увеличивается подвижность зерен внутри рабочих зазоров и интенсифицируется вступление в контакт с заготовкой новых режущих кромок. Это явление называется самозатачиванием порошковой массы.

Естественно, в процессе полирования происходит постепенное разрушение зерен путем вырывания из ее мягкой ферромагнитной основы зерна (матрицы) вкрапленных в нее режущих центров или путем истирания матрицы. При этом тоже происходит обнажение новых режущих кромок.

Зерна ферромагнитного порошка в процессе полирования контактируют с заготовкой разными участками своей поверхности, отличающимися твердостью и геометрической формой, а значит и разной способностью производить резание.

Обработанная поверхность представляет собой совокупность рисок – следов резания и выглаженных участков. Направление рисок определяется скоростями рабочих движений заготовки и магнитного индуктора.

### 20.2.2. Стружкообразование

Установлено, что 9...15% объема царапин удалено диспергированием (лат. *Dispergo* – рассеиваю), тонким измельчением металла в стружку, а остальной объем металла вытеснен из царапин пластически в боковые навалы.

Соотношение размеров стружки – длины и толщины, лежит в пределах 5...20. На их поверхности видны отдельные сильно деформированные элементы. Следов оплавления стружек не обнаружено.

При одинаковых размерах радиуса кривизны стружек МАП на порядок меньше (т. е. в 10 раз), чем у стружек, полученных при шлифовании абразивной лентой.

Это косвенно свидетельствует о более высокой степени пластических деформаций измельченного металла в процессе магнитно-абразивного полирования.

Результатом пластического деформирования поверхности является повышение твердости тонкого приповерхностного слоя и образование в нем остаточных напряжений сжатия.

В теории абразивной обработки установлено, что стружкообразование возможно при определенном соотношении между глубиной  $h$  внедрения режущих вершин зерен абразивного инструмента в обрабатываемую поверхность и радиусов округлений  $r_{окр}$  этих вершин.

Для инструментальной стали У8 (отожженной) это соотношение лежит в следующих пределах:  $\varepsilon = \frac{h}{r_{окр}} > 0,2$ .

При меньшем соотношении возможно лишь пластическое или упругое деформирование.

Для МАП характерно внедрение зерен  $h \leq 0,1 \dots 0,4$  мкм. Для порошка 23АМ40Fe (белый электрокорунд с зернистостью М40)  $r_{окр}$  вершин зерен должен составлять 3...4 мкм.

Образование стружки при МАП сталей (в отличие от шлифования) происходит при  $\varepsilon \leq 0,005 \dots 0,13$ , то есть при более неблагоприятных условиях.

И силы, необходимые для стружкообразования, при МАП оказываются меньше, чем при шлифовании.

Для МАП ферромагнитных сталей давление порошка на обрабатываемую поверхность составляет 0,3...0,2 МПа.

При пересчете этих давлений к отдельному контактирующему зерну усилие, определяющее внедрение зерна в обрабатываемую поверхность, может составлять 0,025...0,125 Н.

Б. Г. Македонски, используя формулу

$$F_y = C_y \cdot \varepsilon \cdot P_y \cdot r_{окр}^2, \text{ Н} \quad (20.1)$$

где  $C_y = 3,14$  – постоянный коэффициент, учитывающий свойства материала;

$\varepsilon = 0,25$  – соотношение между глубиной  $h$  и  $r_{окр}$ ;

$P_y = 8240$  Па;

$r_{окр} = 6 \dots 12$  мкм – радиус скругления вершин зерен.

при шлифовании стали Ш15Х, определил, что необходимая для стружкообразования сила должна находиться в пределах  $F_y = 0,23 \dots 0,93$  Н, что значительно больше, чем среднее значение сил, действующих при магнитно-абразивном полировании.

Особенности стружкообразования МАП объясняются повышенной пластичностью обрабатываемых сталей в присутствии переменного магнитного поля.

С. Т. Кишкин и А. А. Клышин опубликовали обнаруженное ими снижение на 250% напряжения текучести  $\sigma_t$  углеродистой стали в присутствии поперечного к направлению нагрузки магнитного поля величиной  $B=0,005$  Тл.

Присутствие в СОЖ поверхностно-активных веществ снижает поверхностную энергию металла, снижает работу, необходимую на разрушение и пластическое деформирование поверхности, увеличивая микротрещины, предразрушает поверхностный слой.

В этом случае производительность МАП резко увеличивается.

Увеличение скорости резания (скорости деформации) сопровождается упрочнением разрушаемого материала. Глубина внедрения зерен порошка в обрабатываемую поверхность автоматически уменьшается и съём металла на одинаковом пути резания уменьшается.

С учетом изложенных особенностей МАП глубина внедрения зерен порошка в обрабатываемую поверхность может быть выражена зависимостью степенного вида:

$$h = C_h \cdot \frac{F_y^m}{r^r \cdot (K_m \cdot H)^s}, \quad \text{мкм} \quad (20.2)$$

где  $C_h$  – коэффициент, учитывающий изменение прочностных свойств поверхностного слоя по сравнению с основным обрабатываемым материалом (в результате воздействия СОЖ, скорости деформации, предварительного наклепа...);

$F_y$  – сила, прижимающая зерно, Н;

$r$  – радиус вершин зерна, мкм;

$H$  – твердость обрабатываемого материала;

$K_m = H_m / H$  – коэффициент, учитывающий изменение твердости материала в присутствии переменного магнитного поля;

$m, r, s$  – показатели степени. [7]

## 21. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Когда начали применять магнитное поле для абразивной обработки материалов?
2. Разновидности магнитно-абразивной обработки.
3. Какова сущность магнитно-электрического шлифования?



4. В чем состоят особенности абразивного резания при магнитно-абразивном полировании?

## **22. КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

Электрофизические и электрохимические способы изготовления деталей имеют ряд существенных преимуществ перед традиционными методами. К ним можно отнести:

- высокая точность ЭЭО;
- большая производительность электрохимической размерной обработки

- хорошее качество поверхности, получаемой ультразвуковым методом. Однако технологи хотели бы, чтобы существовали методы обработки, содержащие все вышеперечисленные достоинства. [1].

С этой целью стали оптимизировать процессы путем комбинации известных методов, усиливая их положительные черты. Большинство известных комбинированных методов обработки предложено, исследовано и применено в производстве советскими учеными и инженерами. При совместном использовании анодного растворения металла с воздействием абразива – (анодно-абразивная обработка) – на обрабатываемую поверхность, твердые частицы (абразивные зерна или наполнитель) повреждают пленку, активируя тем самым процесс электрохимической обработки. Размеры абразивных зерен, определяющие межэлектродный зазор, как правило, не превышают десятых долей мм. При таких малых зазорах плотность тока будет значительно больше, чем в случае размерной ЭХО. Резко возрастает скорость съема металла в зоне действия абразивных зерен инструмента.

В отличие от обычного шлифования при анодно-абразивной обработке (ААО) на поверхности заготовки не образуется более прочный наклепанный слой, а производительность шлифования повышается.

Следовательно, интенсивность съема металла при анодном растворении возрастает вследствие механического удаления пассивирующей пленки и ускорения процесса выноса продуктов обработки из зазора, а электрохимическое растворение части металла, в свою очередь, способствует повышению скорости механического шлифования. Кроме указанных составляющих съема металла при малых зазорах может иметь место электроэрозионный процесс.

Различают несколько разновидностей использования анодно-абразивной обработки:

- 1) абразивнонесущим токопроводящим инструментом;
- 2) электронейтральным инструментом и свободным абразивом.

В первом случае инструмент имеет форму кругов, брусков, применяемых при механическом шлифовании или повторяющих форму обрабатываемых участков детали.

Однако во всех случаях связка абразивного инструмента должна быть электропроводной. Различают электро-абразивное и электро-алмазное шлифование, полирование, притирку.

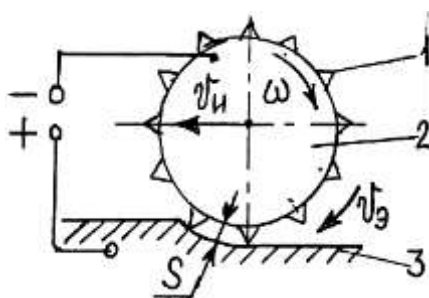


Рис. 22.1. Схема анодно-абразивного шлифования  
1 – абразивное зерно; 2 – инструмент (круг); 3 – заготовка

При шлифовании инструмент 2 выполнен в форме абразивного или алмазного круга на металлической связке. Абразивные зерна 1 могут быть равномерно распределены по всему объему инструмента 2 или располагаться только на его поверхности.

Алмазные зерна обычно закрепляют в форме кольца на внешней окружности инструмента или вдавливают их в наружную поверхность оправки. Инструмент 2 и заготовку 3 подключают к полюсам источника питания.

В процессе обработки инструмент вращают и подают на врезание со скоростью  $V_u$ .

Межэлектродный зазор  $S$  ограничен выступанием зерен абразива 1, поэтому нет необходимости применять сложные следящие системы для поддержания постоянных зазоров.

Электролит подают поливом на поверхность, либо прокачивают через внутреннюю полость инструмента. В последнем случае он должен иметь поры для протекания жидкости. Благодаря вращению инструмента электролит протекает через зазор со скоростью до 15...20 м/с.

Следовательно, в пространстве между инструментом 2 и заготовкой 3 имеются все условия для интенсивного процесса ЭХО: малые зазоры, достаточная скорость протекания электролита, возможность протекания тока.

Выступающие зерна в зависимости от усилия прижима инструмента к заготовке удаляют как срезаемый материал заготовки, так и продукты анодного растворения.

Во втором случае, когда используют диэлектрический абразивный круг 1, то напряжение подают на специальный электрод-инструмент 3. Такую разновидность метода называют ААО электронейтральным инструментом.

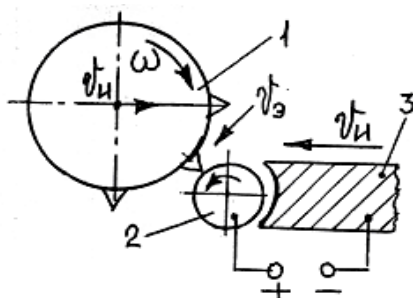


Рис. 22.2. Схема анодно-абразивного шлифования электронейтральным инструментом:

1 – абразивный круг; 2 – заготовка; 3 – электрод-инструмент

Он может применяться для шлифования, полирования, притирки, хонингования, суперфинишных операций.

Здесь уже необходимы специальные устройства для поддержания зазора между электродом-инструментом 3 и заготовкой 2.

С этой целью обычно используют диэлектрические упоры. При шлифовании абразивный инструмент (круг) 1 имеет скорость до 25...30 м/с.

Круг и электрод-инструмент 3 подают к заготовке 2 со скоростью  $v_u$ . Электролит поступает через зазор со скоростью  $v_з$ .

Процесс съема металла протекает за счет абразивного съема и анодного растворения.

При операции притирки вместо абразивного инструмента может применяться притир из пластмассы или дерева. Притир служит только для механического удаления пленки оксидов с обрабатываемой поверхности и способствует ускорению процесса анодного растворения заготовки.

При ААО несвязанным абразивом абразивные зерна не связаны с заготовкой или инструментом. Их называют свободными. Зерна могут и не иметь абразивных свойств, тогда их называют наполнителем.

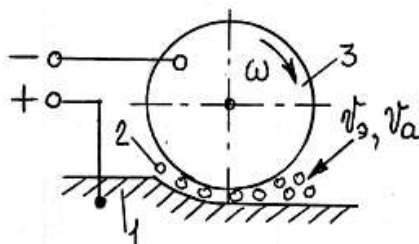


Рис. 22.3. Схема анодно-абразивной обработки свободным абразивом:  
1 – заготовка; 2 – свободный абразив; 3 – инструмент

Абразивные зерна или наполнитель 2 вместе с электролитом подают в зазор между токопроводящим инструментом 3 и заготовкой 1.

Абразив перемещается инструментом со скоростью  $V_a$ , удаляет часть припуска и вместе с электролитом выносит продукты анодного растворения из зазора. Требуемый зазор поддерживается абразивными зернами, находящимися между инструментом 3 и заготовкой 1.

Если необходимо только удалить пленку, вызывающую пассивацию обрабатываемой поверхности, применяют наполнитель из фарфоровых, стеклянных или пластмассовых шариков, диаметр которых меньше заданного значения зазора между инструментом и заготовкой.

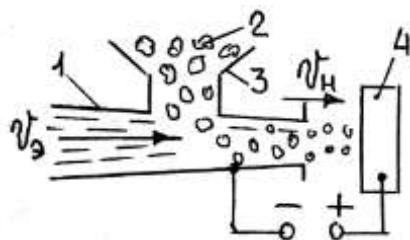


Рис. 22.4. Схема подачи наполнителя к заготовке:  
1 – сопло; 3 – дозатор; 2 – наполнитель; 4 – заготовка

Если область обработки удалена от инструмента, то наполнитель 2 могут подавать струей электролита или посредством центробежных сил, возникающих при вращении заготовки, например, крыльчатки вентилятора или колеса насоса. При подаче наполнителя струей электролит прокачивают со скоростью  $V_з$  через сопло 1. В струю из дозатора 3 вводят наполнитель 2, который приобретает скорость  $V_н$  и транспортируется струей к обрабатываемой поверхности заготовки 4.

Для повышения электропроводности среды наполнитель может быть изготовлен из токопроводящих материалов: шариков из металла или графитовых композиций. Перед повторным использованием электролит отделяется от наполнителя (например, с помощью сита). К комбинированным методам относится электроэрозионно-химическая обработка.

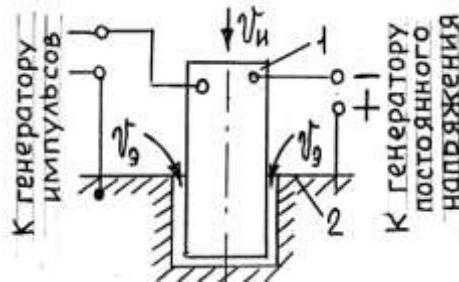


Рис. 22.5. Схема комбинированного электроэрозионно-химического метода  
1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка

В данной схеме электрод инструмент 1 и заготовку 2 подключают к двум источникам:

- генератору постоянного напряжения, применяемому для размерной электрохимической обработки (ЭХО);
- генератору импульсов, применяемому для электроэрозионной обработки (ЭЭО).

Иногда используют один источник питания, в котором формируется требуемая форма напряжения. В качестве рабочей среды применяют электролит.

С помощью этого метода получают отверстия, углубления пазы. Скорость подачи электрода-инструмента  $V_n$  в несколько раз выше, чем при ЭЭО и ЭХ прошивании.

Совмещают также электрохимическую (ЭХО) и ультразвуковую обработку (УЗО).

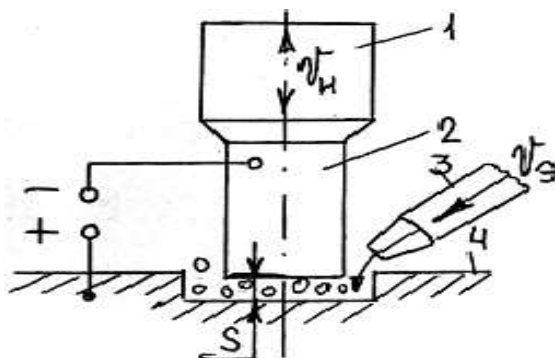


Рис. 22.6. Схема совмещения ЭХО и УЗО:

1 – ультразвуковой преобразователь;

3 – сопло для подачи суспензии;

2 – инструмент-электрод; 4 – заготовка

Съем металла с заготовки 4 происходит в среде электролита с абразивными зернами.

Суспензия поступает из сопла 3 со скоростью  $V_s$  в межэлектродный зазор  $S$ , который регулируется размерами зерен.

Инструмент 2 кроме поступательного перемещения к заготовке 4 колеблется вдоль оси с ультразвуковой частотой. Эти колебания передаются инструменту от ультразвукового преобразователя 1.

Процесс удаления материала происходит как за счет скалывания частиц заготовки 4, так и за счет анодного растворения припуска.

Использование ЭХО с наложением УЗ колебаний резко повышает производительность процесса и снижает износ инструмента (при УЗ обработке).

При изготовлении круглых отверстий можно использовать абразивонесущий инструмент. Заготовка вращается, а инструменту, который выполнен в форме абразивного круга с отверстием для подвода электролита или имеет пористую конструкцию, сообщают ультразвуковые колебания. Электролит прокачивается с определенной скоростью в зону обработки.

Ультразвуковые колебания используются при светолучевой обработке. На заготовку, в которой с помощью лазерного луча выполняются отверстия, подают УЗ колебания, обычно продольные. При действии ультразвука расплавленный металл, образующий наплыв вокруг кромки обрабатываемого отверстия, не затекает в отверстие, а распыляется. Это повышает точность формы и размеров отверстий.

При обработке алюминия, нержавеющей стали и бронзы с воздействием УЗ колебаний (частотой 20 кГц, амплитудой 20...40 мкм) наибольший эффект достигается при обработке алюминия, наименьший

– при обработке бронзы. С увеличением амплитуды колебаний эффект растет. Этот метод может быть применен и при светолучевой резке.

Если пространство межэлектродного промежутка при ЭХО облучить лазером, то резко возрастает скорость анодного растворения. Причем, возникает возможность ускорять съём металла с тех участков, где припуск максимальный. Благодаря этому можно повысить точность изготовления деталей.

Такой метод комбинированной обработки называют электрохимико-лучевым. В месте облучения необходимо предусмотреть прозрачное окно из материала, устойчивого к воздействию тепла и струи электролита.

Луч, попадая в зону протекания процесса анодного растворения, нагревает электролит и повышает его электропроводность. Соответственно возрастает плотность тока, то есть ускоряется съём металла с заготовки.

Недостатком данного метода является сильное поглощение лучевой энергии электролитом, особенно загрязненным.

При использовании комбинированных методов применяют в основном те же составы электролитов, что и при электрохимической размерной обработке. Иногда к ним добавляют антикоррозийные компоненты.

## **22.1. Технологические показатели**

К технологическим показателям комбинированных методов обработки материалов относятся: точность обработки, качество поверхности, производительность, режим обработки, износ инструмента.

### **22.1.1. Точность обработки**

Анодно-абразивный метод используется как для черновых, так и для чистовых операций. При черновой обработке режимы выбирают исходя из условия получения максимальной производительности. Для чистовых операций необходимо обеспечить высокую точность и хорошее качество обработанной поверхности.

Погрешность после электро-абразивного шлифования находится в пределах 0,02...0,05 мм, а после электро-алмазного – 0,01...0,02 мм.

Погрешность (для сравнения) алмазного шлифования составляет 1...5 мкм. Снижение точности при наложении тока объясняется повы-

шенным съемом металла на кромках и удалением его с поверхности, которая обработана абразивом начисто.

Для повышения точности обработки перед последними ходами инструмента ток выключают и осуществляют выхаживание.

Электроэрозионно-химический метод позволяет получить такую же точность размеров, как ЭЭО и ЭХО. При небольшой глубине отверстий погрешности не превышают 0,1...0,3 мм.

При наложении УЗ колебаний погрешность размеров составляет 0,1...0,15 мм. Это значительно хуже, чем при обычной ультразвуковой обработке, где погрешности не превышают 0,05 мм.

### 22.1.2. Качество поверхности

Из-за постоянного обновления абразивных зерен усилия резания при анодно-абразивной обработке (ААО) в 1,5...2,0 раза ниже, чем при шлифовании. При этом снижается наклеп поверхности, не образуются микротрещины. Металл, снимаемый с заготовки, не налипает на инструмент – исключается сильный нагрев из-за трения контактных поверхностей и не возникают местные прижоги.

Такие дефекты особенно опасны для высоконагруженных деталей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок (зубчатых колес, элементов шлицевых соединений).

Отсутствие шлифовальных прижогов позволяет повысить ресурс деталей. Шероховатость поверхности после электро-алмазной и электро-абразивной обработки уменьшается из-за анодного растворения вершин микронеровностей.

Средняя высота неровностей  $R_z$  может быть определена по зависимости:

$$R_z = \kappa \cdot R_{z_{ш}}, \text{ мкм} \quad (22.1)$$

где  $R_{z_{ш}}$  – высота неровностей после шлифования, мкм;

$\kappa = 0,1...0,5$  – коэффициент, учитывающий скругление выступов при наложении тока.

С целью повышения точности последние ходы выполняют без тока и тогда шероховатость электро-абразивной и электро-алмазной обработки близка к получаемой после шлифования инструментом той же зернистости.

Если применяют электрически нейтральный инструмент, то обработку все время выполняют, не выключая тока. Это обеспечивает полу-



чение минимального наклепа, отсутствие прижогов поверхности, снижение высоты неровностей до  $R_a = 0,1 \dots 0,15$  мкм.

При обработке свободным абразивом удается получить шероховатость штампованных или литых деталей не ниже  $R_a = 4,5$  мкм.

Такие операции позволяют механизировать ручной труд при доводке труднодоступных поверхностей.

Электроэрозионно-химический метод дает возможность получить у стальных деталей закаленный поверхностный слой, благодаря которому повышается их износостойкость. Толщина этого слоя несколько меньше, чем после электроэрозионной обработки (ЭЭО).

Однако вследствие разрядов заметно ухудшается шероховатость поверхности по сравнению с ЭХО.

На черновых операциях средняя высота неровностей при обработке сталей  $R_z = 100 \dots 150$  мкм, при чистовых режимах  $R_a = 2 \dots 2,5$  мкм.

При наложении ультразвуковых колебаний на электрохимический процесс шероховатость несколько снижается по сравнению с обычной УЗО. Это объясняется скруглением вершин выступов.

Облучение зоны обработки лазером не оказывает заметного влияния на качество поверхности.

### 22.1.3. Производительность

Все комбинированные методы ускоряют процесс съема металла.

При черновых режимах ААО съем металла происходит в основном за счет эрозии. Черновая обработка выполняется при повышенных напряжениях.

При использовании электронейтрального инструмента скорость съема возрастает из-за анодного растворения и, главное, из-за интенсификации процесса резания абразивным инструментом.

Производительность процесса ААО с применением свободного абразива или наполнителя в несколько раз выше, чем при аналогичных операциях механической обработки.

Скорость съема металла при электроэрозионно-химическом методе может быть оценена зависимостью:

$$Q = I_1 \cdot \kappa_1, \quad (22.2)$$

где  $I_1$  – суммарная сила тока через межэлектродный промежуток, А.

$k_1$  – коэффициент, учитывающий материалы электродов, режим обработки и условия эвакуации продуктов обработки;

Значение  $k_1$  зависит прежде всего от глубины получаемой полости или отверстия. Так, в начале процесса скорость подачи электрода-инструмента может достигать 1,5 мм/с ( $k_1=20...30$ ), но уже на глубине 2...4 мм она снижается в 5...10 раз. Скорость подачи электрода-инструмента зависит от скорости прокачки электролита.

Скорость съема металла при наложении УЗ колебаний на ЭХО может быть в несколько раз выше, чем при УЗО

$$Q = k \cdot Q_{УЗ} \quad (22.3)$$

где  $k = 3...12$  – коэффициент, учитывающий изменение скорости съема металла при наложении тока.

Если УЗ колебания накладывают на абразивонесущий инструмент, то скорость процесса по сравнению с обработкой без ультразвука возрастает на 20...50 %.

Скорость анодного растворения при облучении лазером может возрасти в 15...20 раз.

#### 22.1.4. Режим обработки

При проектировании процесса обработки следует выбрать и рассчитать:

1) Состав электролита в зависимости от обрабатываемого сплава.

При электро-абразивном и электро-алмазном шлифовании применяют растворы, содержащие хлориды натрия и калия, нитрат и нитрит натрия.

Массовая доля нитрита натрия в растворе не превышает десятых долей процента (для защиты от коррозии деталей оборудования и заготовки).

Для снижения вязкости в раствор добавляют несколько процентов фторида натрия.

Для повышения качества поверхности добавляют: олеиновую кислоту, сульфаты, фосфаты.

Шлифование электронейтральным инструментом выполняют с применением водных растворов буры, нитратов натрия и калия. Для твердых сплавов в электролит добавляют жидкое стекло.

Обработку электролитом с твердым наполнителем ведут в растворе хлорида натрия. Применение даже слабого (2...3 %) раствора кисло-

ты способствует значительному повышению электропроводности электролита.

Электроэрозионно-химическая обработка может осуществляться в 10...13 %-ных растворах хлорида или нитрата натрия ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Для снижения износа инструмента в рабочую зону подают углеродосодержащие газы, в частности бутан.

2) Температуру электролита в баке.

При всех методах комбинированной обработки она остается такой же, как и при электрохимической обработке – более  $20^\circ\text{C}$ .

3) Напряжение на электродах.

При анодно-абразивной обработке для черновых операций – 15...32 В, для чистовых операций – 3...15 В. Для твердых сплавов – нижние пределы. Если используют электропроводный наполнитель, то напряжение на электродах может быть до 80 В.

При электроэрозионно-химической обработке – 12...30 В; для прошивания отверстий – 25...30 В; при разрезании вращающимся электродом-инструментом напряжение должно быть меньше 20 В.

При наложении ультразвуковых колебаний значение напряжения зависит от размеров абразивных зерен. Напряжение рассчитывается по экспериментальной зависимости:

$$U = 4,5 + 0,1 \cdot \ell, \text{ В} \quad (22.4)$$

где  $\ell$  – размер абразивного зерна, мкм.

При облучении зоны обработки лазером напряжение можно снизить в 1,5...2 раза.

4) Давление инструмента на заготовку.

Для электро-абразивного и электро-алмазного шлифования связанным и свободным абразивом для получения наиболее высокой производительности и точности давления инструмента на обрабатываемую поверхность должно быть 0,2...0,5 МПа. При шлифовании электронейтральным инструментом электрод-инструмент не касается заготовки. При полировании и хонинговании – 0,05...0,3 МПа. Оно обеспечивает шероховатость до  $R_a = 0,04$  мкм.

5) Выбор оборудования, электрода-инструмента, зернистости абразива и наполнителя.

Выполняется по рекомендациям.

6) Расчет скорости перемещения рабочей части инструмента относительно обрабатываемой поверхности, т. е. движения, не связанного с подачей инструмента.

Увеличение скорости движения инструмента улучшает вынос продуктов обработки и способствует ускорению процесса, повышению качества детали. Однако окружная скорость ограничена прочностью кругов, возможностями подачи электролита.

Для шлифования абразивным и алмазным инструментом со связанным и свободным зерном частота вращения  $n$  круга диаметром  $D_k$  составит:

$$n = \frac{V}{\pi \cdot D_k},$$

где  $V=18...30$  м/с – скорость на периферии инструмента;  $V = \omega \cdot R_k$ .

При электронейтральном инструменте окружная скорость круга при шлифовании такая же, а при хонинговании она определяется числом ходов бруска в единицу времени (обычно 0,5...1,5 двойных хода в секунду) и частотой вращения заготовки.

Общую скорость  $V_{общ}$  находят путем сложения скорости  $V_1$  движения инструмента 1 вдоль оси отверстия и скорости  $V_2$  от вращения заготовки 2 (рис. 22.7):

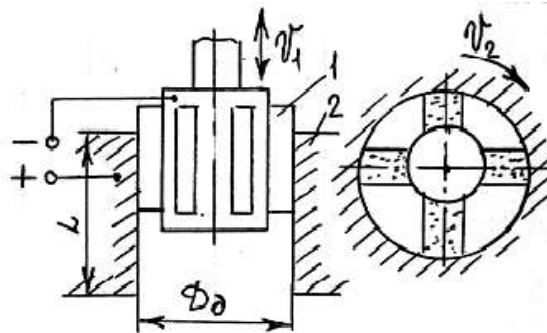


Рис. 22.7. Схема хонингования:  
1 – инструмент; 2 – заготовка

$$V_{общ} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2} \quad (22.5)$$

где

$$V_1 = L \cdot n_1 \quad (22.6)$$

где  $L$  – длина обрабатываемого отверстия, м;

$n_1$  – число двойных ходов в секунду.

$$V_2 = \pi \cdot D_0 \cdot n \quad (22.7)$$

где  $D_0$  – диаметр отверстия, м;

$n$  – частота вращения заготовки,  $c^{-1}$ .

Общая скорость  $V_{общ}$  может составлять 1...10 м/с. Скорость перемещения наполнителя зависит от скорости электролита и изменяется в широких пределах (1...30 м/с).

Наложение УЗ колебаний приводит к ускорению движения абразивных частиц. Скорость здесь задают через частоту  $f$  и амплитуду колебаний инструмента, как при обычной УЗО.

### 22.1.5. Износ (и профилирование)

Круги для электроалмазной и электроабразивной обработки, полученные прессованием или литьем, имеют высокую скорость. Их износ при обработке даже фасонных поверхностей не превышает 2 % от объема снятого металла (в 80...100 раз меньше, чем при обычном шлифовании). У кругов с графитовым наполнителем износ на порядок (в 10 раз) выше и их необходимо часто править.

Круги, изготовленные гальваническим методом и накатыванием, имеют тонкий рабочий слой; когда он изнашивается, круг становится непригодным.

При электроэрозионно-химическом методе относительный износ инструмента зависит от плотности тока на аноде и площади обрабатываемой поверхности.

Так, с увеличением плотности тока с 1 до 5 А/мм<sup>2</sup> износ возрастает в 6...8 раз и для графитовых материалов составляет 0,5...3,0 %, для чугуна — 4...8 %, для латуни и меди – до 5 % объема снятого металла.

Износ инструмента при наложении УЗ колебаний зависит от плотности тока. Плотность тока ограничивают значениями 0,15...0,2 А/мм<sup>2</sup>. При этом износ инструмента в 8..10 раз ниже, чем при ультразвуковом прошивании.

#### Профилирование круга

При профилировании круга применяют электроэрозионную и электрохимическую обработку:

- точение твердосплавными и минералокерамическими резцами (резцы выполняют в форме роликов и набирают их на оправку);
- точение алмазными резцами и вращающимися роликами (чистовое профилирование);
- пластической деформацией (инструмент-ролик) с нагревом зоны обработки.

## 23. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое комбинированные методы обработки?
2. Охарактеризуйте анодно-абразивную обработку.
3. Поясните способ электро-абразивного шлифования электронной-тральным инструментом.
4. Какие факторы влияют на съем металла при использовании свободного абразива или наполнителя?
5. В чем сущность электроэрозионно-химической обработки?
6. Какое влияние на технологические показатели процесса УЗО оказывает анодное растворение металла?
7. Как влияет световой луч на процесс ЭХО?
8. Какие технологические показатели имеет электроэрозионно-химическая обработка по сравнению с ЭЭО и ЭХО?

Таблица 23.1

### Характерные показатели новых методов обработки металлов

Обработка	мах $V$ съема металла, $\frac{см^3}{мин}$	Потреб- ляемая $N, кВт$	Ско- рость реза- ния, $\frac{м}{мин}$	Ско- рость про- плавле- ния, $\frac{см}{мин}$	Точность, $мкм$		Типовой станок	
					до- стига- емая	При мах ско- рости съема ме- талла	$N,$ кВт	Стои- мость $T,$ руб. *
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Токарная	1640		61	–	2,5	125	20	6,5
Шлифование	820	10	3	–	2,5	125	20	10
Плазменная	164	20	15	25,4	250	2500	200	8,5
Эрозионная	5	40	–	12,7	12	125	10	10
Электрохи- мическая	16,4	160	–	12,7	50	24	200	88
Ультразву- ковая	0,82	200	–	0,5	5	25	20	4,2

Электрон- ным лучом	0,008	10.000	61	15	5	25	10	66
Рубиновым лазером	0,0048	60.000	–	10	50	125	10	4,2

\* В ценах 1973 года.

## Лабораторная работа № 8

# ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ РАЗЛИЧНОЙ СЕРИЙНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение методик экономического обоснования применения металлорежущих станков универсальных, с числовым программным управлением, автоматов, многоцелевых и приобретение практических навыков выбора оборудования для реализации технологических процессов в условиях единичного, серийного и массового производства.

## 2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, УЧИТЫВАЕМЫЕ ПРИ ВЫБОРЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Вопросы выбора групп, типов и моделей оборудования рассматриваются на различных стадиях технологической подготовки производства. Предварительно группу оборудования выбирают при назначении способа обработки поверхности, обеспечивающего выполнение технических требований, предъявляемых к поверхностям. При составлении технологического маршрута обработки и при его технико-экономическом обосновании выбирают конкретную модель станка по следующим показателям:

- 1) вид обработки – токарная, фрезерная, сверлильная и т. д.;
- 2) технологические возможности станка (размеры обрабатываемых деталей, габаритные размеры рабочей зоны станка, габаритные размеры станка (высота от линии центров станка до станины, расстояние между центрами станка (станки токарной группы), размеры стола (станки фрезерной группы)) и т. п., мощность электродвигателей приводов главного движения и подач, диапазоны регулирования приводов главного движения и подач, частоты вращения шпинделя и величины подач;
- 3) возможность механизации и автоматизации операций;
- 4) цена станка.

На основании проведенного анализа при соответствии технологической операции технологическим возможностям оборудования выби-



рают оборудование, применяемое на предприятии (либо по каталогу оборудования при проектировании новых участков механической обработки).

### 3. ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ ЕДИНИЧНОГО И МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

При единичном и мелкосерийном производстве на одном станке выполняют несколько различных операций, поэтому выбранный станок должен удовлетворять технологическим требованиям всех намеченных обработок.

В таких условиях единичного, мелкосерийного и ремонтного производства необходимо применять оборудование универсальное с ручным управлением.

Однако при выборе оборудования для условий единичного и мелкосерийного производства необходимо знать, что точность и качество обработанной поверхности зависит от точности станков и от квалификации станочника. Нельзя, например, получить на токарном станке при обработке резцом валик с допуском 0,01 мм по диаметру. Такую работу может выполнить только токарь высокой квалификации. В то же время эту точность легко получить на круглошлифовальном станке. Поэтому при выборе универсального оборудования необходимо руководствоваться данными о достижимой точности оборудования. В табл. 3.1 приведены некоторые данные о величинах отклонений геометрической формы при обработке на металлорежущих станках [4].

Таблица 3.1

Отклонение геометрической формы при обработке  
на универсальных металлорежущих станках

Станки	Отклонение формы	Значение отклонения при обработке		Примечание
		черновой	чистовой	
Токарные общего назначения	Овальность при высоте центров:			
	до 400	0,03	0,02	—
	> 800	0,06	0,04	—
	Конусообразность	0,08	0,05	на длине 300
Карусельные	Вогнутость при обработке торцовой поверхности	0,06	0,04	на диаметре 300

Станки	Отклонение формы	Значение отклонения при обработке		Примечание
		черновой	чистовой	
	Овальность при наибольшем диаметре обрабатываемой детали:			на диаметре:
	до 1600	0,04	0,025	400
	1600–2500	0,06	0,04	600
	2500–4000	0,08	0,05	1000
	4000–8000	0,08	0,06	1500
	8000–10000	0,10	0,07	2000
	свыше 10000	0,12	0,08	2000
	Конусообразность, бочкообразность и седлообразность при наибольшем диаметре обрабатываемой детали:			на длине:
	до 1600	0,08	0,05	800
	1600–3200	0,10	0,07	1200
	свыше 3200	0,12	0,08	1500
	Вогнутость при обработке торцовой поверхности и наибольшем диаметре обрабатываемого изделия			на диаметре:
	до 1600	0,12	0,08	1200
	Продольно-строгальные	2500–4000	0,18	0,12
4000–8000		0,23	0,15	5000
8000–10000		0,27	0,18	7500
свыше 10000		0,35	0,24	7500
От плоскостности		0,05	0,03	на длине 1000
Продольно-строгальные	От параллельности верхней обработанной поверхности основанию при длине строгания:			

Станки	Отклонение формы	Значение отклонения при обработке		Примечание
		черновой	чистовой	
Продольно-строгальные Фрезерные консольные	до 1000	0,05	0,03	—
	> 2000	0,08	0,05	—
	> 3000	0,10	0,06	—
	> 4000	0,12	0,07	—
	> 6000	0,15	0,10	—
	> 8000	0,20	0,12	—
	От перпендикулярности обработанных верхней и боковой поверхностей при ширине строгания:			на длине:
	до 2000	0,05	0,03	300
	св. 2000	0,08	0,05	500
	От плоскостности и параллельности верхней обработанной поверхности основанию	0,10	0,06	300
Фрезерные консольные Продольно-фрезерные	От перпендикулярности боковых поверхностей основанию	0,05	0,04	150
	От взаимной перпендикулярности боковых (и торцевых) поверхностей	0,08	0,05	3000
	От плоскостности			
Продольно-фрезерные	От параллельности верхней обработанной поверхности основанию при длине обработки:			
Продольно-фрезерные	до 1000	0,05	0,03	—
Продольно-фрезерные Горизонталь-	> 2000	0,08	0,05	—
	> 3000	0,10	0,06	—
	> 4000	0,12	0,07	—

Станки	Отклонение формы	Значение отклонения при обработке		Примечание
		черновой	чистовой	
но-расточные	> 6000	0,15	0,10	–
	> 8000	0,19	0,13	–
	От параллельности боковых обработанных поверхностей	0,05	0,03	на длине 1000
	От перпендикулярности боковых обработанных поверхностей верхней обработанной поверхности	0,05	0,03	на длине 1000
	Овальность при диаметре расточного шпинделя:			
Горизонтально-расточные	от 50 до 90	0,06/0,08*	0,04/0,05*	–
	св. 90 > 160	0,08	0,05	–
	> 160	0,08/0,10*	0,05/0,06*	–
	Конусообразность при диаметре расточного шпинделя:			на длине:
	от 50 до 90	0,06	0,04	200
	св. 90 > 160	0,08	0,05	300
	> 160	0,10	0,06	400
	Вогнутость при обработке торцевой поверхности суппортом планшайбы и диаметре расточного шпинделя:			
	от 50 до 90	0,06	0,04	300
	св. 90	0,08	0,05	500
	От перпендикулярности оси отверстия торцевой поверхности	0,08	0,05	300
Горизонтально-расточные	От параллельности осей отверстий, расточен-	0,08	0,05	300

Станки	Отклонение формы	Значение отклонения при обработке		Примечание
		черновой	чистовой	
	ных при подаче передней стойки или расточного шпинделя			
	От перпендикулярности оси отверстий плоскости, полученной фрезерованием при горизонтальной и вертикальной подачах	0,08	0,05	300
Круглошлифовальные	Овальность при обработке в центрах и обработке отверстий для наибольшего диаметра деталей:			
	до 200	0,010	0,006	–
	св. 200 до 400	0,012	0,008	–
	> 400 > 800	0,020	0,012	–
	Конусообразность при обработке в центрах при наибольшем диаметре детали:			на длине:
	до 200	0,02	0,011	до 500
	св. 200 до 400	0,03	0,02	1000
> 400 > 800	0,04	0,025	на всей длине	
Плоскошлифовальные с горизонтальным шпинделем и прямоугольным столом общего назначения	От параллельности шлифуемой и опорной плоскостей	0,03	0,02	на длине 1000

В числителе – обработка расточным шпинделем, в знаменателе – суппортом планшайбы.

При выполнении задачи выбора оборудования для условий единичного и мелкосерийного производства необходимо рассмотреть возможности повышения производительности, расширения технологической возможности на основе анализа литературы и патентного поиска (перечень статей в журналах «Станки и инструменты» и «Вестник машиностроения» с 1972 по 2011 гг. находится в отделе стандартов КузГТУ и на кафедре МСиИ).

В случае невозможности реализации технологического процесса на существующем оборудовании разрабатывается техническое задание на проектирование нового оборудования. Техническое задание на проектирование разрабатывается согласно ГОСТ 15.001–73 и отраслевого стандарта ОСТ2 НО2-3–76 «Разработка и постановка продукции на производство». Техническая документация при составлении технического задания должна соответствовать ГОСТ 2.105–68.

В условиях мелкосерийного производства необходимо рассмотреть возможность применения станков с числовым программным управлением (ЧПУ), при этом должен быть проведен технико-экономический анализ, основы которого изложены в разделе 4.4.

## **4. ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ РАЗЛИЧНОЙ СЕРИЙНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА**

### **4.1. Особенности применения станков с ЧПУ**

Одной из основных задач повышения эффективности серийного производства является широкое применение металлорежущих станков с программным управлением (ПУ), позволяющее обеспечить стабильно высокое качество изделий без участия рабочих высокой квалификации. Однако, необходимо иметь в виду, что стоимость станков с числовым программным управлением (ЧПУ) значительно превышает стоимость заменяемого универсального оборудования, возникают также дополнительные затраты, связанные с подготовкой управляющих программ, обслуживанием и наладкой станка. Поэтому применению станков с ЧПУ должен предшествовать анализ номенклатуры заготовок, обрабатываемых на станках с ЧПУ, анализ границ эффективного использования станков с ЧПУ в зависимости от номенклатуры деталей и тщательный технико-экономический анализ.

Изучение номенклатуры деталей в машиностроении свидетельствует о ее постоянстве [6]. В общем случае можно выделить детали

типа тел вращения, призматические, фигурные и профильные. Детали правильной формы составляют до 92% общего объема деталей в производстве.

Каждая деталь характеризуется набором данных (материал, геометрия), определяющих технические требования, и набором организационно-экономических требований (годовой выпуск в штуках, число деталей в партии, допустимые затраты на изготовление). Номенклатура деталей, обработка которых предполагается эффективной на оборудовании с ЧПУ определяется на основе изучения технической документации на эти детали, ограничений, зависящих от конкретного производства, и характера постановки задач. Практика показывает, что значительный эффект достигается при обработке на станке с ЧПУ сложных деталей, с большим числом поверхностей, контуры которых содержат криволинейные участки и элементы прямых и плоскостей, непараллельных координатным осям станка. Поэтому следует считать, что на станках с ЧПУ целесообразно обрабатывать такие детали, на которые распространяются источники и факторы экономической эффективности, приведенные в табл. 4.1.

Таблица 4.1

**Источники и факторы экономической эффективности  
обработки деталей на станках с ЧПУ**

Источник	Фактор	Показатель
1	2	3
Снятие разметки; сокращение слесарной доработки и доводочных работ; многостаночное обслуживание	Сокращение штучно-калькуляционного времени	Повышение производительности труда и снижение себестоимости продукции
Уменьшение длин траектории рабочих помещений инструмента; оптимизация режимов резания; уменьшение длин траектории холостых перемещений инструмента; концентрация операций	Сокращение машинного времени	То же
Сокращение затрат времени на контрольные операции	Сокращение вспомогательного времени	»

Источник	Фактор	Показатель
Повышение точности обработки и качества поверхности на криволинейных участках	Уменьшение трудоемкости сборочных работ и пригоночных операций при сборке Увеличение ресурса изделия; повышение надежности изделия; повышение экономичности изделия	»  Повышение качества продукции
Уменьшение требуемого количества оборудования за счет повышения производительности труда	Уменьшение ресурсов на ремонт и обслуживание; сокращение требуемых производственных площадей; уменьшение расходов на электроэнергию	Снижение себестоимости продукции
Снижение разряда работ	Уменьшение расходов на зарплату производственным рабочим	То же

#### **4.2. Выбор оборудования с ЧПУ для обработки деталей различных групп**

Маршрутная технология определяет прежде всего принципиальную схему ТП (технологического процесса). На этом этапе выявляют типы станков с ЧПУ, которые требуются для обработки данной детали. Далее на стадии разработки маршрутного ТП рассматривают детализацию оборудования в целях выбора для каждой операции конкретной модели станка. Эффективность обработки деталей определяют совокупностью следующих исходных показателей: производительности станка; технологической себестоимости обработки; эксплуатационной и технологической надежности оборудования; достигаемого качества обработки деталей (точность размеров, точность взаимного расположения поверхностей и шероховатость последних); затрат на подготовку производства [6].



Детальный расчет этих показателей требует полной разработки технологических процессов (структуры операции, траектории движения режущих инструментов, режимов обработки, элементов нормы времени), что нецелесообразно и в ряде случаев невозможно выполнить при выборе оборудования в процессе разработки маршрутного ТП.

При автоматизированном проектировании ТП оборудование выбирают на основе информационных моделей, построенных на базе функций приоритетов. Это позволяет для каждой конкретной детали судить о показателях качества оборудования (различных станков): производительности, себестоимости, точности, затратах на подготовку производства. Однако и в этом случае выбор наилучшей модели станка зависит от конкретных условий производства. Поэтому только технолог-проектировщик может дать качественную оценку предпочтительных показателей.

Существует определенная зависимость между стоимостью станка  $C$  и его технологическими возможностями. Например, наиболее дорогая модель токарного станка, которой заканчивается классификационный ряд (рис. 4.1), имеет магазин инструментов с АСИ, что дает возможность обрабатывать сложные детали. На практике после ранжирования станков данного типа по стоимости и технологическим возможностям выделяют класс деталей, которые целесообразно обрабатывать на этих станках.

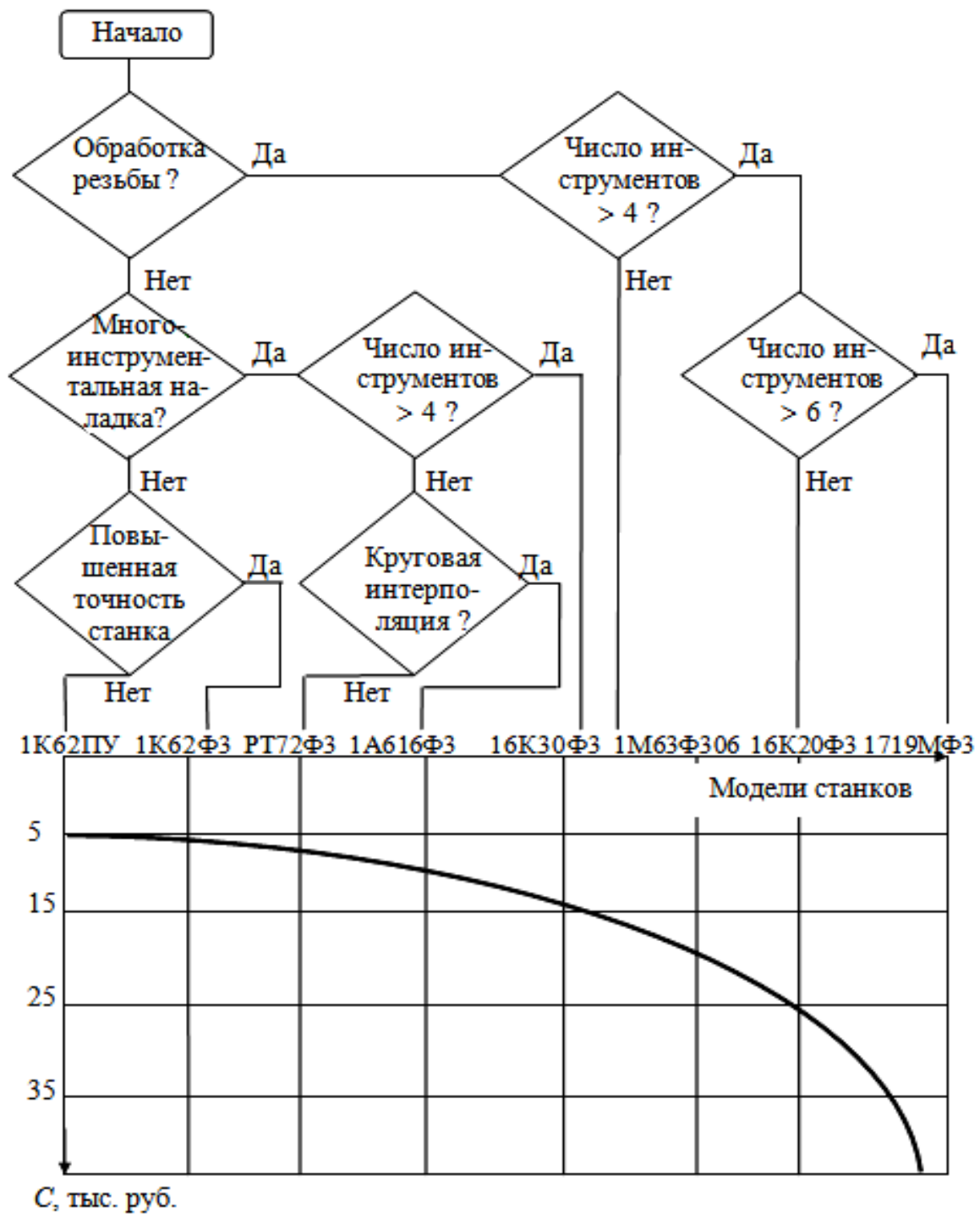


Рис. 4.1. Алгоритм построения классификационного ряда токарных станков с ЧПУ по технологическим возможностям и стоимости станка С

Детали классифицируют по совокупности признаков, отражающих будущий экономический эффект. Наименьший список таких признаков: объем партии  $\Pi$  не должен превышать нормативное значение  $\Pi_H$ ; число

операций  $Q$ , концентрируемых на станке, не должно превышать нормативное  $Q_H$ ; габаритные размеры деталей  $L$  не должны превышать предельные значения для станков  $L_H$ .

В алгоритме, представленном на рис. 4.2, детали располагаются в ряд по их технологическим характеристикам, которые аналогичны признакам станков, но отличаются формулировками, и одновременно ранжируются по сложности обработки. Последнее дает возможность приближенно рассчитать трудоемкость изготовления деталей  $T_i$  (что необходимо, например, при определении числа станков) по графику прямолинейности зависимости. Такой график можно построить, если расчетным путем пронормировать только первую ( $T_1$ ) и последнюю ( $T_n$ ) детали.

Линейный характер зависимости позволяет достаточно просто определить трудоемкость изготовления любой детали ряда.

Погрешность такого расчета составляет 25–30%, что допустимо для предварительной стадии работ.

**Оборудование для деталей типа тел вращения.** К деталям типа тел вращения относятся пальцы, диски, зубчатые колеса, фланцы, стаканы, сепараторы, втулки, валы, шпиндели. При подборе номенклатуры деталей для обработки их на станках с ЧПУ детали этого класса разбивают на две подгруппы:

1) детали, подлежащие обработке на патронных токарных станках (зубчатые колеса, фланцы, кольца, сепараторы, втулки и т. д.);

2) детали, подлежащие обработке на центровых токарных станках (ступенчатые валы, шпиндели, ходовые винты и т. д.).

При подборе *деталей первой подгруппы* необходимо учитывать, что для их обработки могут потребоваться несколько групп станков; это создает благоприятные условия для образования замкнутых участков из станков с ЧПУ. Детали этой подгруппы имеют много переходов и сложную конфигурацию, поэтому станки должны быть оснащены большим количеством инструментов. Если требуется дополнительная обработка деталей (сверление, фрезерование, шлифование), то применяют станки с ЧПУ других групп или токарные многоцелевые станки.

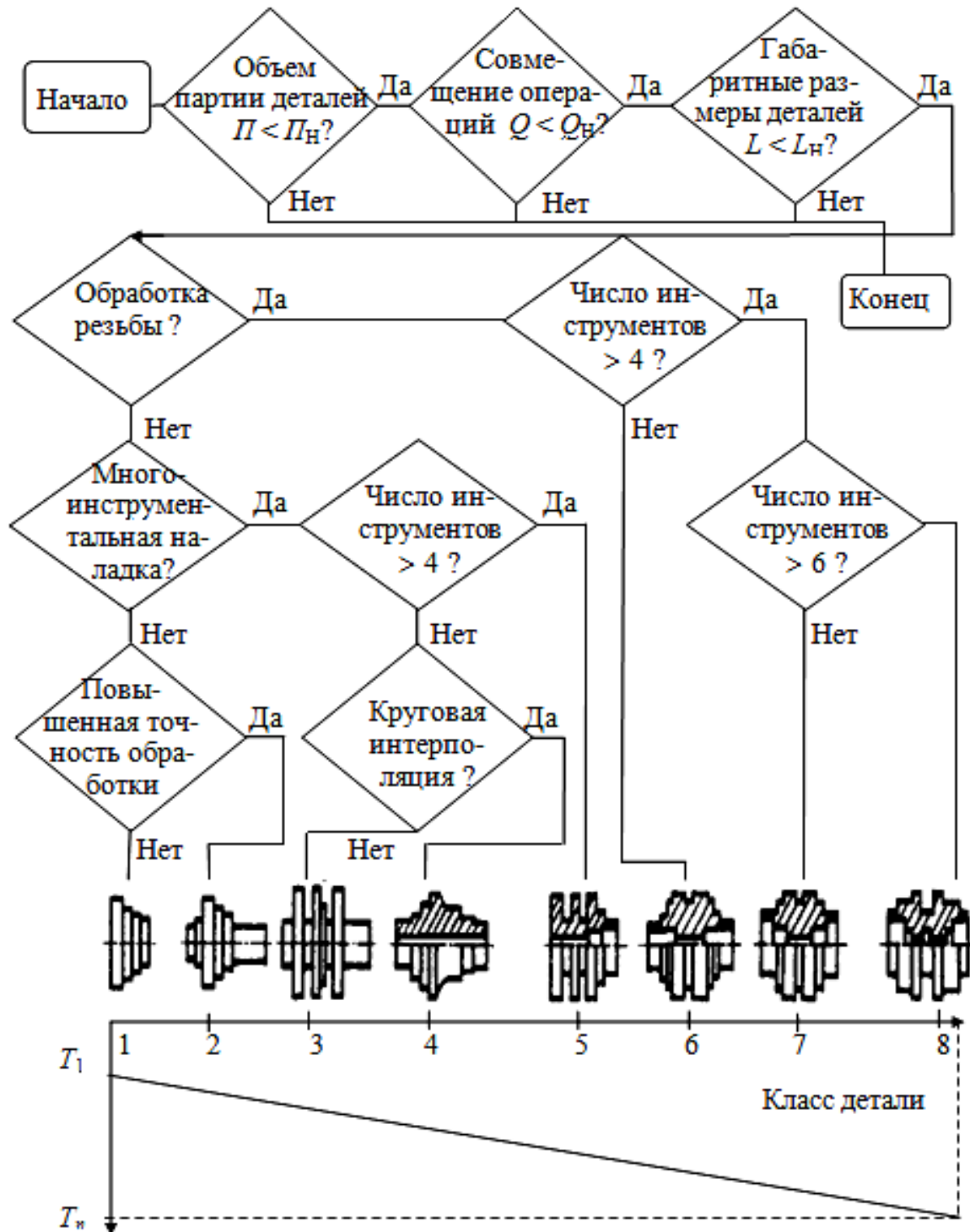


Рис. 4.2. Алгоритм построения классификационного ряда деталей по технологическим возможностям станков и трудоемкости изготовления

Что касается *деталей второй подгруппы*, то их черновую обработку целесообразно производить на одноинструментальных токарных станках с ЧПУ. Для получистовой, а в некоторых случаях и чистовой

обработки ступенчатых валов и шпинделей рекомендуются многоинструментальные токарные станки с ЧПУ.

Доработка деталей типа валов или шпинделей (сверление несоосных отверстий, фрезерование шпоночных пазов и т. п.) чаще всего выполняется на универсальном оборудовании. Однако в последнее время наметилась тенденция выполнять операции сверления и фрезерования подобных деталей совместно с токарной обработкой. Для этих целей используют токарные многоцелевые станки.

**Оборудование для деталей, требующих операций фрезерования.** Сначала следует определить тип станка, обеспечивающего обработку с одновременным управлением перемещением инструмента по определенному числу координат. Для этого надо сгруппировать детали данного производства, требующие фрезерной обработки, по числу требуемых координат и габаритным размерам. Это позволит установить тип станка по габаритным размерам его стола или размерам зоны обработки.

Плоскостные детали (планки, косынки, крышки, плиты, плоские кулачки и др.), имеющие пазы, окна, скосы, уступы, кривые поверхности, для которых может быть использован один инструмент, целесообразно обрабатывать на одноинструментальных фрезерных станках, а если на деталях одновременно имеются крепежные ступенчатые отверстия разного диаметра и разной глубины, то их целесообразно обрабатывать на многоинструментальных фрезерных станках. На этих станках можно также выполнять черновую, получистовую и чистовую расточку отверстий по 7–8-му качеству.

**Оборудование для деталей среднего литья.** Детали среднего литья (рычаги, вилки, кронштейны, средние корпусные детали) следует обрабатывать с максимальной концентрацией операций на станке. Первую операцию рекомендуется выполнять так, чтобы базовая плоскость и базовые отверстия обрабатывались с одного установа.

Обработку деталей, имеющих отверстия в пяти плоскостях, целесообразно разделить на две операции: 1) подготовку базы на вертикально-расточных или фрезерных станках; 2) обработку отверстий (в том числе крепежных) и плоскостей с четырех сторон на многоцелевых станках.

**Оборудование для корпусных и базовых деталей.** При выборе оборудования здесь различают две группы деталей.

1. Корпуса коробчатой формы, характеризующиеся прямоугольными очертаниями, примерно равными габаритными размерами, нали-

чием внутренних перегородок, значительным числом точных отверстий с параллельными и перпендикулярными осями. Для деталей данной группы может требоваться обработка по пяти-шести плоскостям. Для этого рекомендуется использовать станки с ЧПУ следующих типов: для черновой обработки – горизонтальные станки с ручной сменой инструмента: для получистовых операций (подготовки базовой плоскости и двух базовых отверстий, сверления всех крепежных отверстий) – вертикально-фрезерные с револьверной головкой; для чистовых операций (обработки трех плоскостей) – многоцелевые станки.

2. Корпуса, салазки и каретки – детали, у которых два габаритных размера (длина и ширина) значительно превышают третий (высоту) и в которых необходимо обрабатывать различные поверхности, направляющие, Т-образные пазы, отверстия 7–8-го качества. Черновую, получистовую и частично чистовую обработку этих деталей рекомендуется выполнять на продольно-фрезерных станках с ЧПУ.

Перечисленные требования и рекомендации по выбору оборудования не являются окончательными и абсолютными. На практике часто решающее значение имеют реальные условия производства.

Кроме указанных рекомендаций можно использовать данные НИИПТМаша по номенклатуре и границам рациональной обработки деталей на станках с ЧПУ, приведенные в табл. 4.2 [10].

### **4.3. Особенности обработки деталей на многоцелевых станках**

В производстве часто встречаются сложные корпусные детали, требующие обработки с шести сторон. Если детали имеют наклонные плоскости, то число сторон увеличивается до 10 и более. На каждой из сторон имеются выступы, карманы, пазы, направляющие, ребра и другие конструктивные элементы, т. е. каждая сторона корпуса – поверхность, имеющая несколько уровней по глубине, каждый уровень имеет сложный контур. На каждой стороне расположено определенное число основных и крепежных отверстий: гладких, ступенчатых, конических и резьбовых, разных размеров, глубины и точности.

Таблица 4.2

Номенклатура и границы рациональной обработки деталей на станках с ЧПУ (применительно к металлургическому машиностроению) по данным НИИПТМаша

Наименование станков	Наименование деталей	Минимальный выпуск деталей
1	2	3
Токарно-центровые. Высота центров до 300 мм, межцентровое расстояние до 1400 мм	Ступенчатые валики с цилиндрическими шейками, число ступеней 4 и более	Минимальная партия 8–10 деталей с ежемесячной повторяемостью
	Ступенчатые валики с коническими шейками, число ступеней 4 и более	Минимальная партия 5–7 деталей с повторяемостью не менее 6 раз в год
	Глобоидные червяки, валики сложной конфигурации	Минимальная партия 3–5 деталей с повторяемостью не менее 4 раз в год
Токарно-патронные. Диаметр обработки 630 мм, длина обработки до 200 мм	Внутренние и наружные поверхности крышек колец, фланцев несложной конфигурации	Минимальная партия 12–15 деталей с повторяемостью не реже 8 раз в год
	Внутренние и наружные конусные поверхности крышек, фланцев, колец, втулок несложной конфигурации	Минимальная партия 8–10 деталей с повторяемостью не реже 6 раз в год
	Внутренние и наружные сферические поверхности крышек, колец, фланцев, обойм зубчатых втулок	Минимальная партия 3–5 деталей с повторяемостью не реже 6 раз в год
Карусельные. Диаметр планшайбы до 3200 мм	Внутренние и наружные поверхности обечаек, ступиц, шкивов несложной конфигурации	Минимальная партия 8–10 деталей с ежемесячной повторяемостью
	Внутренние и наружные сферические поверхности червячных колес	Минимальная партия 2–3 детали с повторяемостью не реже 3–4 раз в год
Карусельные. Диаметр планшайбы до 3200 мм	Внутренние и наружные конусные поверхности фланцев, обечаек, конусов и чаш засыпных аппаратов	Минимальная партия 3–5 деталей с повторяемостью не реже 4 раз в год

Наименование станков	Наименование деталей	Минимальный выпуск деталей
Вертикально-сверлильные с револьверными головками. Размер стола 400×630 мм	Фланцы, диски, кольца, корпуса гидроаппаратуры. Диаметры обрабатываемых отверстий по 5–7-му классам точности с допуском на межцентровое расстояние $\pm 0,2$ мм	Минимальная партия 20–25 деталей с ежемесячной повторяемостью
	Фланцы, крышки, звенья, рычаги. Диаметры обрабатываемых отверстий по 2–4-му классам точности с допуском на межцентровое расстояние $\pm 0,02$ мм и больше	Минимальная партия 10–15 деталей с повторяемостью не менее 4–6 раз в год
	Корпуса и крышки редукторов, подушки прокатных станов, фланцы, кольца крышки. Диаметры обрабатываемых отверстий по 4–5-му классам точности	Минимальная партия 10–15 деталей с повторяемостью не менее 3–4 раз в год
Портально-сверлильно-фрезерно-расточные с инструментальным магазином	с допуском на межцентровое расстояние $\pm 0,5$ мм	
	Фланцы, корпуса задвижек крышки, корпуса и крышки редукторов. Диаметры обрабатываемых отверстий по 2–3-му классам точности с допуском на межцентровое расстояние $\pm 0,02$ мм и больше	Минимальная партия 5–8 деталей с повторяемостью не менее 2–3 раз в год
Горизонтально-расточные	Корпуса редукторов, станины прокатных станов, станины кузнечно-прессовых машин, корпусные детали crane нового оборудования	Минимальная партия 2–3 детали и больше с периодичностью повторения не менее 2–3 раз в год
Продольно-фрезерные и вертикально-фрезерные	Плоские детали сложной конфигурации: кулачковые муфты, рычаги	Минимальная партия 3–5 деталей и больше с периодичностью повторения не менее 6 раз в год
	Детали сложной конфигурации: вилки, детали пресс-	Минимальная партия 2–3 детали и больше



Наименование станков	Наименование деталей	Минимальный выпуск деталей
	форм, детали штампов	с периодичностью повторения не менее 2–3 раз в год
Горизонтально сверлильно-фрезерно-расточные станки с инструментальным магазином	Буксы, подушки прокатных станков, корпуса редукторов, клапанные коробки гидроаппаратуры	Минимальная партия 5–8 деталей с ежемесячной повторяемостью

Часто требуется обработка внутренней полости корпусной детали, в которой имеются перемычки, стенки, ребра жесткости, карманы. В обычных условиях это требует разработки сложной технологии, предусматривающей значительное число фрезерных, сверлильных и расточных операций. При этом тяжелый и громоздкий корпус необходимо транспортировать от одного станка к другому, многократно устанавливать его на станке, выверять и закреплять, проектировать средства механизации для подъемно-транспортных работ. При такой работе машинное время обычно не превышает 30 % штучного времени, а остальную его часть занимают тяжелые вспомогательные операции и переходы.

Многоцелевые станки (МС) позволяют совместить операции фрезерования прямолинейных и криволинейных поверхностей, центrovания, сверления, рассверливания, зенкерования, развертывания, цекования, растачивания, раскатывания и накатывания отверстий, нарезания резьбы (метчиками, плашками, резцовыми головками, резцами), круговое фрезерование наружных и внутренних цилиндрических, конических и фасонных поверхностей и круговых пазов концевыми и дисковыми фрезерами.

Для достижения высокой эффективности МС всю обработку заготовок стремятся выполнять на одном станке за один-два установка. Но приходится считаться с опасностью искажения формы обработанных деталей вследствие перераспределения остаточных напряжений, имеющих в исходной заготовке. В этих случаях технологический процесс разделяют на операции черновой (обдирочной) и последующей обработки. Черновую обработку выполняют на мощных, особо жестких станках (с ЧПУ или универсальных), и детали направляют на термообработку для снятия внутренних напряжений. Дальнейшую механическую обработку выполняют на многооперационном станке.

*Плоскости* фрезеруют торцовыми и концевыми фрезами с твердосплавными многогранными неперетачиваемыми пластинами (МНП). Обычно это делают в два перехода. Первый – черновое фрезерование при больших припусках целесообразно выполнять торцовыми фрезами, последовательными проходами вдоль обрабатываемой поверхности. Ширину поверхности, обрабатываемой за один рабочий ход инструмента, а, следовательно, и диаметр фрезы выбирают такими, чтобы отжим инструмента не сказывался на точности чистового перехода. Поэтому при неравномерном большом припуске диаметр фрезы приходится уменьшать. Для чистового перехода стремятся использовать фрезу, диаметр которой позволяет захватить всю ширину обработки.

Для получения особо мелкой шероховатости поверхности при малых припусках применяют торцовые фрезы с пластинами из эльбора и минералокерамики.

Концевыми фрезами открытые плоскости обрабатывают реже, главным образом тогда, когда эту же фрезу используют для фрезерования других поверхностей (уступов, пазов), чтобы уменьшить номенклатуру применяемых инструментов.

*Пазы, окна и уступы* обычно обрабатывают концевыми фрезами, оснащенными твердосплавными пластинами.

Для повышения точности обработки по ширине паза и сокращения номенклатуры инструментов диаметр фрезы принимают несколько меньшим паза. Обработку выполняют последовательно: сначала фрезеруют среднюю часть паза, затем обе стороны, используя возможность получения высокой точности паза по ширине за счет введения коррекции на радиус фрезы. В конце цикла коррекцию отменяют.

Для повышения стойкости, улучшения условий отвода стружки при обработке глухих пазов применяют концевые фрезы с увеличенным углом наклона спирали и полированными канавками. Для облегчения врезания с осевой подачей применяют фрезу с особой заточкой торцовых зубьев. Повышенной жесткостью обладает конструкция фрезы с усиленной сердцевиной конической формы и переменной глубиной канавок. При увеличенных вылетах фрезы, обусловливаемых конфигурацией заготовки, используют фрезы с усилительным конусом. Уменьшение вибрации достигается у фрез с тремя и четырьмя зубьями благодаря различному расстоянию между ними (разношаговые фрезы).

*Круговое фрезерование* – новая операция, которая стала возможной с появлением фрезерных и многоцелевых станков с ЧПУ. Отверстия в корпусных деталях всегда обрабатывались растачиванием. На

станке с ЧПУ они могут быть обработаны фрезерованием. Для этого фрезе сообщают круговую подачу. Если обозначить время фрезерования  $t_f$ , а время растачивания  $t_p$ , то производительность кругового фрезерования будет выше производительности растачивания, если выполняется соотношение  $t_f/t_p < 1$ . Величины  $t_f$  и  $t_p$  могут быть рассчитаны по известным формулам.

Обработка отверстий – самый распространенный вид технологических переходов на МС. Среди них сверление и нарезание резьбы в крепежных отверстиях под болты, винты и шпильки; сверление, зенкерование, развертывание, растачивание точных посадочных отверстий – гладких, и ступенчатых; обработка отверстий в литых деталях.

*Соосные отверстия* в противоположащих стенках корпусных деталей обрабатывают на МС консольно закрепленными инструментами, последовательно, с поворотом заготовки вместе со столом станка на  $180^\circ$ . Достижимая соосность зависит от точности делительного стола. Погрешность деления не должна превышать половины поля допуска на отклонение взаимного расположения отверстий по чертежу детали. Для увеличения жесткости шпиндельного узла отверстия стремятся растачивать с постоянным вылетом шпинделя, за счет перемещения стола или стойки станка. Дело в том, что жесткость выдвигной пиноли в десятки раз меньше жесткости шпиндельной бабки. Поэтому на МС с выдвигной пинолью шпинделя приходится снижать параметры режимов резания, чтобы получить высокую точность обработки. Только при изготовлении особо точных корпусных деталей окончательную обработку наиболее важных отверстий завершают отдельной операцией, на прецизионных расточных станках.

При обработке отверстий *осевым инструментом*, если требования к точности невысоки, операции выполняют в следующей последовательности: сначала обрабатывают все отверстия одним инструментом, затем следующим (при условии, что смена инструмента на данном станке требует больше времени, чем позиционирование стола). Если требования к точности диаметров и формы отверстий высокие, их стремятся обрабатывать полностью по отдельности, со сменой инструментов у каждого отверстия и с перемещением шпинделя только по оси  $z$ . В противном случае погрешность обработки будет увеличиваться за счет погрешности позиционирования.

Для сокращения времени сверления *спиральными сверлами* и повышения стойкости инструментов используют быстрое автоматическое изменение режима резания. После ускоренного подвода сверла к заго-

товке включают рабочую подачу, а когда большая часть отверстия будет просверлена, подачу уменьшают во избежание поломки инструмента из-за скачкообразного изменения нагрузки при выходе сверла из отверстия. Если имеется литейная корка на входе в отверстие или выходе из него, на этих участках предусматривают в программе уменьшение частоты вращения шпинделя.

В связи с тем, что на МС при сверлении, как правило, не используют кондуктор, широко применяют засверливание отверстий короткими жесткими сверлами – своеобразную разметку расположения будущих отверстий. При работе по литейной корке это позволяет решить и другие задачи: облегчить врезание и повысить стойкость сверл небольшого диаметра и вместе с тем снять фаску на входе в отверстие, если она предусмотрена чертежом. Засверливание целесообразно применять для обработки отверстий диаметром до 8–15 мм в деталях из черных металлов.

Для обработки *отверстий в корпусных заготовках* весьма эффективным оказалось применение инструментов, предназначенных раньше только для сверления глубоких отверстий, например двухкромочных сверл с механическим креплением трехгранных твердосплавных пластин. Использование таких сверл наряду с делением припуска по ширине среза и внутренним подводом СОЖ позволяет в три-пять раз повысить эффективность резания по сравнению с обычными спиральными сверлами.

Большие возможности повышения производительности при обработке отверстий заключаются в использовании *комбинированных инструментов* разных типов. Например, если отверстие в исходной заготовке отсутствует, можно использовать инструмент, сочетающий сверло и зенкер. Применяют и трехступенчатые инструменты, в которых передняя часть (первая ступень) изготовлена из инструментальной стали, а вторая и третья части, работающие с более высокими скоростями резания, оснащены твердосплавными пластинами. Такой инструмент работает по ранее просверленному отверстию. В зависимости от формы, размеров и расположения твердосплавных пластин вторая и третья ступени могут иметь различное назначение.

Большое число обрабатываемых поверхностей, наличие черновых, получистовых и чистовых проходов при обработке каждой поверхности, значительное число инструментов в магазине усложняют выбор плана операций обработки детали на многоцелевом МС. Возникает задача выбора такого варианта, который будет наиболее эффективен.

Возможностей при выборе плана операций достаточно много. Можно, например, сначала деталь полностью обработать с одной стороны, затем развернуть ее; можно сначала обработать деталь со всех сторон начерно, затем приступить к чистовой обработке, можно сначала обработать все плоскости, затем приступить к обработке отверстий. Для деталей с соосными отверстиями целесообразна последовательная обработка с двух противоположных сторон и т. д.

Конкретное решение задачи должно учитывать значительное число разнообразных факторов. Есть несколько общих принципов, которыми следует руководствоваться при этом: чем выше точность элемента конструкции, тем позже следует предусматривать его обработку; сначала следует планировать черновую обработку, затем чистовую; чем меньше время срабатывания исполнительного органа (смена инструмента, поворот стола и др.), тем чаще этот орган должен функционировать. Наибольшая точность обработки достигается при обработке детали с одного установа. Для деталей с большими припусками должны быть предусмотрены разгрузочные операции, часть которых целесообразно выполнять на универсальном или специализированном оборудовании. При выборе плана операций обработки деталей на многоцелевых станках прежде всего целесообразно использовать типовые схемы обработки, рекомендуемые соответствующими нормативными документами. Обычно эти документы предлагают последовательность переходов операций в зависимости от типа детали и заготовки, от вида обрабатываемых поверхностей и их точности и т. д. [6, 7, 9].

#### **4.4. Определение экономической эффективности применения металлорежущих станков в условиях в различной серийности производства**

Экономический эффект от применения оборудования зависит от сложности обрабатываемых деталей и серийности их выпуска, технологических возможностей, стоимости и коэффициента загрузки оборудования, коэффициента личностного обслуживания и др. [2, 8]

Настоящие рекомендации имеют целью оказать практическую помощь в экономическом обосновании применения металлорежущих станков с программным управлением для условий различной серийности обработки от единичного до крупносерийного и массового выпуска и соответствующего вида оборудования в широком диапазоне между

универсальным оборудованием с ручным управлением, с одной стороны, и автоматизированным оборудованием, с другой стороны.

В зависимости от степени детализации принятых решений при экономическом обосновании выбора оборудования рекомендуется проводить анализ в следующей последовательности.

На первом этапе проводится качественный анализ, на котором определяют область рационального применения станков с ручным управлением, ЧПУ, автоматов, полуавтоматов, многоцелевых станков и др. для конкретных операций технологического процесса в зависимости от годовой программы выпуска, количества запусков партии в производство и от конструкции размеров детали.

Анализ проводится по укрупненным нормативам эффективности применения станков с ЧПУ при обработке деталей, характерных для станкостроения в условиях различной серийности производства [1].

На втором этапе проводится анализ конкретных условий обработки деталей с учетом их сложности и серийности выпуска, что позволит выбрать оборудование (или уточнить выбор оборудования, проведенный на первом этапе) с наиболее рациональной системой управления, а также *укрупненно определить экономическую эффективность от перевода обработки деталей с одного вида оборудования на другой.*

Этот анализ рекомендуется проводить по методике: «Экономическое обоснование области применения металлорежущих станков с программным управлением» [2].

В данном случае приведен расчет границ области эффективного применения станков с ЧПУ практически для всех видов оборудования. Результаты расчетов приведены в виде таблиц и графиков, даны необходимые исходные данные по наиболее распространенным моделям металлорежущих станков, приведены характерные примеры определения рациональных областей и эффективности применения станков с ЧПУ.

На третьем этапе проводится подробный технико-экономический расчет от создания и внедрения металлорежущих станков с ЧПУ. Расчет производится согласно инструкции по определению экономической эффективности металлорежущих станков с ЧПУ, разработанной НПО «ЭНИМС» и НПО «Оргстанкинпром» [3].

#### **4.4.1. Определение области рационального применения металлорежущих станков по укрупненным нормативам эффективности применения станков с ЧПУ при обработке деталей, характерных для станкостроения в условиях различной серийности производства**

Укрупненные нормативы эффективности применения станков с ЧПУ разработаны НПО «ЭНИМС» и НПО «Оргстанкинпром» для экономического обоснования целесообразности приобретения машиностроительными заводами станков с ЧПУ. Нормативы разработаны для 15 станков с ЧПУ, наиболее распространенных на предприятиях машиностроения по 45 деталям, характерным для машиностроения и станкостроения.

По конструктивно-технологическим признакам подобраны группы деталей на каждую модель станка с ЧПУ (16Б16Ф3, 16К20Ф3, 16К30Ф3, 1Б732Ф3, РТ705Ф3, 1П717Ф3, 1П752МФ3, 1П756ДФ3, 2Р135Ф2, 6520Ф3, 6Р13Ф3, 6Р13РФ3, 2611Ф2, 2А622Ф2, НР500МФ4).

Для каждой детали разработаны технологические процессы с использованием станков с ЧПУ и оборудованием базовых вариантов и проведены все расчеты экономической эффективности и приведенных затрат.

Нормативы оформлены в виде нормативных карт, в каждой из которых приведены эскизы заготовки и обрабатываемой детали – в одной части, в другой части – график, на оси абсцисс которого отложено количество запусков партий деталей в год, а на оси ординат – годовой выпуск данных деталей. На графике по результатам расчетов линиями отделены области применения станков с ручным управлением, ЧПУ, автоматов, полуавтоматов и т. д.

Последовательность работы с нормативами:

1. В нормативах находят карту, в которой эскиз заготовки и обрабатываемой детали по конструктивно-технологическим признакам имеют сходство с заготовкой и деталью, на которую разрабатывается технологический процесс.

Например, на рис. 4.3 представлена карта нормативов при изготовлении вала-шестерни.

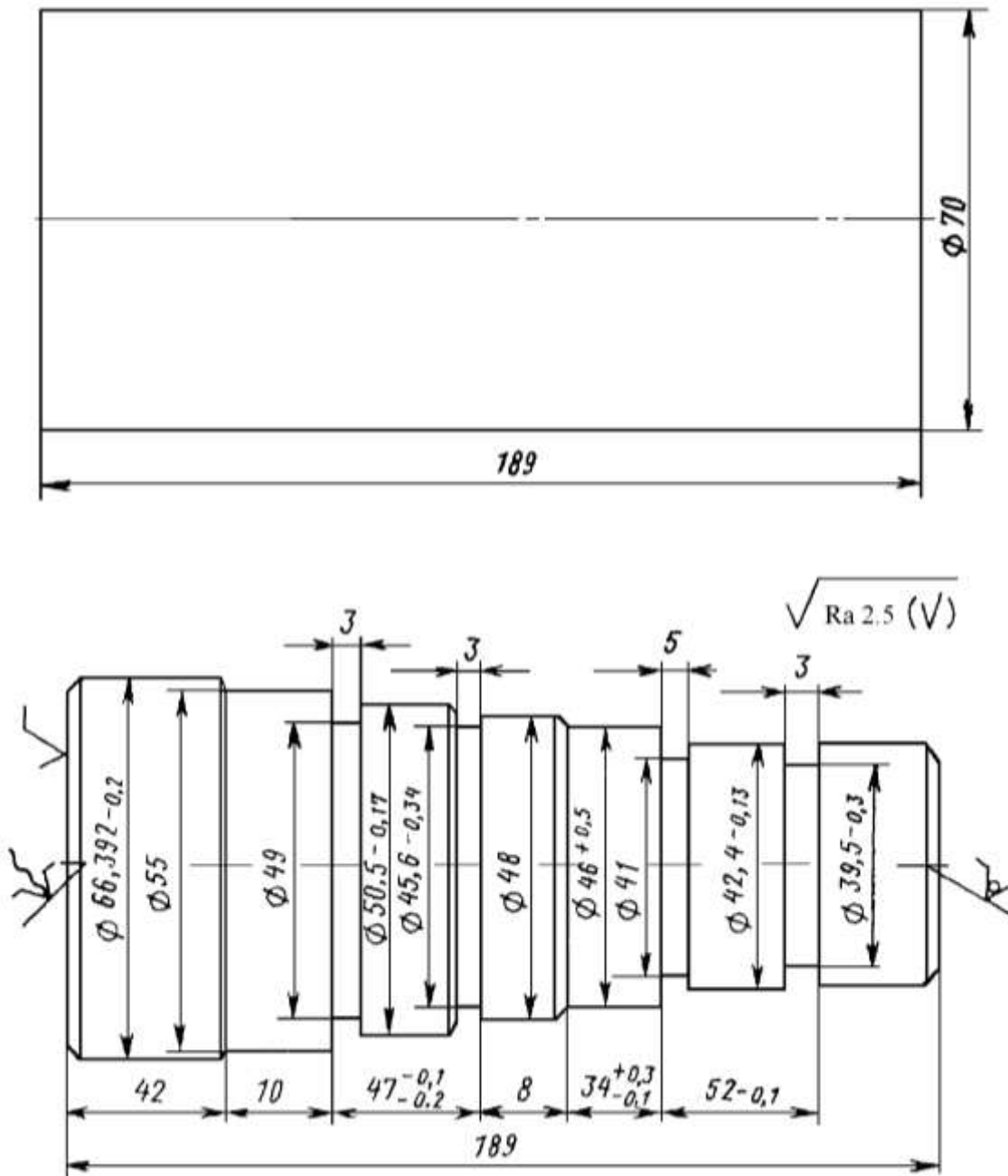


Рис. 4.3. Эскиз заготовки и детали после первой операции технологического процесса изготовления вала-шестерни

В первой части карты (рис. 4.3) даны эскизы заготовки и детали после первой операции технологического процесса. Во второй части карты приведен график, позволяющий выбрать вид оборудования исходя из экономической эффективности его применения. В табл. 4.3 приведены значения  $PP'_{\min}$  и  $P'_{\max}$ , являющимися границами, характеризующие области применения станков различных по степени автоматизации по количеству обрабатываемых деталей ( $Z$ ) с учетом количества запусков в год ( $S_n$ ) и рекомендуемые модели оборудования (табл. 4.4).



На рис. 4.4 второй части карты нормативов приведены рекомендуемые области применения оборудования.

Таблица 4.3

Границы эффективного применения  
токарно-винторезного станка с ЧПУ

Значения $P'_{\min}$ и $P'_{\max}$ при $Z = 7$						
$S_n$	1	2	4	6	12	24
$P'_{\min}$	4	4	4	6	12	24
$P'_{\max}$	153	154	157	159	166	180

Таблица 4.4

Рекомендуемые модели оборудования

Модель станка	Количество операций	Время наладки, мин.	Штучное время, мин.	Коэффициент производительности	Цена станка, руб.
16К20Ф3	1	20	7,43	—	41860
16К20	2	41	25,5	3,43	4170
1713	1	49	4,6	0,62	8730

Необходимо иметь в виду, что области применения станка с ЧПУ в границах между линиями  $P'_{\min}$  и  $P'_{\max}$  относятся только к случаю сравнения с полуавтоматом высокооснащенным станком с ручным управлением. В конкретных условиях производства при отсутствии полуавтоматов область применения станка с ЧПУ в сравнении со станком с ручным управлением находится выше линии  $P'_{\min}$  и выше линии  $P'_{\max}$ .

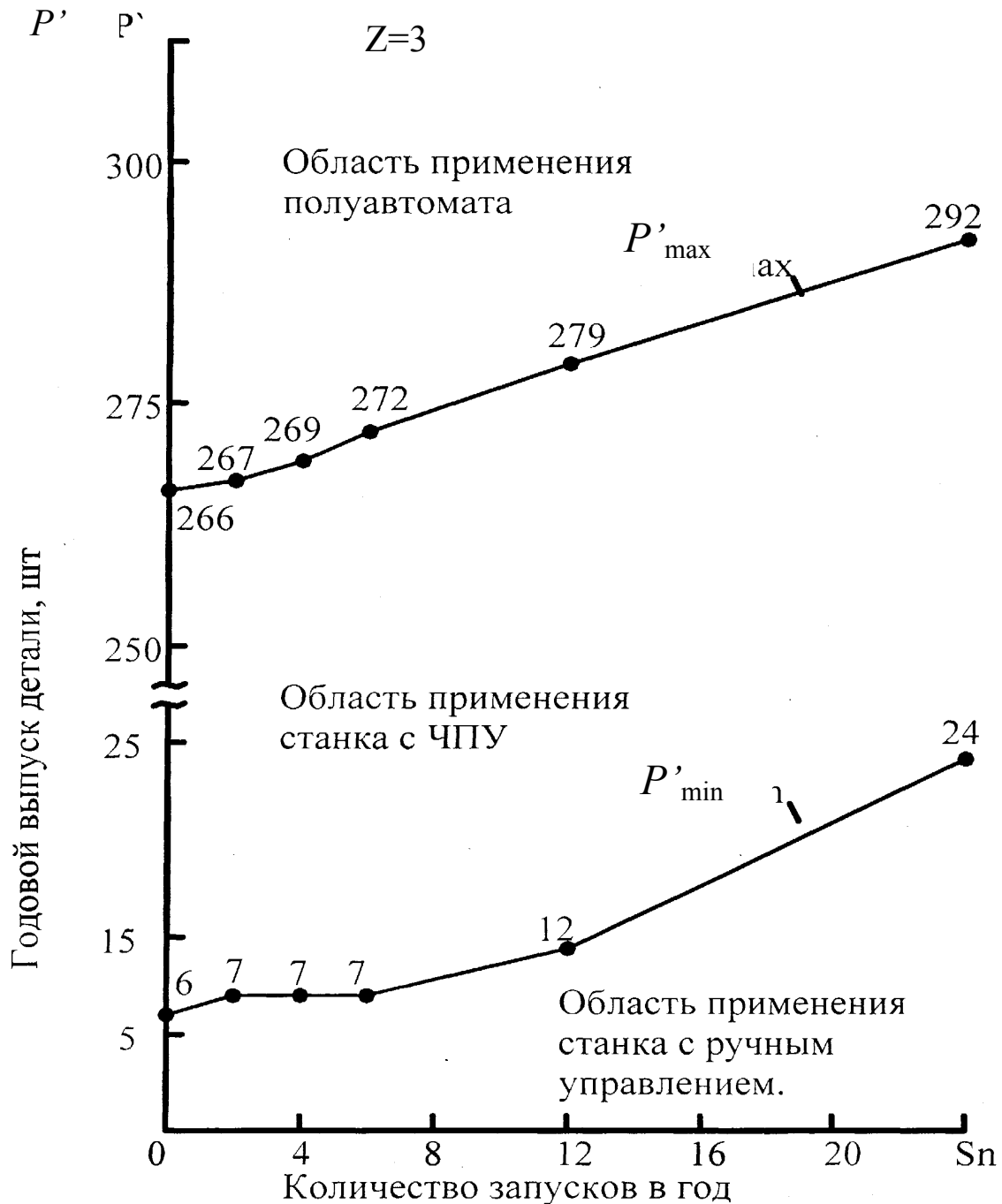


Рис. 4.4. Рекомендуемые области применения оборудования

При принятии окончательного решения о применении станков с ЧПУ следует также учитывать:

Факторы производственной эффективности станков с ЧПУ:

- сокращение количества операций обработки деталей как важнейший фактор упрощения управления производством;
- возможность сокращения парка станков на заводе за счет применения станков с ЧПУ, чем обеспечивается улучшение показателей работы завода;

– социальный эффект и эффект от ускорения освоения проектных мощностей в машиностроении.

#### **4.4.2. Экономическое обоснование области применения металлорежущих станков с программным управлением**

Использование материалов данной разработки позволяет для конкретных условий обработки деталей с учетом их сложности и серийности их выпуска выбрать оборудование с наиболее рациональной системой управления, а также укрупненно определить экономическую эффективность от перевода обработки деталей с одного вида оборудования на другой.

Согласно разработанной технико-экономической модели даны графики для определения границ областей эффективного применения станков с программным управлением, позволяющие без трудоемких расчетов выбрать оборудование.

На рис. 4.5 показана в общем виде графическая интерпретация технико-экономической модели границ областей применения двух станков в зависимости от их относительной производительности  $y$  и числа наименований деталей  $Z$ , обрабатываемых на станках в течение года.

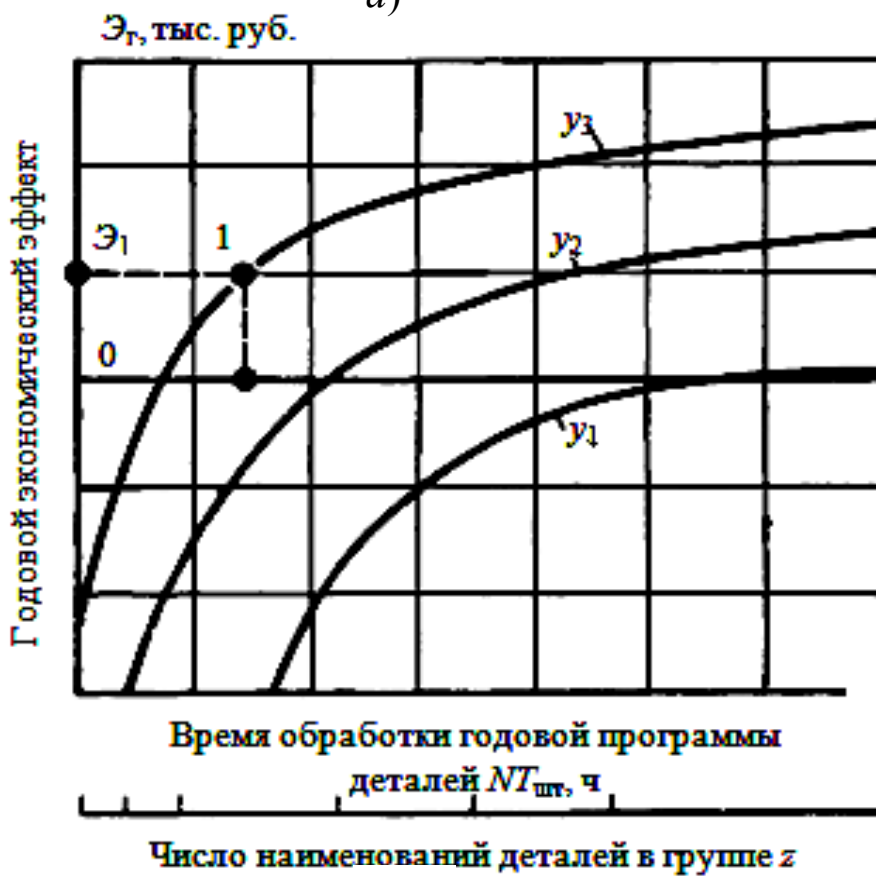
График 5, *a* дает возможность определить, при каких значениях относительной производительности  $y$  и характеристики серийности  $Z$  деталь целесообразно изготавливать на станке с ручным управлением (РУ) или с программным управлением (ПУ). Графики рис. 4.5, *б* дают возможность оценить значение годового экономического эффекта от внедрения станка с ПУ взамен станка с РУ в зависимости от достигнутой относительной производительности сопоставляемых станков  $y$  и характеристики серийности  $Z$ .

Точки 1–10 (рис. 4.5, *a*) характеризуют множество деталей конкретного заказчика, которые можно изготовить на сопоставляемых станках.

Детали 1–7 целесообразно изготавливать на станках с ПУ, так как перевод их на эти станки с оборудования с РУ дает эффект.



а)



б)

Рис. 4.5. Области эффективного применения станков с программным и ручным управлением

Детали 8–10 переводить на оборудование с ПУ нецелесообразно, так как перевод их связан с преувеличением затрат на обработку по сравнению с действующим технологическим процессом.

Последовательность работы по экономическому обоснованию области применения металлорежущих станков с ПУ:

1. Основываясь на перечне базового и заменяемого оборудования с ПУ, приведенном в приложении III книги [2], выбирают рисунок, характеризующий применение данного вида оборудования;

2. Основываясь на чертеж детали и характер операции технологического процесса, проводят нормирование операции при использовании оборудования с ПУ и с РУ;

3. Определяют величину повышения производительности обработки на станке с ПУ. (По верхней части графика можно укрупнено определить величину повышения производительности сравниваемых станков в зависимости от времени обработки годовой программы  $NT_{шт, ч.}$ );

4. По нижней части графика в зависимости от времени обработки годовой программы и повышения производительности  $y$  определить величину предполагаемого эффекта в тысячах рублей. (В данной книге величина эффекта приведена в ценах 1987 года.).

Рассмотрим пример определения областей применения токарных патронно-центровых станков: с ЧПУ мод. 16К20ФЗС18 и с РУ мод. 16К20.

Находим соответствующий график сравниваемых моделей оборудования (рис. 4.6). Нормирование токарной операции для детали, представленной на рис. 4.7, дает следующий результат: трудоемкость обработки на станке 16К20 составляет 0,086 нормо-ч, а на станке 16К20ФЗС18 – 0,042 нормо-ч производительность повысилась в 2 раза. Экономический эффект от этого мероприятия можно определить по нижнему графику (рис. 4.6, б). Так, при  $NT_{шт} = 3000 \cdot 0,086 = 258$  ч и  $y = 2$ , экономический эффект составит около 2 тыс. руб. (точка *Б* на рис. 4.6, б).  $N$  – средняя годовая программа деталей одного наименования, обрабатываемых на станке.

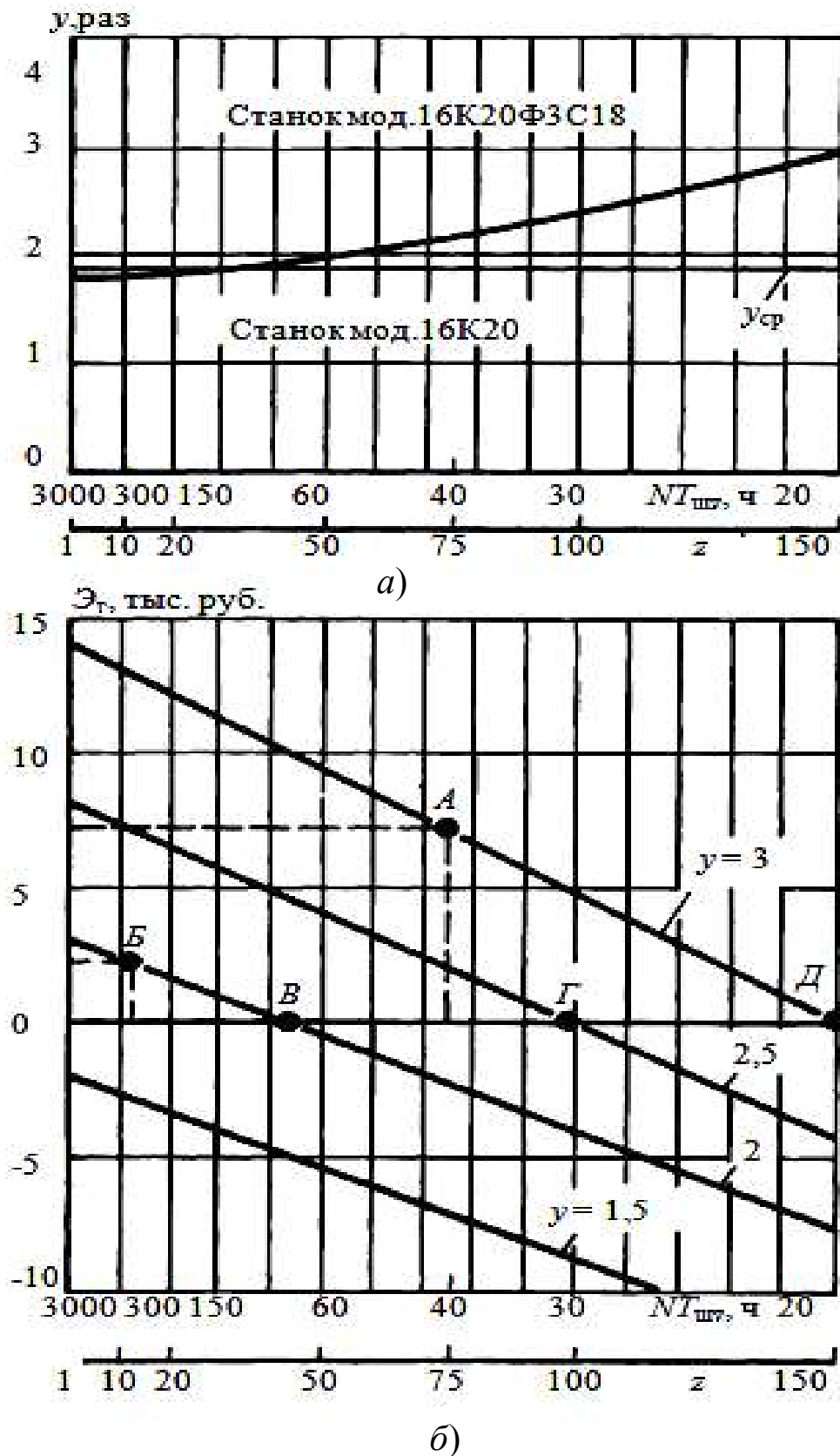


Рис. 4.6. Области применения токарных патронно-центровых станков: с ЧПУ мод.16К20Ф3С18 и с НЧ мод. 16К20;  $y_{cp} = 1,9$

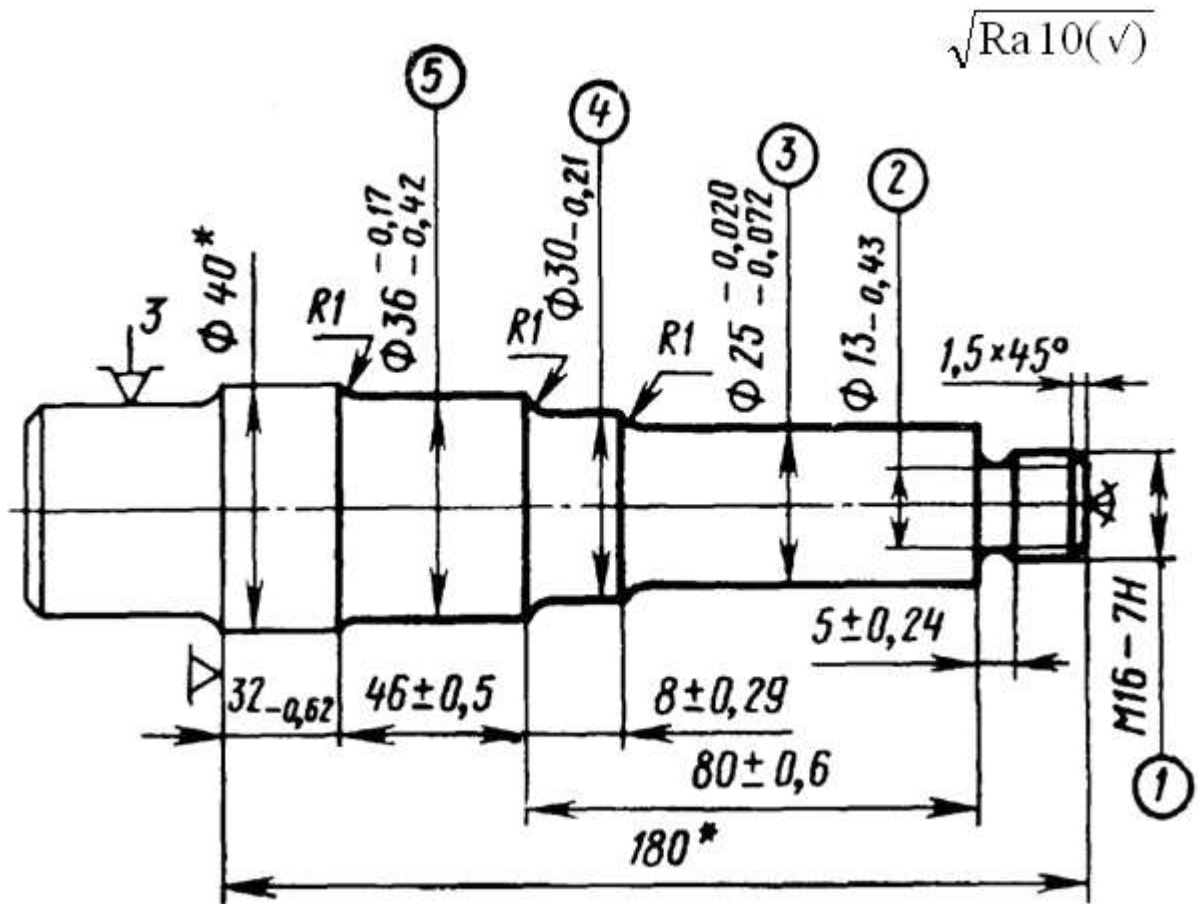


Рис. 4.7. Пример токарной обработки оси. Последовательность обработки: 1 – последовательно обточить поверхности 5, 4, 3, 1; обточить фаску; 2 – проточить канавку 2; 3 – нарезать резьбу. \* Размеры для справок

Анализ графика на рис. 4.6, а показывает, что линия границы областей применения патронно-центровых станков с ЧПУ мод. 16К20ФЗС18 и с РУ мод. 16К20 пересекает среднее значение относительной производительности этих станков при обработке деталей средней сложности при  $z = 45$ . При  $z < 45$  целесообразно использовать станки мод. 16К20ФЗС18, при  $z > 45$  – станки мод. 16К20. С ростом относительной производительности граница областей применения сдвигается в область средне- и мелкосерийного производства (точки В, Г, Д на рис. 4.6, б). Так, при  $y = 2$  граница соответствует значению  $z$ , равному 43 наименованиям деталей, при  $y = 2,5$  –  $z = 100$  и при  $y = 3$  –  $z = 148$ .

## **5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

1. Изучить основные положения, учитываемые при выборе оборудования для реализации технологических процессов.

2. Изучить вопросы выбора оборудования для условий единичного и мелкосерийного производства.

3. Изучить вопросы выбора оборудования для условий различной серийности производства.

4. Определить области рационального применения металлорежущих станков по укрупненным нормативам эффективности применения станков с ЧПУ при обработке деталей, характерных для станкостроения в условиях различной серийности производства для технологических процессов, представленных преподавателем.

## **6. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЁТУ**

Отчёт выполняется на отдельных листах формата А4 (ГОСТ 2.105–95).

В отчёте должны приведены: основные положения, учитываемые при выборе оборудования для реализации технологических процессов; определение области рационального применения металлорежущих станков по укрупненным нормативам эффективности применения станков с ЧПУ при обработке деталей, характерных для станкостроения в условиях различной серийности производства для технологических процессов, представленных преподавателем.

## **7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Основные положения, учитываемые при выборе оборудования для реализации технологических процессов.

2. Выбор оборудования для условий единичного и мелкосерийного производства.

3. Выбор оборудования для условий различной серийности производства.

4. Особенности применения станков с ЧПУ.

5. Выбор оборудования с ЧПУ для обработки деталей различных групп.

6. Особенности обработки деталей на многоцелевых станках.



7. Определение экономической эффективности применения металлорежущих станков в условиях различной серийности производства.

## 8. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Укрупненные нормативы эффективности применения станков с ЧПУ при обработке деталей, характерных для станкостроения в условиях различной серийности производства. – Москва: НИИМАШ, 1979. – 58 с.

2. Экономическое обоснование области применения металлорежущих станков с программным управлением / В. П. Кубланов, И. А. Маковецкая, А. П. Назаренко [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1987. – 152 с.

3. Определение экономической эффективности металлорежущих станков с ЧПУ. Инструкция МУ2.5-81. – Москва: Министерство станкостроительной и инструментальной промышленности, 1982. – 104 с.

4. Балабанова, А. Н. Краткий справочник технолога-машиностроителя / А. Н. Балабанова. – Москва: Изд-во стандартов, 1992. – 464 с.

5. Станочное оборудование автоматизированного производства. Т. 2 / под ред. В. В. Бушуева. – Москва: Изд-во «Станкин», 1994. – 656 с.

6. Гжиров, Р. И. Программирование обработки на станках с ЧПУ: Справочник / Р. И. Гжиров, П. П. Серебrenицкий. – Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. – 588 с.

7. Марголит, Р. Б. Эксплуатация и наладка станков с программным управлением и промышленных роботов / Р. Б. Марголит. – Москва: Машиностроение, 1991. – 271 с.

8. Шарин, Ю. С. Обработка деталей на станках с ЧПУ / Ю. С. Шарин. – Москва: Машиностроение. 1983. – 117 с.

9. Ельганин, Ю. М. Применение и конструктивные особенности токарных многоцелевых станков / Ю. М. Ельганин, А. М. Итин, В. Н. Карякин. – Москва: ВНИИТЭМР, 1987. – 48 с.

## Лабораторная работа № 9

### УСТАНОВКА И МОНТАЖ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить теоретические положения установки станков на фундамент и виброизолирующие опоры, приобретение навыков разработки установочных чертежей металлорежущих станков.

#### 2. ВЫБОР СПОСОБА УСТАНОВКИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Способ установки станка влияет на основные показатели его качества – точность обработки и шероховатость обработанной поверхности, стабильность точностных параметров и производительность.

При выборе способа установки станка необходимо учитывать следующее:

1. Высокие требования к точности и качеству поверхности обрабатываемых на станке деталей определяют значительно более жесткие, чем для других машин, требования к точности взаимного расположения и перемещения узлов станка и значительно более низкий уровень допустимых величин упругих перемещений и амплитуд колебаний.

2. Разнообразные нагрузки, действующие в станках (по характеру, месту приложения, величине, спектральному составу и т. п.), по-разному влияют на работоспособность станка при различных способах установки. Следует учитывать действие статических нагрузок от веса неподвижных и перемещающихся узлов станка и сил резания и динамических нагрузок – сил инерции переменных составляющих силы резания, сил, возникающих в работающем приводе при ударах и раскрытии зазоров и т. п. К статическим нагрузкам, действующим вне станка, но оказывающим влияние на его работоспособность, могут быть отнесены осадки основания, приводящие к деформациям элементов несущей системы, а к динамическим нагрузкам – колебания основания.

Станок – это потенциально автоколебательная система, и параметры установки в ряде случаев могут определять область устойчивой работы станка.

3. С точки зрения требований к фундаментам под машины последние обычно делят на три группы: машины, не чувствительные к колебаниям, приходящим извне, и не являющиеся источниками колеба-

ний; машины, требующие защиты от колебаний, приходящих извне; машины с динамическими нагрузками, служащие источниками колебаний.

Значительная часть станков, например шлифовальные, являясь источниками колебаний основания, в то же время требуют защиты от колебаний, приходящих к станку.

Требования к установке существенно зависят от класса точности, размеров и конструктивных особенностей станка.

Станки нормальной точности предназначены для черновых и получистовых операций. Для этих станков характерна работа на интенсивных режимах со значительными сечениями среза.

Так как независимо от типа и размера станка зона обработки располагается примерно на одном и том же, удобном для обслуживания уровне от пола, в станках средних размеров сплошные по высоте станины обычно имеют относительно высокую жесткость, их деформации существенного влияния на работоспособность станка не оказывают и при выборе способа установки, как правило, могут не рассматриваться. В тяжелых станках допустимый уровень упругих перемещений может быть обеспечен только благодаря соответствующей установке станка, и требуемая жесткость системы станина-фундамент назначается из условия ограничения деформаций системы под действием сил резания, веса перемещающихся узлов и в результате неравномерных осадок фундамента.

В станках нормальной точности уровень колебаний от возмущений, действующих в приводе, или от сил резания обычно значительно выше уровня колебаний от внешних источников – колебаний основания. Жесткость закрепления станков на фундаменте оказывает существенное влияние на устойчивость при резании.

Таким образом, основными требованиями, предъявляемыми к установке станков нормальной точности, являются:

- ограничение упругих перемещений станин (преимущественно тяжелых станков) под действием сил резания, веса перемещающихся узлов и осадок фундамента;

- ограничение уровня колебаний, вызываемых возмущениями, действующими в станке;

- обеспечение устойчивости при резании в заданном диапазоне условий обработки.

Высокоточные станки предназначены для финишных операций. Для этих станков характерна работа с весьма малыми силами резания.

Уровень колебаний от возмущений, действующих в приводе, низкий, он соизмерим с уровнем колебаний, вызываемых колебаниями основания. Основное требование, предъявляемое к установке высокоточных станков, – обеспечение надежной защиты от колебаний основания – виброизоляция.

В станках средних размеров частоты собственных колебаний системы, определяющие чувствительность станка к колебаниям основания, как правило, существенно выше, чем в тяжелых станках. Поэтому для станков средних размеров виброизоляция может быть обеспечена при более высоких частотах собственных колебаний станка на опорах, чем для тяжелых станков, и средства виброизоляции, используемые для станков средних размеров и тяжелых, оказываются различными. Следует отметить, что при виброизолирующей установке податливость опор определяет существенные величины упругих перемещений под действием веса перемещающихся узлов станка и значительный уровень колебаний, возникающих, например, при реверсах узлов.

Отсюда вытекает дополнительное требование к виброизолирующей установке точных станков – ограничение упругих перемещений под действием веса перемещающихся узлов и уровня колебаний, вызываемых возмущениями, действующими в станке.

На основании анализа влияния различных способов установки станков на их работоспособность можно выделить факторы, которые в первую очередь необходимо учитывать при установке (табл. 2.1, 2.2).

Установка станка должна не только обеспечивать нормальную (паспортную) работоспособность станка в течение заданного срока службы, но и отвечать требованиям техники безопасности. Кроме того, принятое решение должно быть наиболее экономичным.

На выбор способа установки станков существенное влияние оказывают технологические особенности производства. Как известно, массовое производство характеризуется постоянным совершенствованием технологического процесса, что вызывает частую смену и перестановку станков в цехе.

Таблица 2.1

## Учет статических деформаций системы при установке станков

Типы станков	Статические деформации системы		
	под действием веса перемещающихся узлов	под действием сил резания	в результате неравномерных осадок фундамента
Токарные:			
токарные и револьверные средних размеров			
тяжелые токарные	+	+	+
отделочные			
вальцетокарные	+		+
токарно-карусельные		+	
Сверлильно-расточные:			
радиально-сверлильные		+	
координатно-расточные	+		
алмазно-расточные			
горизонтально-расточные	+		+
консольно-фрезерные			
продольно-фрезерные	+		+
Зубофрезерные:			
нормальной точности			
точные			
Строгальные:			
зубодолбежные	+		
Шлифовальные:			
круглошлифовальные			
и внутришлифовальные			
вальцешлифовальные	+		+
плоскошлифовальные			
резьбошлифовальные			
зубошлифовальные			

Таблица 2.2

Учет колебаний элементов системы и устойчивости при резании  
при установке станков

Типы станков	Колебания элементов системы		Устойчивость при резании
	под действием возмущений в станке	в результате колебаний основания	
Токарные: токарные и револьверные	+		
тяжелые токарные			
отделочные	+	+	
вальцетокарные		+	
токарно-карусельные			
Сверлильно-расточные: радиально-сверлильные			
координатно-расточные	+	+	
алмазно-расточные	+	+	
горизонтально-расточные			
консольно-фрезерные	+		
продольно-фрезерные			
Зубофрезерные: нормальной точности	+		
точные	+	+	
Строгальные: зубодолбежные	+	+	
Шлифовальные:  вальцешлифовальные			
резьбошлифовальные			
зубошлифовальные	+	+	

Для основных цехов массового производства типична специализация оборудования по изделиям и операциям, когда даже универсальные станки работают с заданными режимами и используются только на предварительных или только на чистовых операциях. В этих условиях рекомендуется использовать наименее трудоемкие способы крепления

станков, например с помощью самоанкетирующихся болтов, а там, где это возможно с точки зрения работоспособности станков и техники безопасности, следует ставить станки, не закрепляя болтами.

Для станков, встроенных в автоматические линии и связанных общим транспортом, важны тщательность установки и постоянство выверки. Это вынуждает жестко закреплять на фундаменте даже те станки, которые могли бы удовлетворительно работать и без крепления.

В цехах индивидуального, мелкосерийного и в ряде случаев серийного производства, в ремонтно-механических цехах, в ремонтных и инструментальных отделениях цехов массового производства универсальные станки обычно используются на разнообразных операциях в широком диапазоне режимов.

Поэтому при выборе способа установки следует ориентироваться на наиболее тяжелые условия работы станка.

В настоящее время наиболее распространена установка станков на фундаменты трех видов (рис. 2.1): бетонные полы первого этажа (общая плита цеха); утолщенные бетонные ленты, ленточные фундаменты), специально проектируемые массивные фундаменты (одиночные или общие) – обычные (на естественном основании), свайные и виброизолированные (на резиновых ковриках или пружинах).

Установка станка может быть жесткой или упругой.

К жесткой установке относятся те способы установки станка на жесткие (металлические) опоры (с креплением или без крепления), когда фундаментом служит общая плита цеха или бетонный блок, опирающиеся на естественное основание или перекрытие. К упругой установке относятся все способы установки станка на упругие опоры и те виды установки на жесткие опоры, когда фундаментом служит бетонный блок, опирающийся на упругие опорные элементы – резиновые коврики, пружины и т. п.

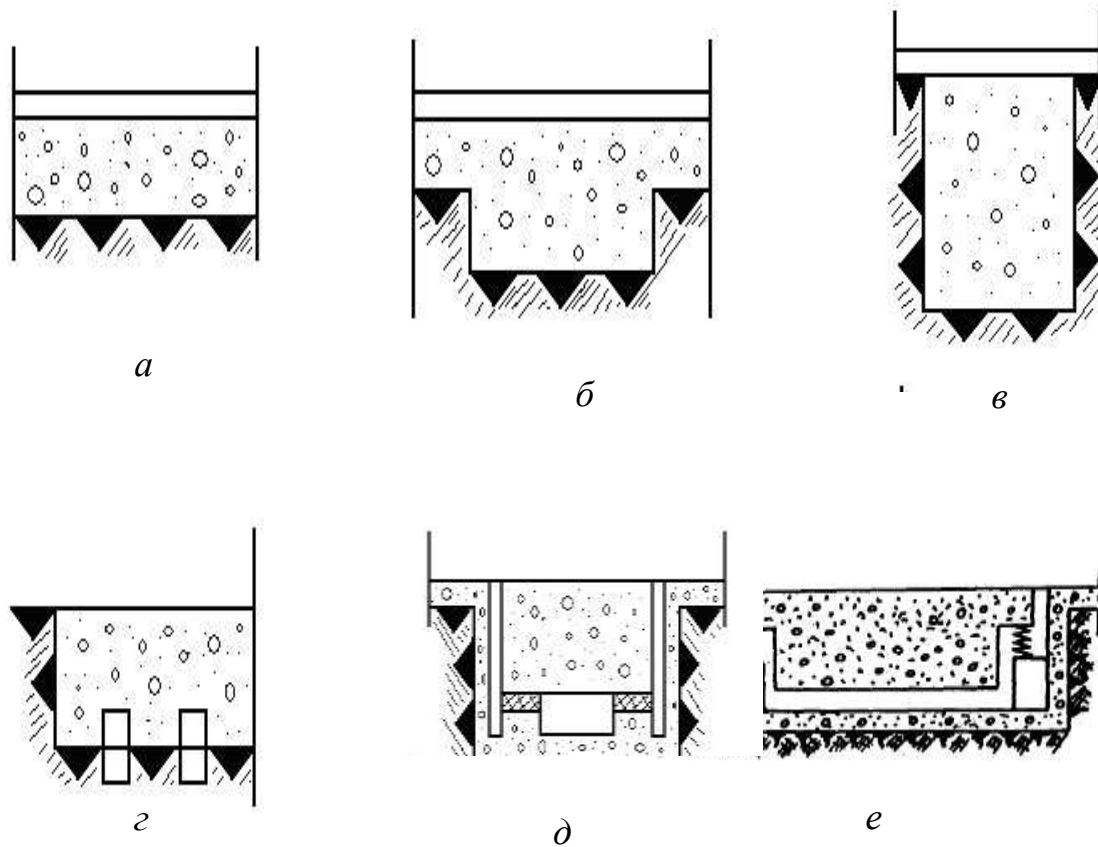


Рис. 2.1. Виды фундаментов станков:  
*a* – пол (общая плита) цеха; *б* – ленточный; *в* – обычный;  
*г* – свайный; *д* – на резиновых ковриках; *е* – на пружинах

Рассматривая специфические особенности жесткой и упругой установки, следует подчеркнуть следующее.

При жесткой установке станка станина и фундамент деформируются совместно. Естественно, что при этом величины упругих перемещений и уровень колебаний от силовых факторов, действующих в станке, окажутся меньшими, чем при упругой установке, но вся система будет весьма чувствительной к внешним воздействиям – осадкам фундамента и колебаниям основания. Различные способы жесткой установки обеспечивают разную жесткость соединения станины с фундаментом. Наибольшая жесткость достигается при креплении станка анкерными болтами, несколько меньшая – при установке без крепления болтами, но с подливкой опорной поверхности станины цементным раствором, и еще меньшая – при установке без болтов и без подливки (этот способ применяется преимущественно при частой перестановке станков).



При упругой установке станок изолирован от внешней среды. На его работоспособность меньше влияют внешние возмущения, но уровень перемещений и колебаний от возмущений, действующих в станке, окажется больше. Различные способы упругой установки обеспечивают разную степень чувствительности станка к колебаниям основания и возмущениям, действующим в станке. Чем ниже частоты собственных колебаний, определяемые жесткостью опор и массой системы, тем выше степень виброизоляции. При одних и тех же частотах собственных колебаний системы виброизоляции чем больше жесткость опор и масса системы, тем ниже уровень колебаний, вызываемых работой механизмов станка. В соответствии с этим наиболее эффективным, но и самым дорогим средством виброизоляции, применяемым для особо точных станков, являются фундаменты на пружинах, наиболее дешевым, обеспечивающим удовлетворительную степень виброизоляции для большинства станков средних размеров, – упругие виброизолирующие опоры.

В настоящее время в машиностроении большинство станков нормальной точности средних размеров (около 90–95 % всех станков) устанавливаются на пол цеха, причем около 30 % из них с креплением болтами, 30–35 % без крепления болтами, но с подливкой цементным раствором и около 30 % без крепления болтами и без подливки – непосредственно на жесткие или упругие опоры.

Выбор способа установки в ответственных случаях, в частности для специальных, тяжелых или высокоточных станков, станков, работающих в автоматизированных комплексах, и т. п., производится заводом-изготовителем с учетом условий на конкретной площадке, где будет размещаться оборудование. Способ установки универсальных станков, составляющих значительную часть станков парка, назначают при проектировании новых предприятий технологии строительных организаций, а в действующих цехах – заводские механики. Это связано с тем, что при проектировании универсального станка конструктор не знает, в каких условиях будет эксплуатироваться станок, для каких операций он будет использоваться, каковы будут наиболее часто применяемые режимы обработки, требования к точности деталей, где будет установлен (на первом этаже или на перекрытии) и т. п. Поэтому заранее оговорить наиболее рациональный для данного универсального станка способ установки трудно. В соответствии с этим в настоящей работе приведены общие рекомендации по установке станков и отмечены случаи, требующие специального рассмотрения.

Особое внимание должно быть уделено установке автоматизированных станков и станков, работающих в автоматизированных комплексах, – станков с ЧПУ, обрабатывающих центров, автоматических линий из специализированных, специальных или агрегатных станков. Установка таких станков имеет свою специфику, определяемую условиями эксплуатации, требованиями, предъявляемыми к станкам, их конструкцией и т. п.

При выборе способа установки должны учитываться следующие особенности автоматизированного оборудования:

1. Повышенная интенсивность эксплуатации, при которой ресурс оборудования выбирается в значительно более короткие сроки, чем для станков обычного типа, а сокращение сроков службы в результате неправильной установки приводит к существенно более высоким затратам на восстановление работоспособности.

Влияние способа установки на срок службы автоматизированного оборудования может быть наглядно проиллюстрировано таким примером. Для двух одинаковых автоматических линий, установленных одна на жестком фундаменте, а другая на перекрытии второго этажа, время работы до восстановительного ремонта различалось в несколько раз; станки, работающие на перекрытии, приходилось ремонтировать каждые 1,5–2 года.

2. Высокая производительность, достигаемая благодаря интенсификации рабочего процесса к увеличению скоростей холостых перемещений, определяющих высокий уровень динамических нагрузок в станках. Значительные динамические нагрузки требуют жесткого ограничения уровня колебаний станков и соответственно высокой точности установки, так как в противном случае не будут обеспечены установленные сроки службы станков.

3. Высокая степень автоматизации, в том числе обеспечивающая автоматическое получение заданного качества обработки партии деталей, что вызывает необходимость сохранения стабильных условий обработки в течение достаточно длительного времени. В связи с этим следует принимать во внимание все факторы, которые могут привести к нарушению точности установки: неравномерные осадки фундаментов, температурные деформации, связанные с колебаниями температуры в цехе в течение смены, нарушение точности установки от действия динамических нагрузок и т. п.

4. Конструктивные особенности автоматизированных станков, например наличие в станках с ЧПУ направляющих качения или гидро-

статических с малым трением или значительный вес узлов многооперационных станков при расположении непосредственно на станке тяжелых многоинструментальных магазинов. Эти обстоятельства обуславливают сравнительно низкие собственные частоты колебаний узлов и высокую чувствительность станков к колебаниям от динамических нагрузок, действующих в станке, и со стороны основания.

5. Связанность станков, работающих в автоматических комплексах, с общей транспортной системой, что требует обеспечения высокой точности монтажа и сохранности ее во времени.

6. Необходимость размещения под станками подвалов для транспортировки стружки, подвода электроэнергии, сжатого воздуха и пр., обуславливающая сравнительно сложные конструктивные формы фундаментов (с каналами, шахтами, приялками и т. п.).

7. Высокая стоимость, заставляющая стремиться к максимально возможному повышению коэффициента использования оборудования и сроков его службы, определяет также необходимость сокращения сроков монтажа за счет широкого применения фундаментов современных конструкций и способов установки и крепления станков.

Опыт установки автоматизированного оборудования показал, что нормальная его работоспособность обеспечивается только в тех случаях, когда станки установлены с учетом изложенных выше соображений. Так, для станков с ЧПУ в связи с высокими требованиями к точности при высоком уровне динамических нагрузок наиболее рациональной оказывается установка на индивидуальных фундаментах или на полу из бетонных плит, разделенных деформационными швами, причем толщина плит должна приниматься большей, чем для обычных станков того же веса (40–60 см). При этом достигается защита станков от высокочастотных колебаний основания и обеспечивается сравнительно невысокий уровень колебаний от возмущений, действующих в станке. Установка таких станков на резинометаллические опоры, при которой уровень колебаний элементов станка оказывается значительно выше, чем при жесткой установке, в большинстве случаев использована быть не может.

Для установки автоматических линий перспективно применение специальных фундаментов с настилом из проката, так называемых «балочных фундаментов», или «фундаментов с балочным поддоном». Относительно высокая стоимость балочных фундаментов окупается существенным сокращением сроков монтажа линий.

Специфические строительные задачи проектирования и расчета фундаментов – выбор марки бетона, защита бетона от вредного воздействия масел, гидроизоляция фундаментов, выполнение температурно-усадочных швов, выбор размеров подошвы и глубины заложения фундамента, расчет фундаментов по несущей способности основания и т. п. – решают в соответствии со строительными нормами и правилами (СНиП П-19-79)

### 3. УСТАНОВКА СТАНКОВ НОРМАЛЬНОЙ ТОЧНОСТИ

Станки нормальной точности в зависимости от массы и конструкции могут быть установлены на бетонный пол цеха, на устроенные в полу утолщенные бетонные ленты (ленточные фундаменты) или на массивные фундаменты (одиночные или общие), а также в случае необходимости на перекрытия.

Станки массой 10–15 т со станинами жесткими и средней жесткости ( $l/h \geq 8$ , где  $l$  – длина,  $h$  – высота сечения станины) устанавливаются на бетонный пол цеха. Станки массой до 30 т допускается устанавливать на утолщенные бетонные ленты.

Возможность установки станков на бетонный пол или на утолщенную бетонную ленту при заданной толщине плиты пола (не менее 150 мм) или ленты проверяется расчетом на прочность под действием веса станков в соответствии с рекомендациями, приведенными в СНиП П-В.8-71. Для станков с длинными сплошными станинами выполняют расчет на жесткость, который проводят так же, как для случаев установки станков на массивные фундаменты. При этом плиту пола или ленточный фундамент рассматривают как эквивалентную балку, лежащую на упругом основании и имеющую приведенную ширину и длину.

На специально проектируемые массивные фундаменты устанавливают:

- станки с нежесткими, т. е. с длинными ( $l/h > 8$ ), и с составными станинами, в которых требуемая жесткость станины обеспечивается за счет фундамента;
- тяжелые станки (массой более 10 т), размещаемые в цехах, толщина пола которых, определяемая работоспособностью основной массы установленного оборудования, недостаточна для установки станков данной массы;
- станки, размещаемые на полу с нежестким подстилающим слоем (без бетонной подготовки).

Минимальная высота фундамента (в метрах) для станков массой до 30 т, рекомендуемая СНиП П-19-79, приведена ниже ( $L$  – длина фундамента, м):

Токарные, горизонтально-протяжные, продольно-строгальные, продольно-фрезерные.....	$0,3\sqrt{L}$ ;
Шлифовальные.....	$0,4\sqrt{L}$ ;
Зуборезные, карусельные, вертикальные полуавтоматы и автоматы, консольно- и бесконсольно-фрезерные, горизонтально-расточные.....	$0,6\sqrt{L}$ ;
Вертикально- и радиально-сверлильные.....	0,6–1,0;
Поперечно-строгальные, долбежные.....	0,8–1,4.

Примечания:

1. Большие значения принимают для станков больших размеров.
2. Для агрегатных станков повышенной точности, многооперационных станков и станков с программным управлением (отдельных или в линиях) высоту фундаментов следует увеличивать на 20 %.

Для станков массой свыше 30 т с длинными сплошными станинами высоту одиночных фундаментов определяют из условия обеспечения необходимой жесткости станины за счет фундамента на основе соответствующего расчета, для других станков массой свыше 30 т ее устанавливают из конструктивных соображений (в частности в зависимости от глубины приямков).

Высоту общих фундаментов следует назначать по результатам расчета фундамента на прочность и жесткость с учетом минимально необходимой высоты, обеспечивающей требуемую жесткость станин отдельных станков, а также исходя из конструктивных соображений.

Станки средних размеров можно устанавливать на перекрытиях. При этом должны выполняться условия обеспечения прочности несущих конструкций здания (с учетом динамических нагрузок) и ограничения уровня колебаний (в соответствии с санитарно-техническими нормами и требованиями технологического процесса).

Динамические нагрузки, действующие в станке, условно можно разделить на две группы:

– номинальные нагрузки, параметры которых могут быть вычислены в зависимости от параметров станка, детали и режимов обработки: от сил инерции в поперечно-строгальных и долбежных станках, от вращения неуравновешенных деталей в токарных станках и т. п.;

– нагрузки, параметры которых априорно определить практически невозможно: от удара в зазорах элементов привода, при врезаниях и выводах зубьев, высокочастотные составляющие импульсов сил инерции в станках с гидроприводом и т. п.

Если учитывать только номинальные нагрузки, то станки по классификации, используемой при расчете несущих конструкций зданий на динамические нагрузки, в большинстве своем должны быть отнесены к машинам категории I и II динамичности (категории II – средняя динамичность – амплитуда инерционной силы до 1000 Н), а по характерной продолжительности динамической нагрузки к группе I, т. е. к низкочастотным машинам (преобладающие гармоники до 400 кол./мин), в отдельных случаях к группе II – к среднечастотным (преобладающие гармоники от 400 до 2000 кол./мин). Номинальные нагрузки по характеру воздействия близки к статическим и обычно не представляют опасности с точки зрения прочности или уровня колебаний перекрытия. Частотный состав неопределенных возмущений, обычно довольно широкий, лежит в том же диапазоне (выше 30–40 Гц), что и частоты собственных колебаний элементов несущей системы станка и перекрытия. Если уровень этих возмущений в станке достаточно высокий, избежать нежелательных резонансных явлений не удастся.

Обычно при установке станков на перекрытиях расчет на колебания не выполняют, а проверяют прочность под действием веса станков и номинальных динамических нагрузок в соответствии с инструкцией по расчету несущих конструкций промышленных зданий и сооружений на динамические нагрузки.

При использовании типовых элементов для перекрытий, на которых будут устанавливаться станки, расчетные технологические нагрузки от станков могут заменяться эквивалентными по воздействию равномерно распределенными. При этом в случае необходимости учитывается возможность перестановки оборудования.

Если уровень колебаний перекрытия при жесткой установке станков окажется выше допустимого, используют установку на упругие опоры, причем параметры опор определяют подбором так, чтобы колебания станка и перекрытия не превышали допустимых.

Допустимый уровень колебаний перекрытий назначается из условия нормальной работы людей и регламентируется санитарно-гигиеническими нормами СН 245-75 (табл. 3.1).

Для точных станков допустимый уровень колебаний определяется в зависимости от требований к точности обработки, и по правильности выбора параметров установки судят по амплитудам относительных колебаний инструмента и заготовки.

В станках нормальной точности относительные колебания инструмента и заготовки на точность обработки практически не влияют, и о допустимости того или иного способа установки следовало бы судить по изменениям уровня колебаний в сопряжениях элементов, исходя из влияния колебаний на долговечность станка.

Таблица 3.1

## Допустимый уровень колебания перекрытий

Частота, Гц	Амплитуда перемещений, мм	Амплитуда перемещений, мм/с	Амплитуда перемещений, мм/с <sup>2</sup>
До 3	0,6–0,4	11,2–7,6	220–140
3–5	0,4–0,15	7,6–4,6	140–150
5–8	0,15–0,05	4,6–2,5	150–130
8–15	0,05–0,03	2,5–2,8	130–270
15–30	0,03–0,009	2,8–1,7	270–320
30–50	0,009–0,007	1,7–2,2	320–700
50–75	0,007–0,005	2,2–2,8	700–1120
75–1000	0,005–0,003	2,8–1,9	1120–1200

Станки нормальной точности можно устанавливать без закрепления и с закреплением на фундаменте с помощью фундаментных болтов или подливки опорной поверхности станины цементным раствором. Иногда станки, закрепленные с помощью болтов, кроме того, подливают. Для особо точной и жесткой установки станков применяют специальные чугунные фундаментные плиты с регулировочными приспособлениями, жестко заделываемые в фундамент.

На общей бетонной плите цеха с креплением фундаментными болтами станки устанавливают в следующих случаях:

– когда это диктуется требованиями техники безопасности, в частности станки, предрасположенные к опрокидыванию (радиально-сверлильные), или станки для обработки тяжелых деталей, устанавливаемых с помощью кранов;

– при необходимости обеспечить совместную работу станины и фундаментной плиты (станки с относительно длинными нежесткими станинами при  $l/h > 6 \div 8$ );

– при значительных динамических воздействиях возвратно-поступательно перемещающихся масс (строгальные станки), вращающихся неуравновешенных масс, при работе на скоростных режимах (токарные, фрезерные станки).

Установка с креплением болтами (на клинья с подливкой опорной поверхности станины или на регулируемые опорные элементы без подливки) – наиболее жесткая. Этот способ можно применить для всех станков нормальной точности, которые допустимо устанавливать на пол. При необходимости частой выверки и установки станка на регулируемые опоры подливают только основание опоры. Для повышения жесткости рекомендуется затягивать болты со значительными силами так, чтобы давление на поверхности контакта опорных элементов станка и фундамента от веса станка и силы затяжки болта были близки, но не превышали  $800 \text{ Н/см}^2$ .

Требующие частой перестановки станки (за исключением указанных выше), устанавливаемые на пол цеха, можно не закреплять болтами.

Большинство типов легких и средних станков, используемых в широком диапазоне режимов, на операциях нормальной точности можно устанавливать без крепления болтами с подливкой опорной поверхности станины цементным раствором. Станки, работающие со значительными динамическими нагрузками, в частности поперечно-строгальные, можно устанавливать без крепления болтами при прочности цементного раствора подливки не ниже  $1500 \text{ Н/см}^2$ .

Установка без крепления болтами и без подливки на жесткие опоры допускается для требующих частой перестановки станков, работающих на нетяжелых режимах, с недлинными станинами  $l/h < 5 \div 6$ . Во избежание нарушения точности установки станка необходима фиксация регулируемого элемента опоры. Поэтому установка на клиновых подкладках не рекомендуется. Для удобства перестановки целесообразно использовать опоры, скрепленные со станком (типа опор ОЖ).

На резинометаллические опоры можно устанавливать требующие частой перестановки станки с жесткими станинами  $l/h < 4 \div 5$ , работающие на легких режимах с относительно небольшими динамическими нагрузками, вызывающими амплитуды колебаний станин, которые не превышают допустимых. В частности, резинометаллические опоры до-



пускается применять для установки относительно небольших токарных станков (наибольший диаметр обрабатываемой детали 400 мм, расстояние между центрами не более 1000 мм), используемых для обработки уравновешенных деталей на нетяжелых режимах; координатно-расточных и алмазно-расточных; консольно- и бесконсольно-фрезерных и зубофрезерных станков, используемых на нетяжелых режимах станков шлифовальной группы при плавном реверсе перемещающихся узлов. При установке на резинометаллические опоры в течение первого года эксплуатации необходима периодическая выверка станка. Применение резинометаллических опор рационально для станков, работающих в условиях интенсивного уровня колебаний основания, и при необходимости активной виброизоляции станков, в частности поперечно-строгальных и долбежных, размещаемых на нежестких перекрытиях или вблизи точных станков.

Станки, устанавливаемые на специально проектируемые массивные фундаменты, как правило, крепятся фундаментными болтами. Станки с относительно недлинными станинами, не требующие периодической выверки, можно устанавливать на клинья и подливать станину по всей опорной поверхности цементным раствором (с креплением болтами или, реже, без крепления болтами).

Станки с длинными станинами устанавливают на регулируемые (винтовые или клиновые) опоры и притягивают болтами, основания клиновых башмаков подливают. В таких станках иногда часть опорной поверхности станины, например под тяжелым порталом, дополнительно подливают.

Установка станков нормальной точности на фундаменты без крепления болтами или без подливки нецелесообразна. Во избежание снижения устойчивости при резании обязательно надо закреплять болтами стойки порталных станков.

При установке на перекрытиях применяют те же опорные элементы и используют те же способы крепления станков, что и при установке на пол первого этажа. Станки крепят болтами только в том случае, когда в помещении предусмотрены специальные устройства для крепления (заделаны швеллеры, металлические плиты и т. п.).

Следует иметь в виду, что при установке станков на перекрытиях на жесткие опоры с подливкой опорной поверхности станины уровень колебаний, допустимый по санитарно-гигиеническим нормам (см. табл. 2.1), обеспечивает и нормальную работу станка. В том случае, когда уровень колебаний перекрытия, определяемый работающими станками,

оказывается выше допустимого по санитарно-гигиеническим нормам, необходимо устанавливать станки на упругие опоры, правильный выбор которых снижает уровень колебаний перекрытия. Однако при этом уровень колебаний станка от действия внутренних источников возмущений может возрасти.

Выбор способа установки станка на перекрытии зависит не только от уровня колебаний, но и от уровня шума в помещении. Если шум в помещении определяется главным образом работой станков, способ установки на уровень шума практически не влияет. В том случае, когда шум в помещении обусловлен колебаниями несущих конструкций здания, возбуждаемыми работой станков, которые размещены в соседних помещениях, установка этих станков на податливые опоры позволяет уменьшить уровень колебаний перекрытия и существенно снизить шум.

Необходимую высоту фундамента или толщину плиты пола, обеспечивающих требуемую жесткость системы станина–фундамент, определяют на основе проверочного расчета.

По предварительно заданной высоте фундамента или толщине плиты вычисляют суммарную жесткость системы, полагая, что закрепление станины на фундаменте обеспечивает их совместное деформирование относительно оси, проходящей через общий центр тяжести сечений. При этом плиту пола или ленточный фундамент рассматривают как эквивалентные балки, имеющие соответствующие приведенные размеры – ширину и длину.

Установка сплошных станин на фундаменты без крепления болтами и без подливки опорной поверхности станины цементным раствором дает сравнительно небольшое повышение жесткости станины за счет фундамента (30–40 %).

Общие рекомендации по установке станков разных типов приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Общие рекомендации по установке станков нормальной точности средних размеров  
(масса до 10–15 т) на полу первого этажа (с жестким подстилающим слоем)

Типы станков	Вид установки			
	С креплением анкерными болтами	Без крепления болтами с подливкой опорной поверхности станины	Без крепления болтами и без подливки опорной поверхности станины	На упругих (в частности, на резинометаллических) опорах
1	2	3	4	5
Т окарные, револьверные	Станки, не требующие перестановки и используемые в широком диапазоне режимов (в том числе обдирочных), на работах с ударными нагрузками, для обработки неуравновешенных деталей. Станки с длинными станинами	Станки, не требующие частой перестановки, или с длинными станинами, используемые на нетяжелых режимах	Станки, требующие перестановки с относительно недлинными станинами. Для жесткости станины на ножках могут устанавливаться на опоры вместе с металлической рамой, связывающей ножки	Станки, устанавливаемые на нежестких перекрытиях или в условиях колебаний основания. Могут устанавливаться относительно небольшие станки ( $D_{нб} \leq 400$ мм; расстояние между центрами $\leq 1000$ мм), требующие частой перестановки, используемые для обработки уравновешенных деталей на нетяжелых режимах

Продолжение табл. 3.2

1	2	3	4	5
Вертикально-сверлильные	Станки, устанавливаемые в зонах работы мостовых кранов	Станки, устанавливаемые вне зон работы мостовых кранов, не требующие частой перестановки или используемые на тяжелых режимах	Станки, устанавливаемые вне зон работы мостовых кранов, требующие частой перестановки, используемые на нетяжелых режимах	—
Радиально-сверлильные	Основная часть станков	—	—	—
Горизонтально-расточные (с крестовым столом)	Основная часть станков (так как станины должны периодически выверяться в качестве опорных элементов, как правило, используют клиновые башмаки)	Небольшие станки, требующие перестановки, используемые для операций относительно невысокой точности	—	—
Консольно- и бесконсольно-фрезерные	Станки, не требующие перестановки, используемые в широком диапазоне режимов. Станки, предназначенные для работы с тяжелыми режимами	Основная часть станков, не требующих частой перестановки; станки, требующие перестановки, используемые на тяжелых режимах	Станки, требующие частой перестановки, используемые на нетяжелых режимах	Станки, устанавливаемые на нежестких перекрытиях; могут устанавливаться станки, требующие частой перестановки.

Продолжение табл. 3.2.

1	2	3	4	5
Зубофрезерные	Станки, не требующие перестановки, используемые в широком диапазоне режимов (в том числе на черновых операциях); станки, предназначенные для работы с тяжелыми режимами	Основная часть станков, не требующих перестановки; станки, требующие перестановки, используемые на тяжелых режимах	Станки, требующие частой перестановки, используемые на операциях относительно невысокой точности или на нетяжелых режимах	Станки, устанавливаемые на нежестких перекрытиях; могут устанавливаться станки, требующие частой перестановки, используемые на нетяжелых режимах
Поперечно-строгальные, долбежные	Станки, используемые в широком диапазоне режимов (в том числе обдирочных) или для точных работ	Станки, требующие перестановки, используемые на нетяжелых режимах или на операциях невысокой точности, устанавливаемые на жестких перекрытиях	—	Станки, устанавливаемые на недостаточно жестких перекрытиях или в непосредственной близости от высокоточных станков
Протяжные	Основная часть станков	Станки, используемые на нетяжелых режимах или на операциях невысокой точности	—	—
Зубострогальные, зубодолбежные	Станки, используемые на тяжелых режимах или для точных работ	Станки, используемые на нетяжелых режимах или на операциях относительно невысокой точности	—	—

## 4. УСТАНОВКА СТАНКОВ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ И ВЫСОКОТОЧНЫХ

### 4.1. Виброизоляция станков

При установке станков повышенной точности и высокоточных решающее влияние на выбор способа установки оказывает необходимость виброизоляции станков, т. е. защиты их от вредного воздействия колебаний основания.

Основными параметрами виброизоляции, определяющими ее эффективность, являются частоты собственных колебаний станка на опорах и характеристики демпфирования системы на этих частотах. В реальных условиях соотношения между частотами собственных колебаний станка на опорах в разных направлениях более или менее постоянны и степень виброизоляции может условно характеризоваться собственной частотой вертикальных колебаний станка на опорах.

Виброизоляция станков может осуществляться установкой станка на упругие опоры, расположенные непосредственно под станком, или на дополнительный упруго-опертый бетонный блок.

Выбор способа установки определяется:

- параметрами виброизоляции, обеспечивающими получение на данном станке изделий требуемого качества при том уровне колебаний, который имеет место в зоне установки станка;
- характером (в частности уровнем) динамических возмущений, действующих в станке;
- жесткостью станины и необходимостью работы с точными уровнями;
- особенностями помещения, в котором размещаются станки
- прочностью бетонного пола, жесткостью крепления, возможностью сооружения фундаментов значительных габаритов и т. п.

Непосредственно на упругие опоры можно устанавливать станки средних размеров с жесткими станинами (при  $l/h < 4 \div 5$ ), не имеющие мощных внутренних источников возмущений, допускающие без ущерба для удобства на станке и качества обработки значительные перекосы, при необходимой степени виброизоляции, определяемой собственной частотой вертикальных колебаний станков на опорах  $f_z > 10$  Гц, в частности соответствующие токарные, координатно-расточные, алмаз-

но-расточные, шлифовальные. Упругие опоры – единственное средство виброизоляции станков, устанавливаемых на перекрытиях.

Непосредственно под станиной размещают преимущественно резинометаллические опоры ОВ-31 и ОВ-30. Для станков, требующих периодической юстировки, применяют упруго-жесткие опоры.

При установке станков на перекрытиях следует иметь в виду, что чем выше жесткость перекрытия, тем ниже уровень колебаний в производственном помещении. Поэтому станки можно устанавливать на монолитных или сборномонолитных перекрытиях. На жестких монолитных перекрытиях в отдельных случаях можно устанавливать и высокоточные станки при условии, если уровень колебаний перекрытия при работающем оборудовании не превышает среднего уровня колебаний на полах первых этажей, или уровня колебаний, допустимого для машин, высокочувствительных к колебаниям: ускорение  $W_0 = 6,3 \text{ мм/с}^2$  при частотах от 1 до 10 Гц, скорость  $V_0 = 0,1 \text{ мм/с}$  при частотах от 10 до 100 Гц. Интересно отметить, что о допустимости уровня колебаний станков грубо можно судить и на ощупь – колебания высокоточных станков должны быть либо неощутимы совсем, либо слабо ощутимы (табл. 4.1).

Таблица 4.1

#### Характеристика воздействия колебаний на людей

Характеристика воздействия колебаний на людей	Предельное ускорение колебаний, $\text{мм/с}^2$ (для частот от 1 до 10 кол./с)	Предельная скорость колебаний, $\text{мм/с}$ (для частот от 10 до 100 кол./с)
Не ощутимы	10	0,16
Слабо ощутимы	40	0,64
Хорошо ощутимы	125	2,0
Сильно ощутимы	400	6,4
Вредны при длительном воздействии	1000	16
Безусловно вредны	Более 1000	Более 16

При высоком уровне колебаний перекрытия, исключающем жесткую установку точных станков, применение упругих опор в целях пассивной виброизоляции без одновременного снижения интенсивности колебаний перекрытия в результате активной виброизоляции соседних машин – источников колебаний, не может дать желаемого эффекта.

Станки устанавливаются на дополнительный упруго-опертый бетонный блок в следующих случаях:

- требуемая (низкая) частота собственных колебаний станка на опорах не может быть обеспечена с помощью упругих опор, размещаемых непосредственно под станиной;
- необходимо увеличить массу (и соответственно жесткость опор) изолируемой системы для уменьшения амплитуд вынужденных колебаний, вызываемых динамическими нагрузками, действующими в станке, или для ограничения перекосов станка от статических нагрузок (при установке тяжелых деталей, перемещении узлов станка и т. п.);
- станина станка имеет недостаточную жесткость;
- требующий изоляции станок жестко связан с рядом стоящими агрегатами и необходима их совместная установка на общем фундаменте;
- прочность бетонного пола цеха не позволяет устанавливать станки данного веса на опоры.

При виброизоляции, обеспечиваемой установкой на бетонный блок, используются обычные фундаменты на естественном основании) или свайные и специальные виброизолированные фундаменты, состоящие из блока, на который устанавливается станок, упругих опорных элементов и наружной коробки. Как правило, высокоточные станки устанавливают на отдельные блоки.

На общий блок допустимо устанавливать станки повышенной точности, работающие без значительных динамических нагрузок.

В качестве упругих опорных элементов, устанавливаемых под бетонные блоки виброизолированных фундаментов, чаще всего используют стальные пружины или выпускаемые серийно специальные резиновые коврики КВ.

Способ установки и параметры виброизоляции, параметры опорных элементов и размеры фундамента для станков средних размеров (за исключением особо точных), работающих в условиях среднего уровня колебаний основания, типичного для механических цехов машиностроительных предприятий, можно определить на основе общего анализа особенностей станка и условий его работы и с помощью простейших расчетов.

Для особо точных станков (класса С) и крупных станков особо высокой точности (класса А), а также для высокоточных станков при вынужденной их установке в зоне интенсивных колебаний основания и в некоторых других случаях способ установки целесообразно выбирать



на основе анализа работоспособности конкретного станка в конкретных условиях. При установке станков на перекрытиях способ установки рационально определять на основе общих соображений, подбирая параметры опор.

В общем случае способ установки станка назначают следующим образом:

- выбирают рациональное размещение станков и оценивают уровень колебаний основания, при котором будут работать рассматриваемые станки;
- выбирают параметры виброизоляции;
- оценивают возможность виброизоляции с помощью упругих опор, устанавливаемых непосредственно под станину;
- при необходимости выбирают массу дополнительного бетонного блока и способ его опирания.

#### **4.2. Размещение станков и оценка уровня колебаний основания**

Правильное размещение станков позволяет избежать недопустимых колебаний станка, вызываемых колебаниями основания, наиболее простыми средствами при минимальных затратах. При достаточно низком уровне колебаний основания (при отсутствии в цехе тяжелых мостовых кранов, тяжелых станков, занятых на обдирочных операциях, при расположении цеха на значительном расстоянии от источников интенсивных возмущений и т. п.) станки повышенной точности могут устанавливаться так же, как станки нормальной точности, без виброизоляции.

В общем случае станки следует размещать так, чтобы расстояние между ними и источниками интенсивных колебаний основания было максимально возможным.

Поскольку точные станки, как правило, работают в цехах заводов, в которых расположено и другое металлообрабатывающее оборудование, исходным при разработке настоящих рекомендаций принят некоторый средний уровень колебаний оснований, типичный для механических цехов машиностроительных предприятий. Условно этот уровень можно охарактеризовать средними амплитудами регулярных колебаний основания порядка 2,5–3 мкм на частотах до 20–25 Гц, уменьшающимися на более высоких частотах примерно пропорционально отношению квадрата, и максимальными амплитудами импульсных возмуще-

ний порядка 10–12 мкм в области частот до 40 Гц, соответствующих собственным частотам оснований наиболее распространенных видов.

Уровень колебаний основания в зоне установки станка может быть измерен или оценен ориентировочно в зависимости от расположения источников колебаний. Для расчетной оценки амплитуд колебаний грунта, вызываемых колебаниями фундаментов других машин, следует пользоваться указаниями, приведенными в СНиП П-19-79.

Можно считать, что уровень колебаний оснований будет примерно соответствовать принятому среднему в том случае, когда расстояния от источников возмущения до рассматриваемого участка будут не менее указанных в табл. 4.2 и 4.3.

При расположении высокоточных станков в одном помещении со станками, работающими со значительными динамическими нагрузками (долбежные, строгальные), расстояния между ними не должны быть меньше 15–25 м. При этом станки целесообразно располагать так, чтобы направление наиболее интенсивных колебаний основания (распространяющихся по радиусу от источников возмущений) примерно соответствовало направлению касательных к наиболее распространенным поверхностям, обрабатываемым на точном станке. Для уменьшения качательных колебаний станки на перекрытиях следует размещать так, чтобы разность вертикальных смещений опор была минимальной.

Таблица 4.2

Средний уровень колебаний оснований в зависимости от расстояния от источника колебаний

Источник колебаний	Расстояние, м	
	Для площадок, сложенных пластичными глинами, суглинками и супесями	Для площадок, сложенных полутвердыми и твердыми супесями
Транспорт:		
Железнодорожный	70–100	50–65
Трамвайный	35–50	25–35
Кузнечные молоты с весом падающих частей, т:		
6–10	350–500	150–250
3–6	200–350	80–100
1–3	120–150	60–75
Менее 1	25–30	15–20

Источник колебаний	Расстояние, м	
	Для площадок, сложенных пластичными глинами, суглинками и супесями	Для площадок, сложенных полутвердыми и твердыми супесями
Машины с периодическими нагрузками	75–100	30–50

Таблица 4.3

Средний уровень колебаний оснований в зависимости от скорости движения составов и расстояния до источника колебаний

Скорость движения составов, км/ч	Расстояние, м	Скорость движения составов, км/ч	Расстояние, м
5	5–6	30	16–22
10	9–11	40	18–26
15	12–15	50	20–30
20	14–18		

### 4.3. Определение параметров виброизоляции

Для станков, работающих в условиях среднего уровня колебаний основания, параметры виброизоляции ориентировочно можно выбирать так, чтобы самая высокая частота собственных колебаний станка на опорах была в 3–4 раза ниже самой низкой из собственных частот верхних узлов станка. Ориентировочные значения собственных частот колебаний верхних узлов станков средних размеров приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

**Ориентировочные значения собственных частот колебаний  
верхних узлов станков средних размеров**

Типы станков	Узел, колебания которого определяют чувствительность станка к колебаниям основания	Частота колебаний узла, Гц
Круглошлифовальные С направляющими качения С направляющими скольжения Вальцешлифовальные (при массе обрабатываемой детали 20 т) Внутришлифовальные Плоскошлифовальные: С крестовым столом С подвижной колонной	Шлифовальная бабка	30–40
	Шлифовальная бабка, деталь	50–60
	Шлифовальная головка	20–30
	Стол-салазки	60–80
Зубошлифовальные, работающие коническим кругом по методу обката Резьбошлифовальные с подвижным столом Отделочные токарные Координатно-расточные Алмазно-расточные	Головка круга	50–60
	Шлифовальная бабка	35–45
	Суппорт	30–40
	Станина, стол-салазки	60–100
	Мост со шпиндельной головкой, приспособление, стол	20; 40–50
		50–300

Частоты собственных колебаний станка на опорах должны отличаться на 30–40 % от частот, определяемых частотой вращения двигателя, числом двойных ходов перемещающихся узлов станка и т. п.

Методика экспериментального определения этих частот изложена в книге «Фундаменты и установка металлорежущих станков» (Москва: Машиностроение, 1975).

#### 4.4. Оценка возможности виброизоляции с помощью упругих опор, устанавливаемых непосредственно под станину

Установка станка на виброизолирующие опоры – самое дешевое средство виброизоляции. Поэтому для станков, требуемая степень виброизоляции которых определяется частотой собственных колебаний станка на опорах  $f_z > 10$  Гц, прежде всего оценивается возможность виброизоляции с помощью упругих опор, устанавливаемых непосредственно под станиной, в зависимости от жесткости станины (по величине  $l/h$ ), ожидаемого уровня колебаний, возникающих в станке под действием внутренних источников возмущений (по характеру обрабатываемых деталей, по плавности реверсирования и т. п.), и ожидаемых углов наклона, возникающего под действием веса перемещающихся узлов.

Если виброизоляция станка может быть осуществлена установкой его на опоры, то следует проверять прочность пола и в зависимости от требуемой частоты собственных колебаний станка на опорах и нагрузок на последние подбирать сами опоры.

Некоторое расширение области применения упругих опор может быть достигнуто путем специального уменьшения динамических нагрузок – регулировкой плавности реверса, балансировкой неуравновешенных деталей и т. п., а также путем установки станка на промежуточную плиту и увеличения расстояния между опорами.

Станки особо высокой точности, допускающие установку на упругие опоры, целесообразно размещать в помещениях с жесткими полами, средняя интенсивность импульсных колебаний которых обычно значительно ниже.

Выбор массы дополнительного бетонного блока и способа его опирания.

Обычно масса дополнительного блока может быть в 2–3 раза больше массы станка, иногда (при низких значениях  $f_z$ ) – в 4–5 раз. В ответственных случаях массу блока следует рассчитывать.

Способ опирания блока выбирают с учетом следующих соображений:

1. Наиболее простым и дешевым является обычный фундамент. Поэтому для станков повышенной точности, предназначенных для работы в условиях среднего уровня колебаний основания, при требуемой эффективности виброизоляции, определяемой частотой собственных

колебаний системы порядка 12–18 Гц, целесообразно использовать фундаменты, опирающиеся на естественное основание. На такие фундаменты можно устанавливать тяжелые токарные станки с длинными станинами, координатно-расточные и алмазно-расточные станки с нежесткими станинами при относительно невысоком уровне колебаний основания, шлифовальные станки повышенной точности средних размеров с нежесткими станинами или при резких реверсах возвратно-поступательно перемещающихся узлов, зубофрезерные станки повышенной точности с нежесткими станинами и т. п.

Следует, однако, иметь в виду, что указанные частоты обеспечиваются при размещении фундаментов на основаниях малой и средней жесткости – пластичных глинах, суглинках и супесях, на песках и т. п. Собственные частоты фундаментов, устанавливаемых на жестких основаниях – полутвердых и твердых глинах и суглинках, твердых супесях и т. п., как правило, оказываются выше 20 Гц. Поэтому при размещении цехов с прецизионным оборудованием на жестких грунтах обычные фундаменты могут быть использованы только в том случае, если виброизоляция станков не требуется, – при низком уровне колебаний основания.

Так как увеличение размеров фундамента с точки зрения его виброзащитных свойств всегда играет положительную роль, для станков, работающих без значительных динамических нагрузок, целесообразно использовать общие фундаменты.

2. При жестких ограничениях, накладываемых на углы наклона станка, стесненных габаритах фундаментов, и в случае, когда изготовление свайных фундаментов не представляет существенных трудностей, для установки высокоточных станков, работающих в условиях среднего уровня колебаний основания, могут быть использованы свайные фундаменты. Собственные частоты горизонтальных колебаний свайных фундаментов обычно не превышают 5–10 Гц.

3. При необходимой степени виброизоляции, определяемой частотой собственных колебаний  $5 \text{ Гц} < f_z < 10 \text{ Гц}$ , используются фундаменты на резиновых ковриках, а при  $f_z < 5 \text{ Гц}$  – на пружинах. Коврики подбирают в зависимости от требуемой частоты собственных колебаний и удельной нагрузки. Для получения частоты собственных колебаний  $f_z < 10 \text{ Гц}$  можно укладывать коврики в несколько слоев. На фундаменты на пружинах устанавливают тяжелые зубофрезерные, мастер-

станки, тяжелые круглошлифовальные, в частности, вальцешлифовальные станки, внутришлифовальные особо точные крупные станки и т. п.

Расчет и проектирование пружинных виброизоляторов производится в соответствии с указаниями, приведенными в Руководстве по проектированию виброизоляции машин и оборудования (М., Стройиздат, 1972). При проектировании фундаментов на пружинах во избежание чрезмерных колебаний от случайных причин следует предусматривать демпферы.

Для станков, требующих периодической юстировки, целесообразно использовать упруго-жесткие опорные элементы, которые позволяют быстро переходить от упругой установки блока, обеспечивающей его виброизоляцию, к жесткой (СНиП П-19-79).

В случае, если техническим требованиям удовлетворяют различные типы фундаментов (например, свайные и фундаменты на резиновых ковриках), выбирается наиболее дешевый.

Станки, устанавливаемые на пол с помощью резинометаллических опор, болтами не крепятся. При установке на фундаментные блоки, как правило, производится крепление болтами.

Установка станков на фундаментные блоки, на упругие или жесткие опоры без крепления болтами без подливки опорной поверхности станины цементным раствором не рациональна, так как при этом собственные частоты колебаний системы, определяемые податливостью опор станины, обычно близки к собственным частотам колебаний узлов станка. Такой способ установки требует специальных расчетов.

При любом способе виброизоляции подводки к изолированному станку должны быть достаточно гибкими, чтобы жесткость их была значительно ниже жесткости виброизоляторов. Жесткие подводки могут существенно снизить эффективность виброизоляции.

В заключение следует отметить, что в условиях обычной установки станков без виброизоляции при среднем уровне колебаний основания относительные перемещения инструмента и заготовки в результате регулярных колебаний основания не превышают нескольких микрометров, а в результате импульсных колебаний основания 10–15 мкм. Поэтому станки, предназначенные для обработки деталей с шероховатостью  $R_a = 2,5$  при сравнительно грубых (порядка 10–20 мкм) допусках на погрешности формы обрабатываемого изделия, виброизолирующей установки не требуют. Также не требуют защиты от колебаний основания станки с ударным характером процесса резания (фрезерные, стро-

гальные, долбежные и т. п.), поскольку значительные амплитуды относительных колебаний определяются самим процессом резания.

#### **4.5. Выбор способа установки высокоточных станков**

Как уже указывалось, наиболее надежным с точки зрения обеспечения паспортной работоспособности станка явился бы такой порядок, при котором способ установки станка регламентировался заводом-изготовителем. Однако условия, в которых будет работать станок (уровень колебаний основания, грунты, которыми сложена площадка, и т. п.), в большинстве случаев для изготовителей станка не известны. Не всегда жестко заданы также требования к точности и определен уровень динамических нагрузок, действующих в станке (например, неуравновешенность вращающихся оправок с инструментом). В то же время на заводе-изготовителе при сдаточных испытаниях станка можно экспериментально определить его чувствительность к колебаниям основания, оценить уровень колебаний, вызываемых возмущениями, действующими в станке (например, при реверсах), и т. п. Таким образом, очевидно, что хотя окончательно способ установки станка выбирается на месте, в ответственных случаях этот выбор необходимо производить на основе результатов предварительных исследований, проведенных на заводе-изготовителе, и с учетом полученных там рекомендаций.

Рекомендуется следующий общий подход к выбору способа установки высокоточных станков.

На заводе-изготовителе производят пробную обработку типовых деталей при жесткой и упругой (на резинометаллических опорах ОВ-31) установке станка. Обработка ведется в условиях спокойного фона при минимально возможном уровне колебаний основания (например, в ночную смену) на режимах, предназначенных для финишных операций. Обработанные детали аттестуются по шероховатости поверхности к погрешностям формы и размеров. Результаты, полученные при разных способах установки, сравниваются.

Кроме того, экспериментально оценивается чувствительность станка к колебаниям основания, которая характеризуется коэффициентами  $\gamma_z$  и  $\gamma_{x,y}$  передачи колебаний станины в зону резания. При экспериментальном определении коэффициентов передачи на станине, на уровне направляющих, устанавливаются датчики для измерения ампли-



туд вертикальных  $d_z$  и горизонтальных  $d_{x,y}$  абсолютных колебаний станины и датчик для измерения амплитуды  $d_{\text{отн}}$  относительных колебаний инструмента и детали по нормали к обрабатываемой поверхности. Возбуждая свободные колебания станка на опорах, определяют коэффициент  $\gamma_{z0} = \frac{d_{\text{отн}}}{d_z}$  на частоте  $f_{z0}$  вертикальных колебаний станка на

опорах и коэффициенты  $\gamma_{x0,y0} = \frac{d_{\text{отн}}}{d_{x0,y0}}$  на частотах  $f_{x0}, f_{y0}$  горизонтальных колебаний станка на опорах.

Так как при установке станка на бетонный блок размеры блока выбирают в зависимости от уровня колебаний, вызываемых возмущениями, действующими в станке, при испытаниях станка на заводе-изготовителе фиксируют также максимальный уровень относительных колебаний станины, вызываемых работающим приводом, в частности при реверсах.

Если качество обработанных деталей при жесткой установке оказалось выше, чем при установке на резинометаллические опоры, то это значит, что при установке на податливые опоры колебания от возмущений, действующих в станке, интенсифицируются. Поэтому при необходимости виброизоляции (например, при работе станка в условиях интенсивных колебаний основания) установка на опоры, которая даже при спокойном фоне не дает хороших результатов, применена быть не может, и целесообразно использовать установку на упруго-опертый бетонный блок.

Если качество обработанных деталей при установке станка непосредственно на виброизолирующие опоры оказалось выше или таким же, как при жесткой установке, это говорит о том, что такая виброизоляция при данном уровне колебаний основания возможна.

Предельный уровень колебаний основания, при котором для данного станка возможна виброизоляция с помощью упругих опор, ориентировочно оценивается по значениям коэффициентов передачи  $\gamma_{z0}$  на частоте  $f_{z0}$  с помощью приближенной зависимости

$$d \approx d_{\text{отн.0}} \frac{f_{z0}^2}{\gamma_{z0} \cdot f_z^2} \cdot \frac{\delta}{\pi},$$

где  $d$  – амплитуда колебаний основания в диапазоне частот до 20–25 Гц;

$d_{отн.0}$  – допустимые амплитуды относительных колебаний инструмента и заготовки в результате регулярных колебаний основания;

$f_z$  – минимальная из возможных частот колебаний станка на виброизолирующих опорах;

$\delta$  – логарифмический декремент колебаний опор.

При назначении величин  $d_{отн.0}$  принимается, что высота волн на поверхности детали, обрабатываемой на станках каждого типоразмера данного класса, не должна превышать некоторой доли (например, половины) допуска на отклонение формы (например, на некруглость) деталей, обрабатываемых на станах меньших размеров из данной размерной группы. Известно, что между точностью обработки и шероховатостью поверхности существует определенная зависимость: чем выше качество поверхности, которое можно получить на данном станке, тем меньше должна быть допустимая высота волн независимо от метода обработки. Исходя из этого, допустимые амплитуды относительных колебаний инструмента и заготовки, обусловленные регулярными колебаниями оснований, принимаются численно равными половине среднего арифметического отклонения  $R_a$  профиля для самой низкой шероховатости поверхности, которую можно получить при обработке на данном станке в условиях эксплуатации.

В паспорте станка должны быть приведены:

– заключение завода-изготовителя о возможных способах виброизоляции станка – возможна ли и при каком предельном уровне колебаний основания ( $a$ ) установка производится непосредственно на виброизолирующие опоры, или станок должен быть установлен на дополнительный бетонный блок;

– данные, необходимые для проектирования виброизолированного фундамента, в частности:

а) коэффициенты передачи  $\gamma_{z0}, \gamma_{x0,y0}$  колебаний от станины в зону резания на частотах  $f_{z0}, f_{x0,y0}$  собственных колебаний станка на опорах при такой его установке, при которой проводились испытания; по этим данным определяются допустимые значения амплитуд колебательных ускорений станины  $C_{ст}$  в плоскости направляющих

$$C_{стz} = \frac{d_{отн} \cdot f_{zo}^2}{\gamma_{zo}} \quad \text{и}$$

$$C_{стx,y} = \frac{d_{отн} \cdot f_{xo,yo}^2}{\gamma_{xo,yo}},$$

где  $d_{отн}$  – допустимые амплитуды относительных колебаний инструмента и заготовки;

б) амплитуды колебаний станины, вызываемые работающим приводом, главным образом при реверсах; по этим данным ориентировочно может быть оценена минимально необходимая масса станка вместе с фундаментом, исходя из того, что уменьшение амплитуд колебаний примерно пропорционально увеличению массы.

Кроме того, поскольку возможности виброизолирующей установки в ряде случаев ограничиваются чрезмерными наклонами станка при перемещении тяжелых узлов с обрабатываемыми деталями, в паспорте должна быть указана допустимая величина угла наклона.

Естественно, что если необходимость установки на бетонный блок диктуется требованием обеспечить соответствующую жесткость станины за счет фундамента, это обстоятельство также оговаривается.

При окончательном выборе способа установки станка следует руководствоваться сведениями, которые должны быть приведены в паспорте.

Если указано, что установка станка непосредственно на упругие опоры возможна, и условия, в которых при этом может работать станок, не отличаются от оговоренных, то станок устанавливают на резинометаллические опоры на пол цеха. Качество такой виброизоляции может быть проверено с помощью специального эксперимента. При этом во время обработки на станке возбуждаются импульсные колебания основания броском болванки весом 200 Н с высоты 1 м на расстоянии 0,5 м от передней поверхности и на расстоянии 0,5 м от боковой поверхности станка. Обработанная поверхность аттестуется. При правильной виброизоляции на поверхности детали не должно быть каких-либо дефектов, вызванных импульсными колебаниями основания.

При необходимости установки станка на дополнительный бетонный блок расчет и проектирование виброизоляции производят в соответствии с указаниями, содержащимися в Руководстве по проектированию виброизоляции машин и оборудования (Москва : Стройиздат, 1972) по допустимым значениям ускорений станины, определяемым в зависимости от допустимых амплитуд относительных колебаний инструмента и заготовки. При этом первоначально назначают массу и способ опирания блока в соответствии с общими соображениями и проводят проверочный расчет. Если расчетные значения амплитуд превысят допустимые, то уменьшают жесткость виброизоляторов или увеличивают массу (момент инерции) блока и расчет повторяют.

При окончательно выбранном способе и параметрах виброизоляции для особо точных станков дополнительно оценивается уровень колебаний от возмущений, действующих в станке (от вращения неуравновешенных деталей или оправок с инструментом, от импульсных возмущений при реверсах и т. п.). Для этого используются общие методы расчета колебательных систем станков на вынужденные колебания под действием периодических, импульсных или случайных возмущений.

Суммарный уровень колебаний в зоне резания от всех источников вынужденных колебаний не должен превышать допустимого.

Допустимые амплитуды относительных колебаний инструмента и заготовки назначаются в зависимости от допуска на отклонение формы поверхности детали, обрабатываемой на станке данного класса точности и размера.

Отклонения формы поверхностей деталей, обрабатываемых на станках, регламентируются ГОСТ 24643–81. С уменьшением номинального размера обрабатываемой поверхности значения предельных отклонений формы уменьшаются, поэтому при определении допустимых значений амплитуд относительных колебаний инструмента и заготовки следует исходить из допуска на отклонение формы обрабатываемых деталей меньших размеров.

Для зубообрабатывающих станков допустимые амплитуды относительных колебаний определяются величинами допусков на профиль и направление зуба (ГОСТ 1643–81) в зависимости от степени точности и минимального размера зубчатых колес, обрабатываемых на станке. Для данных расчетов допустимая величина амплитуды относительных колебаний может приниматься равной половине соответствующего допуска.

В тех случаях, когда предельные отклонения формы деталей не оговариваются, или если величина этих отклонений существенно больше высоты  $R_z = (4 \div 5) R_a$  микронеровностей для этого класса чистоты, который должен быть получен на станке, допустимые амплитуды импульсных относительных колебаний инструмента и заготовки целесообразно принимать примерно равными половине величины  $R_z$ .

Если в паспорте станка рекомендуемый способ виброизоляции не указан и перечисленные выше данные, характеризующие станок, не приведены, либо проводят соответствующие измерения дополнительно, либо используют известные общие данные по аналогичным станкам. Естественно, что при этом качество виброизоляции гарантировано быть не может. Общие рекомендации по установке прецизионных станков приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

## Общие рекомендации по установке прецизионных станков

Типы станков	Средства виброизоляции			
	Виброизолирующие опоры	Фундаменты обычного типа и свайные	Фундаменты на резиновых ковриках	Фундаменты на пружинах
1	2	3	4	5
Токарные	Средних размеров с короткими станинами или сплошными основаниями, если на них не производится обработка неуравновешенных деталей	Тяжелые; с длинными нежесткими станинами; станки, на которых производится обработка неуравновешенных деталей	—	—
Координатно-расточные	Средних размеров с жесткими станинами	С нежесткими станинами при невысоком уровне колебаний основания; при среднем уровне колебаний основания и ограниченных габаритах в плане могут использоваться свайные фундаменты	С нежесткими станинами при уровне колебаний выше среднего	—
Алмазно-расточные	Средних размеров с жесткими станинами	С нежесткими станинами	—	—

Продолжение табл. 4.5

1	2	3	4	5
Зубофрезерные	Средних размеров с жесткими станинами	Средних размеров повышенной точности с нежесткими станинами; на свайных фундаментах могут устанавливаться высокоточные станки, в том числе тяжелые, при относительно невысоком уровне колебаний основания	Средних размеров высокоточные с нежесткими станинами; крупные станки	Тяжелые высокоточные станки; мастер-станки
Круглошлифовальные	Средних размеров с жесткими станинами при плавном реверсе перемещающихся узлов	Средних размеров повышенной точности с нежесткими станинами или при резких реверсах; на свайных фундаментах могут устанавливаться высокоточные станки, в том числе тяжелые, при относительно невысоком уровне колебаний основания	Средних размеров высокоточные с нежесткими станинами или при резких реверсах, крупные станки	Тяжелые, в частности, вальцешлифовальные
Плоскошлифовальные	Средних размеров с жесткими станинами при плавном реверсе перемещающихся узлов	С недостаточно жесткими станинами или при резких реверсах	Особо точные	—
Внутришлифовальные	Средних размеров при плавном реверсе перемещающихся узлов	С тяжелыми подвижными узлами, недостаточно жесткими станинами, при резких реверсах при среднем уровне колебаний основания	С тяжелыми подвижными узлами при реверсах при колебаний основания выше среднего	Особо точные крупные

Продолжение табл. 4.5

1	2	3	4	5
Резьбошлифовальные	Средних размеров с жесткими станинами	С длинными нежесткими станинами при относительно невысоком уровне колебаний основания	Высокоточные с длинными нежесткими станинами при уровне колебаний основания выше среднего	—
Зубошлифовальные	С жесткими станинами при плавном реверсе, в частности, станки, работающие абразивным червяком	Повышенной точности с нежесткими станинами или при резких реверсах	Высокоточные с нежесткими станинами или при резких реверсах	—



## 5. УСТАНОВКА И ЗАКРЕПЛЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ

### 5.1. Установка станков на фундамент

#### 5.1.1. Способы установки оборудования

Установка и закрепление механизмов, машин и другого оборудования – важнейшие монтажные работы, от качества выполнения которых во многом зависит их последующая работоспособность.

Оборудование устанавливают на несущие строительные конструкции, которые разделяют на *фундаменты* (перекрытия, промышленный пол) и *опорные металлоконструкции*.

Работы по установке оборудования включают подготовку фундаментов и опорных элементов к монтажу, установку, выверку, подливку и окончательное закрепление корпусных деталей и станин. Трудоемкость работ, связанных с установкой и закреплением технологического оборудования, составляет 50% общей трудоемкости его монтажа. Особенности выполнения отдельных операций при этом зависят от назначения монтируемого оборудования, его конструкции, типа фундаментов, требований к точности монтажа, выбранных баз, способов закрепления и установки, а также применяемых опорных элементов.

Варианты установки машин и оборудования различают по характеру связи с фундаментом (с креплением, без крепления и с виброизоляцией), по конструкции стыка «корпусная деталь – фундамент» (с *местным опиранием* на пакеты подкладок, специальные опорные башмаки, бетонные опоры и непосредственно на фундамент; со *сплошным опиранием* на бетонную подливку, виброизолирующий слой или непосредственно на фундамент; со *смешанным опиранием* на опорные элементы, затянутые при выверке, и на подливку, осуществляемую после окончательного закрепления оборудования (рис. 5.1).

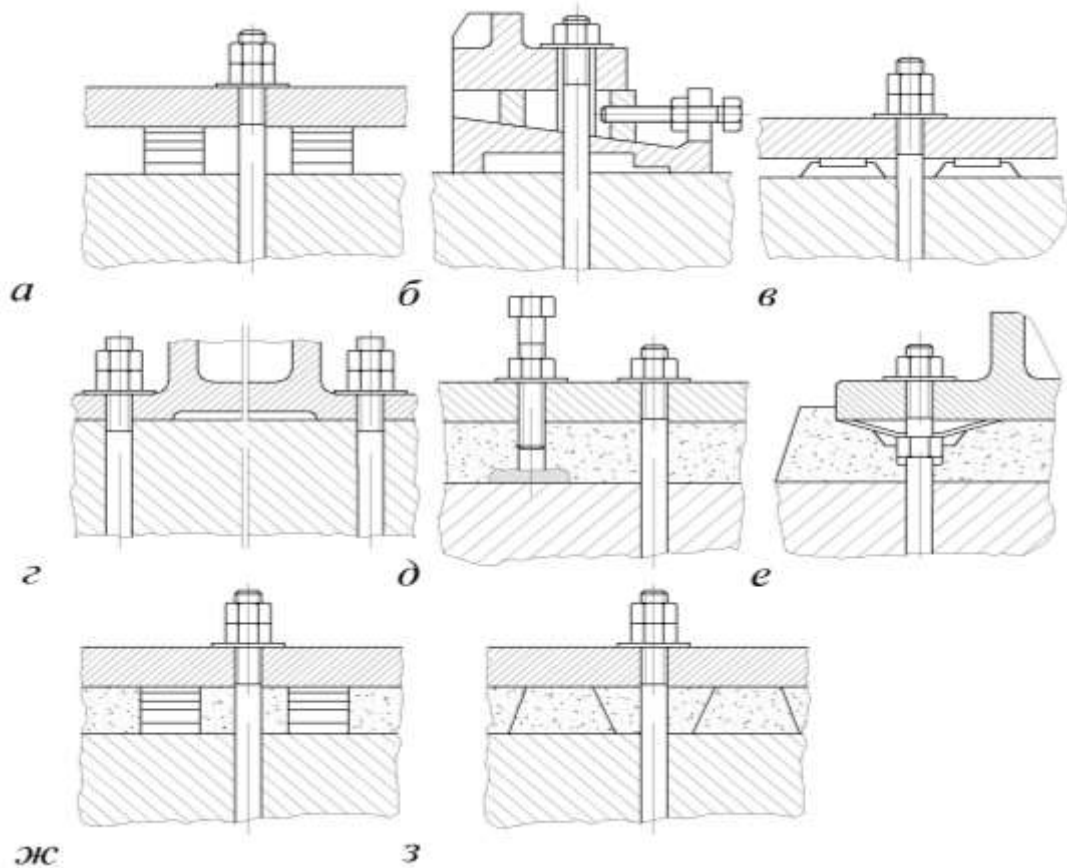


Рис. 5.1. Основные конструкции стыка корпусная деталь – фундамент: с местным опиранием на пакеты подкладок (*а*), на опорные башмаки (*б*), на бетонные опоры (*в*) и непосредственно на фундамент (*г*); со сплошным опиранием на бетонную подливку с временной установкой при выверке на отжимных винтах (*д*) и на установочный гайках (*е*) со смешанным опиранием на подливку и опорные элементы (*ж*, *з*)

С местным опиранием устанавливают машины и механизмы, требующие частой регулировки положения и перестановок. Со сплошным опиранием на бетонную подливку устанавливают машины и механизмы, требующие повышенной надежности и жесткости закрепления. Со смешанным опиранием устанавливают оборудование, требующее окончательного закрепления до подливки, например вертикальные аппараты. В этом случае работоспособность соединения понижается, так как подкладки имеют большую податливость, а подливка работает только в сжатой зоне стыка.

В большинстве случаев закрепление промышленного оборудования осуществляют с помощью фундаментных болтов. Иногда приме-

няют крепление обычными болтами или шпильками к закладным деталям различной конструкции. К лагам или силовым полам крепят часто переставляемое оборудование. Иногда простое малонагруженное оборудование с опорными частями, выполненными из сварных металлоконструкций, закрепляют путем их заливки в бетон. При установке легкого оборудования на фундаменты или полы с химически стойкими покрытиями применяют приклеивание эпоксидными составами специальных крепежных узлов или непосредственно опорной поверхности корпусных деталей (рис. 5.2).

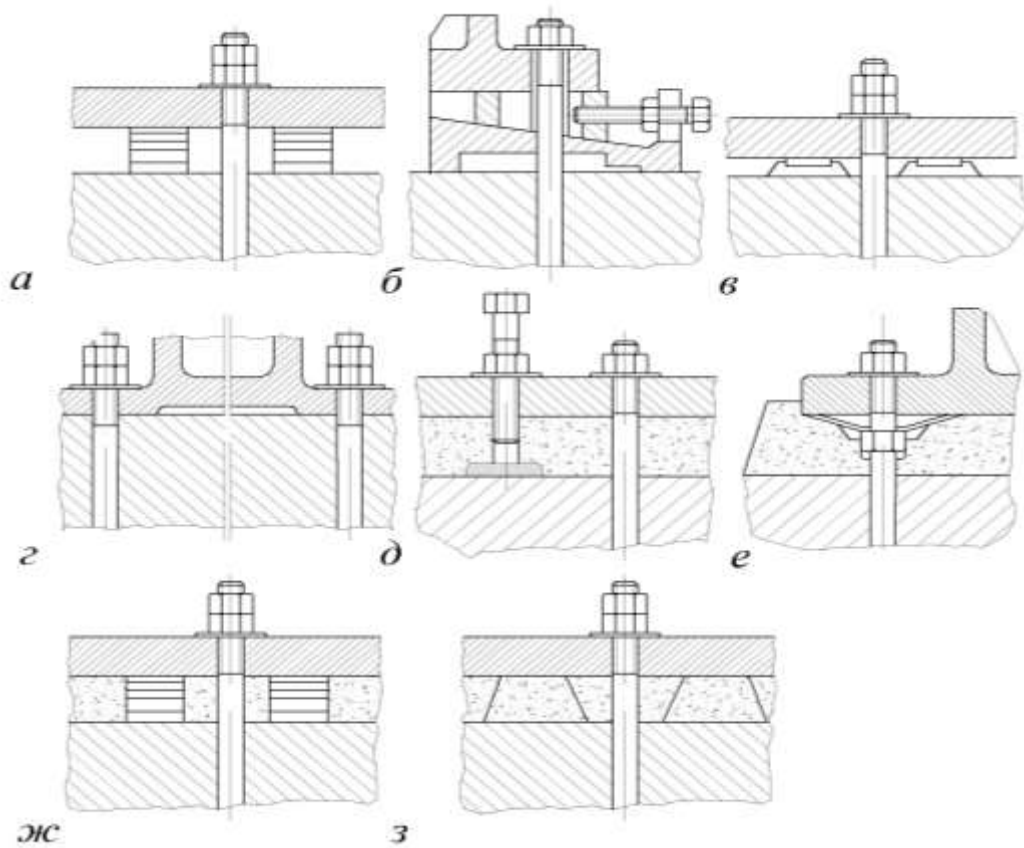


Рис. 5.2. Способы крепления оборудования: *а, б* – к специальным закладным деталям; *в, г* – к лагам; *д* – к силовому полу; *е* – приклеиванием крепежного узла; *ж* – приклеиванием опорной поверхности через вибропоглощающую прокладку; *з* – непосредственно приклеиванием опорной поверхности

### 5.1.2. Установка фундаментных болтов

Фундаментные болты для крепления технологического оборудования различают по условиям эксплуатации и назначению, конструк-

ции, способам установки и закрепления в фундаменте. Конструктивные (малонагруженные) болты служат для фиксации оборудования на фундаментах, повышения жесткости корпусных деталей и для предотвращения их смещения под действием случайных нагрузок. Расчетные (силовые) болты воспринимают нагрузки, которые возникают при работе оборудования.

По конструктивному решению болты подразделяются на типы (рис. 5.3):

- 1 – изогнутые;
- 2 – с анкерной плитой;
- 3 – составные;
- 4 – съемные;
- 5 – прямые;
- 6 – с коническим концом.

По способу установки в фундамент болты подразделяются на устанавливаемые до бетонирования фундаментов и устанавливаемые на готовые фундаменты в колодцы или скважины.

К болтам, устанавливаемым до бетонирования фундаментов, относятся (рис. 5.3):

- изогнутые (тип 1, исполнение 1);
- с анкерной плитой (тип 2);
- составные (тип 3);
- съемные (тип 4).

Примечание: При установке съемных болтов в массив фундамента закладывается только анкерная арматура, а шпилька устанавливается свободно в трубе после устройства фундамента.

К болтам, устанавливаемым на готовые фундаменты в колодцы или скважины, относятся:

- изогнутые (тип 1, исполнение 2);
- прямые (тип 5);
- с коническим концом (тип 6).

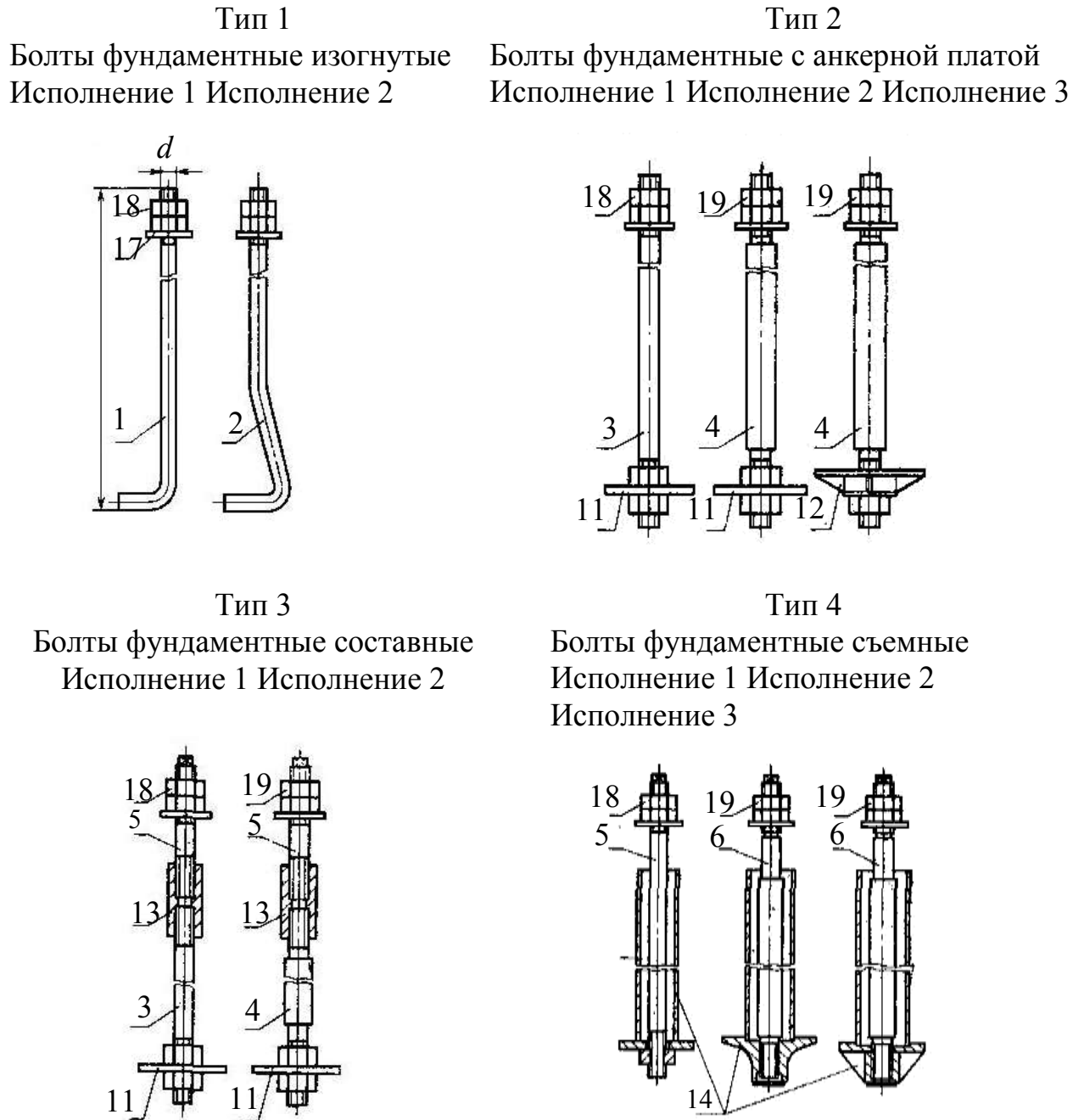


Рис. 5.3. Типы и конструкции фундаментных болтов.  
Размеры для справок: 1–10 – шпилька; 11, 12 – плитка анкерная; 13 – муфта; 14 – анкерная арматура; 15 – цанга разжимная; 16 – втулка коническая; 17 – шайба; 18 – гайка по ГОСТ 5915–70; 19 – гайка по ГОСТ 10605–72

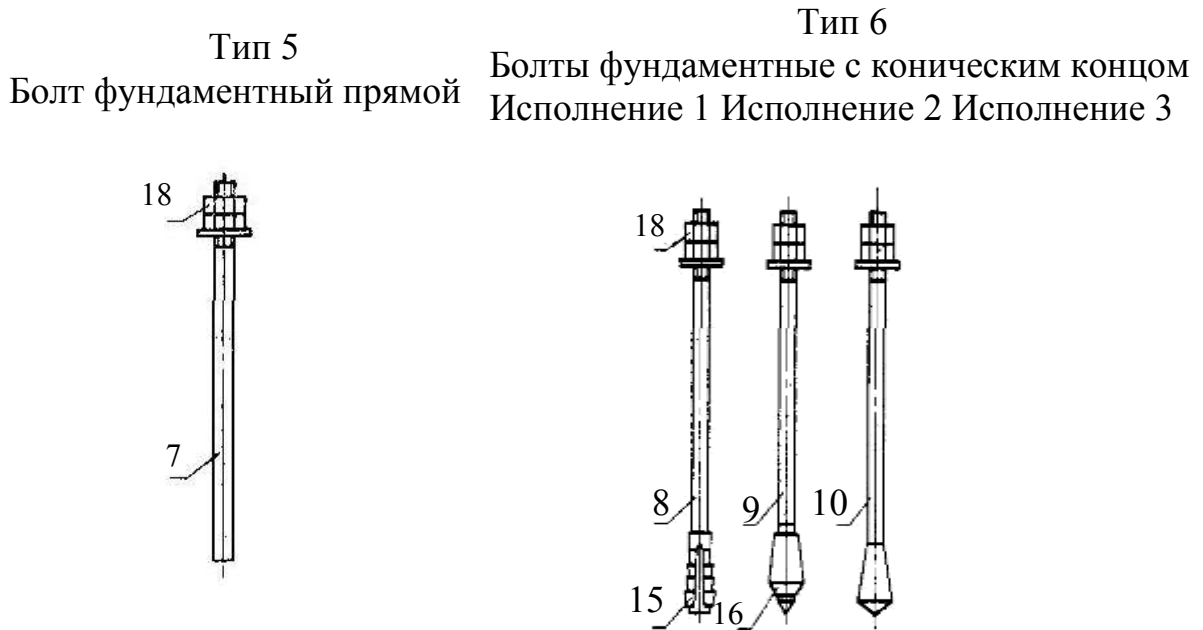


Рис. 5.3. Продолжение

Примечание: Болты типа 1 исполнения 2 устанавливаются в колодцы, заранее предусмотренные в фундаментах, а болты типов 5 и 6 – в скважины, просверленные в готовых фундаментах механизированным инструментом.

По способу закрепления в бетоне фундамента болты подразделяются:

- на закрепляемые непосредственным взаимодействием элементов (шпилек или анкерных плит) болтов с бетоном фундаментов (типы 1–4);
- на закрепляемые с помощью эпоксидного или силикоанового клея, а также цементно-песчаных смесей (типы 5 и 6, исполнения 2 и 3), закрепляемые с помощью разжимных цанг (тип 6, исполнение 1).

По условиям эксплуатации болты подразделяются на расчетные и конструктивные.

К расчетным относятся болты, воспринимающие нагрузки, возникающие при эксплуатации строительных конструкций или при работе оборудования.

К конструктивным относятся болты, предусматриваемые для крепления строительных конструкций и оборудования, устойчивость которых против опрокидывания или сдвига обеспечивается собственным весом конструкций или оборудования.

Конструктивные болты предназначены для рихтовки строительных конструкций и оборудования во время их монтажа и для обеспечения стабильной работы конструкций и оборудования во время эксплуатации, а также для предотвращения их случайных смещений.

Болты должны изготавливаться в соответствии с требованиями ГОСТ 23379.1–80.

Конструкция и основные размеры болтов согласно ГОСТ 23379.1–80 приведены на рис. 5.3 и в табл. 5.1.

Таблица 5.1

## Основные размеры фундаментных болтов

Тип болта	Исполнение	Наименование болта	Номинальный диаметр резьбы, мм
1	2	3	4
1	1	Болты фундаментные изогнутые	12–48
	2		
2	1	Болты фундаментные с анкерной плитой	16–48
	2		56–90
	3		100–140
3	1	Болты фундаментные составные	24–48
	2		56–64
4	1	Болты фундаментные съемные	24–48
	2		56–125
	3		56–100
5	–	Болты фундаментные прямые	12–48
6	1	Болты фундаментные с коническим концом	12–48
	2		
	3		

Конструкции и размеры шпилек приведены на рис. 5.4 и в литературе [1].

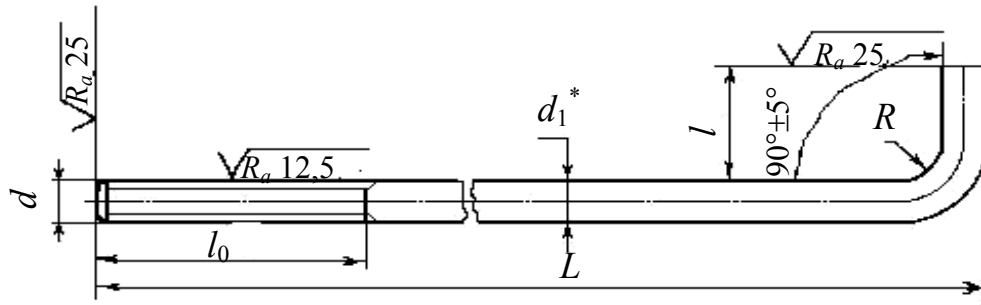
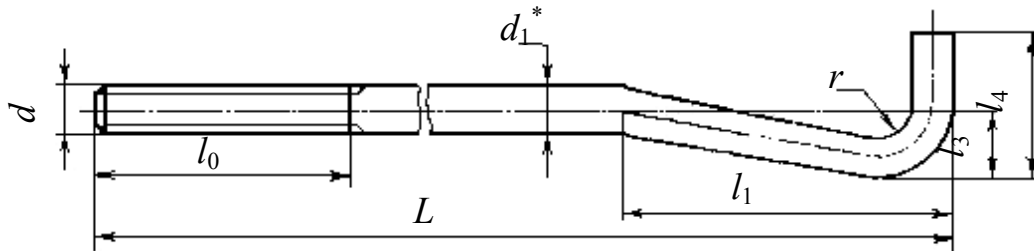
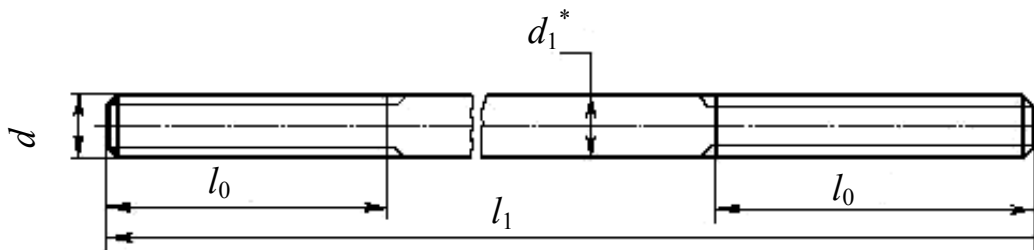
Поз. 1 ( $d = 12-48$  мм)Поз. 2 ( $d = 12-48$  мм)Поз. 3 ( $d = 16-48$  мм)

Рис. 5.4. Конструкции и размеры шпилек



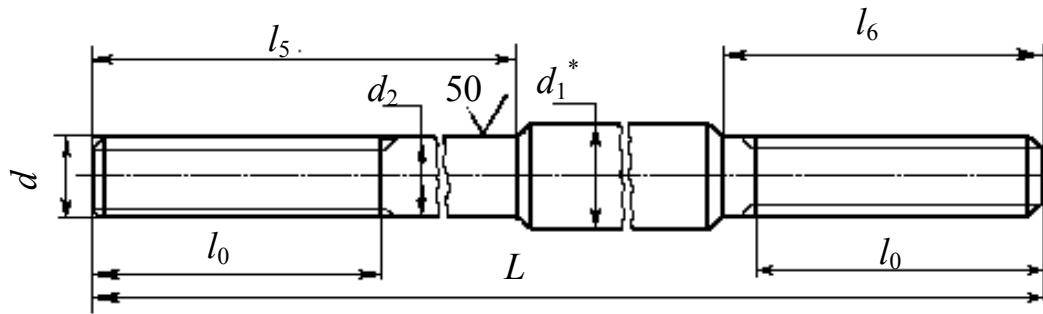
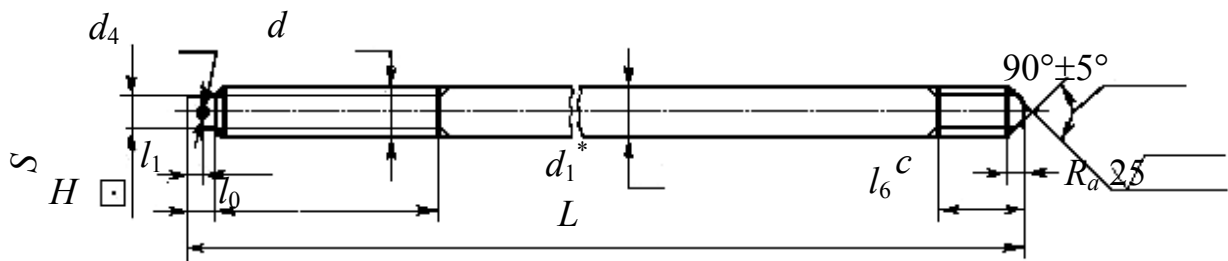
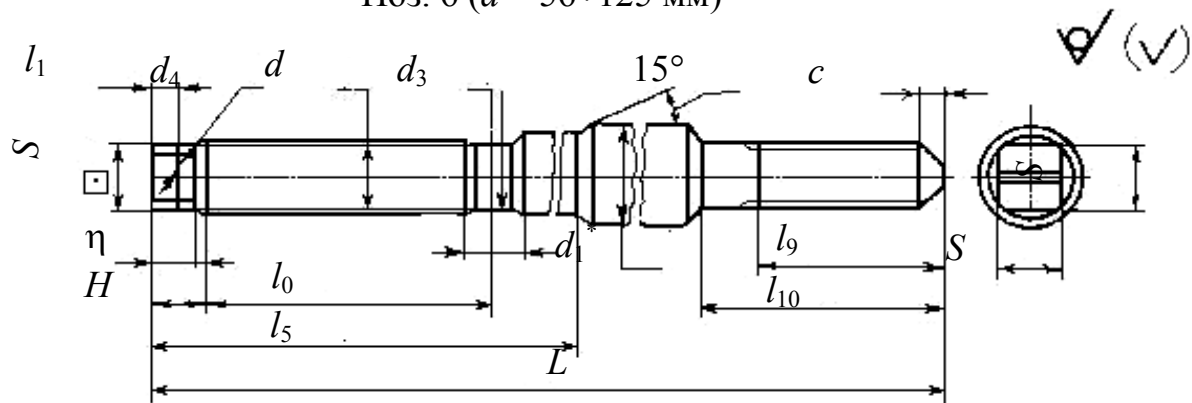
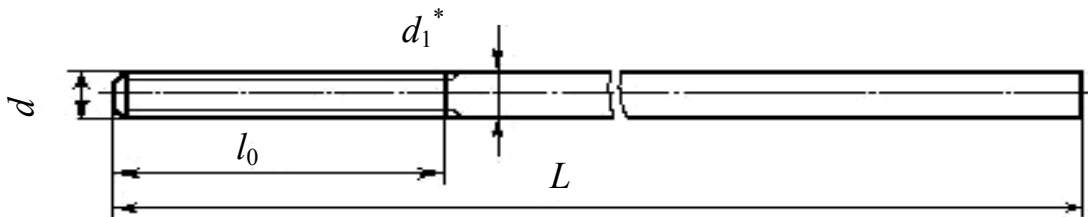
Поз. 4 ( $d = 56 \div 140$  мм)Поз. 5 ( $d = 24 \div 64$  мм)Поз. 6 ( $d = 56 \div 125$  мм)Поз. 7 ( $d = 12 \div 48$  мм)

Рис. 5.4. Продолжение

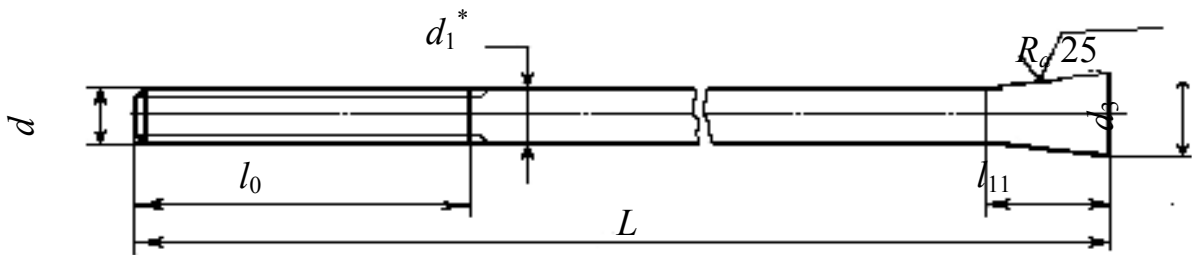
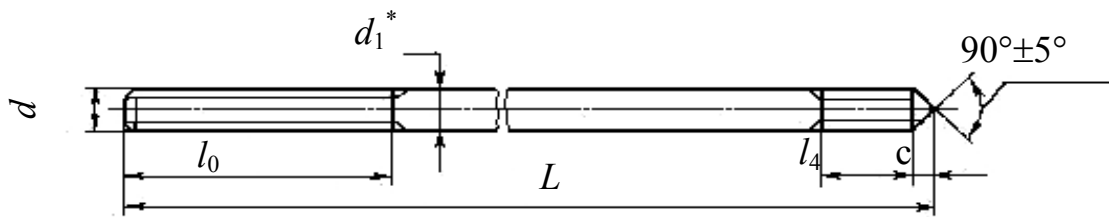
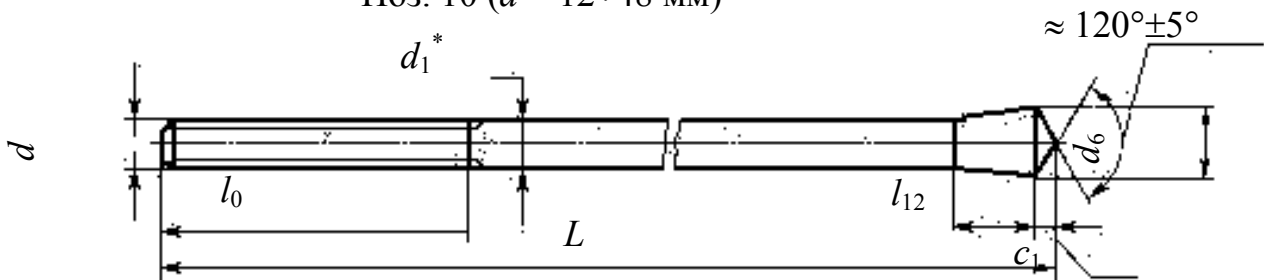
Поз. 8 ( $d = 12 \div 48$  мм)Поз. 9 ( $d = 12 \div 48$  мм)Поз. 10 ( $d = 12 \div 48$  мм)

Рис. 5.4. Продолжение

Длина болтов  $L$  и диаметр резьбы  $d$  назначаются в зависимости от длины шпилек и метра их резьбы.

Пример условного обозначения болта типа 1, исполнения 1, диаметром резьбы  $d = 20$  мм, длиной  $L = 800$  мм, со шпилькой из стали марки ВСт3пс2:

БОЛТ 1.1.М20×80. ВСт3пс2 ГОСТ 24379.1–80.

То же, болта типа 4, исполнения 2, диаметром резьбы  $d = 100$  мм, с мелким шагом резьбы 6 длиной  $L = 1900$  мм, со шпилькой из стали марки 09Г2С–6:

БОЛТ 4.2.М100×6×1900 09Г2С–6 ГОСТ 24379.1–80.

Общие технические условия – по ГОСТ 24379.0–8

Пример условного обозначения шпильки поз. 1, диаметром резьбы  $d = 20$  мм, длиной  $L = 800$  мм, из стали марки ВСтЗпс2:

ШПИЛЬКА 1. М20×800 ВСтЗпс2 ГОСТ 24379.1–80.

То же, поз. 4, диаметром резьбы  $d = 100$  мм, с мелким шагом резьбы 6 мм, длиной  $L = 3150$  мм из стали марки 09Г2С–6:

ШПИЛЬКА 4. М100×6×3150.09Г2С–6 ГОСТ 24379.1–80.

Предельные отклонения размеров – по СТ СЭВ 144–75 и СТ СЭВ, 177–75.

Резьба – по СТ СЭВ 182–75, поле допуска 8g – по ГОСТ 16093–70.

Размеры сбегов резьбы и фасок – по ГОСТ 10549–80.

Длина шпилек  $L$  (кроме поз. 5 и 6) и их теоретическая масса приведены в ГОСТ 24379.1–80. Для шпилек (поз. 5 и 6) длина и теоретическая масса указываются в рабочих чертежах.

Допускается по соглашению между потребителем и предприятием-изготовителем изготовление шпилек другой длины.

Конструкции и размеры анкерных плит, муфт, анкерной арматуры, втулок, заглушек, разжимных цанг, конических втулок, шайб приведены в ГОСТ 24379.1–80.

К основным установочным и конструктивным параметрам болтов относятся: глубина заложения  $H$ , длина  $L$  болта, диаметр  $d$  резьбы, длина  $l_0$  резьбы, диаметр стержня  $d_1$ , длина  $l$  изогнутой части, диаметр или сторона  $A$  анкерной плиты, размер  $S$  под ключ, диаметр  $d_0$  отверстия в фундаменте, высота  $h$  конуса.

В зависимости от конструкции болты устанавливаются на кондукторах до бетонирования фундаментов (рис 5.5, а, в–д); в колодцах, оставляемых при бетонировании (рис. 5.5, б), и в скважинах (отверстиях), пробуриваемых в готовых фундаментах, перекрытиях или полу цеха (рис. 5.6 и 5.7). Наиболее перспективно применение болтов, устанавливаемых в пробуриваемых скважинах (отверстиях). Этим способом устанавливают прямые болты, закрепляемые в фундаменте с применением клея различного типа и цементной зачеканки, а также болты распорного типа. Прямые болты не имеют специальных анкерующих устройств, поэтому менее надежны в эксплуатации по сравнению с другими и требуют тщательного соблюдения технологии установки. Болты распорного типа (рис. 5.7) обладают более высокой надежностью и простотой установки, хотя и сложнее по конструкции. Применение болтов распорного типа, обладающих малой глубиной заложения, в случаях, когда размеры фундаментов определяются длиной болтов,

позволяет устанавливать оборудование без фундаментов с креплением непосредственно на перекрытиях или полу цеха.

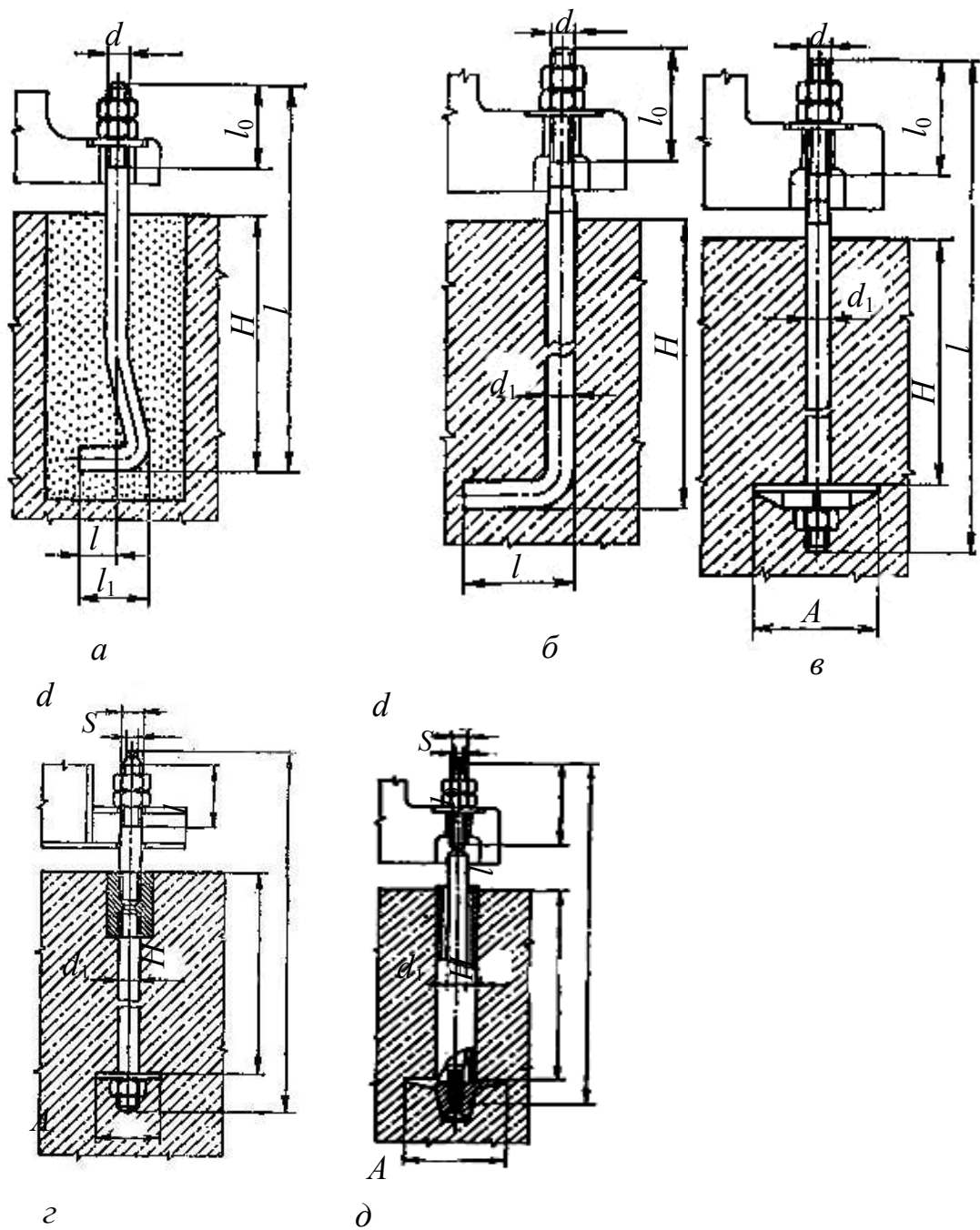


Рис. 5.5. Фундаментальные болты: *а* и *б* – изогнутые; *в* – с анкерной плитой; *г* – составные; *д* – съемные

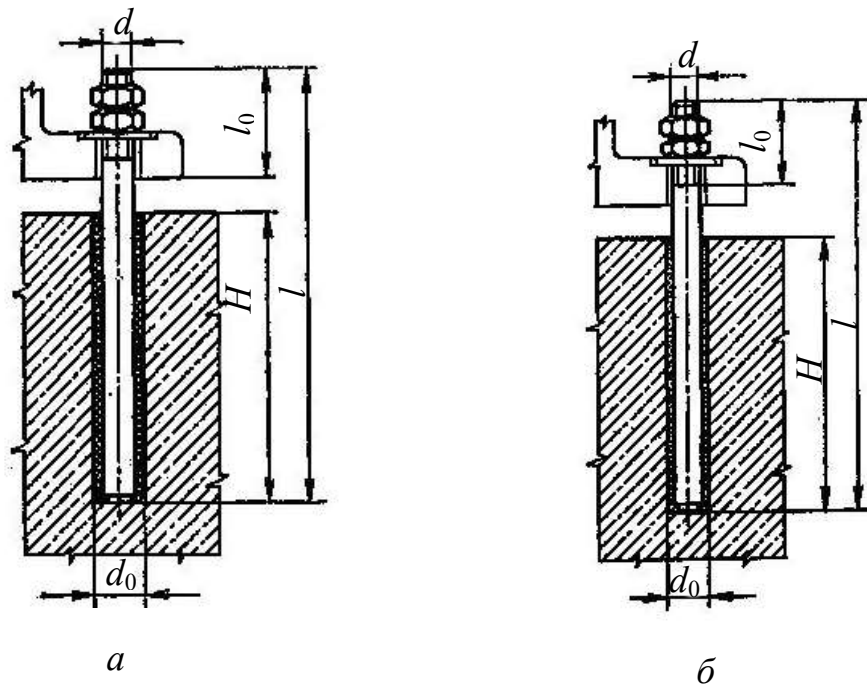


Рис. 5.6. Фундаментальные прямые болты, устанавливаемые:  
*a* – на клею; *б* – виброзачеканкой

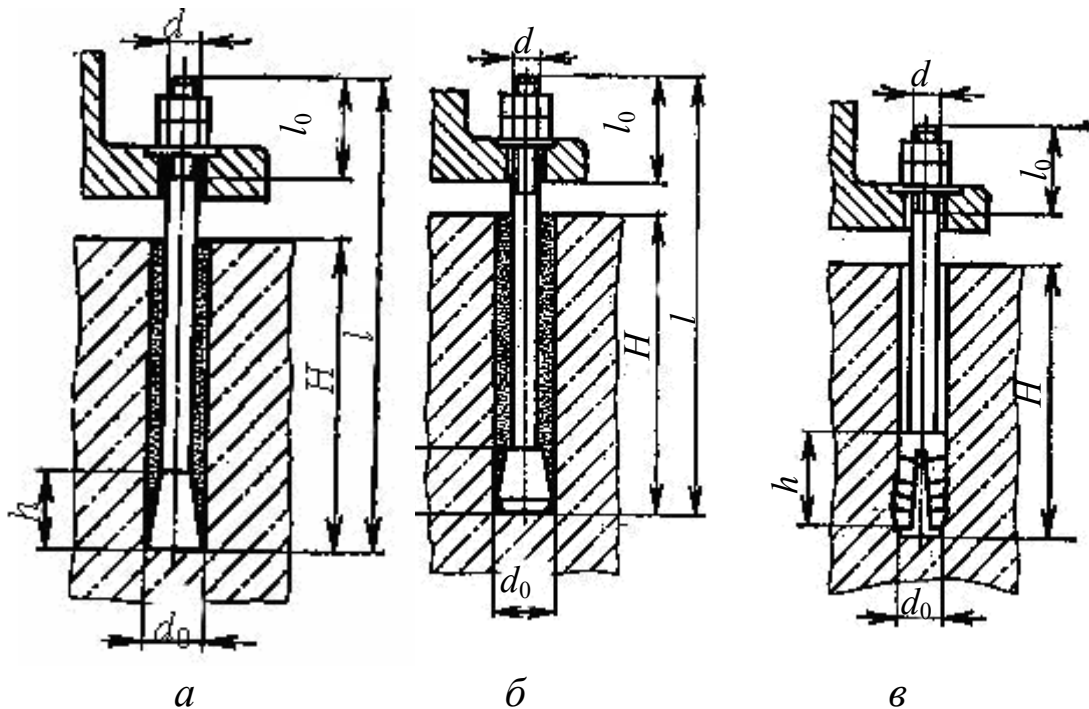


Рис. 5.7. Фундаментные болты распорного типа:  
*a* – конические с цементной зачеканкой; *б* – конические, устанавливаемые вибропогружением; *в* – конические с разжимными цапгами (самоанкерующиеся); *г* – составные с распорным конусом; *д* – дюбель-штуки; *е* – дюбели анкерные распорные

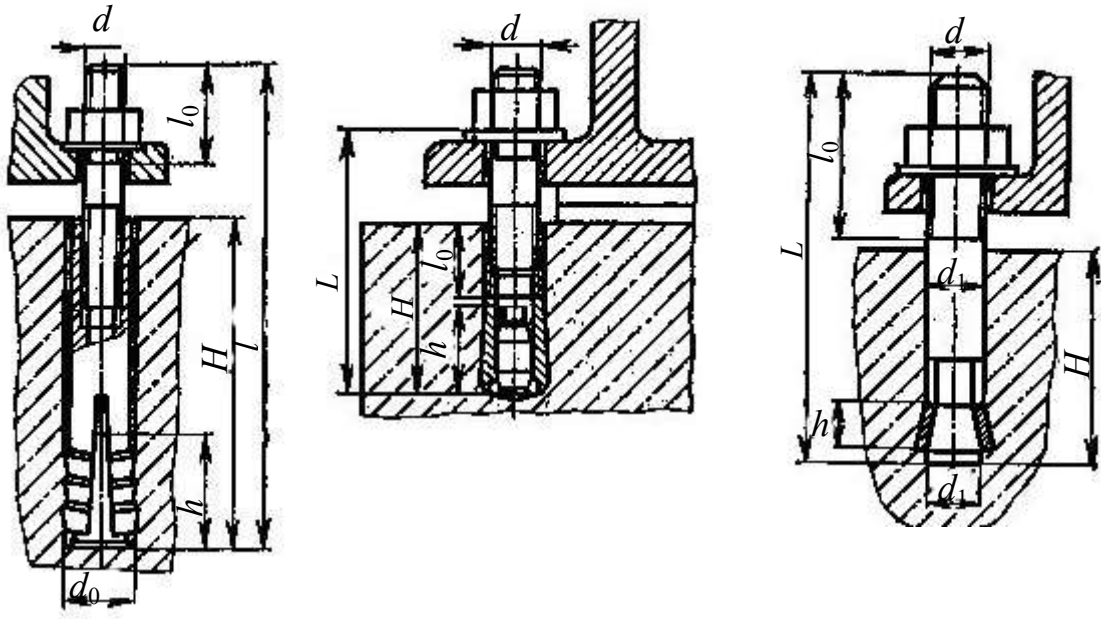


Рис. 5.7. Продолжение

Установку болтов осуществляют в соответствии со специально разработанным планом их расположения.

#### 5.1.2.1. Установка на кондукторах

Глухие болты: изогнутые, с анкерными плитами и составные, а также анкерную арматуру съемных болтов устанавливают в монолитные фундаменты до их бетонирования с помощью специальных монтажных приспособлений, обеспечивающих надежную фиксацию болтов и арматуры в проектом положении на период укладки и твердения бетона фундамента. Поддерживающие устройства служат для фиксации кондукторов в требуемом положении, а кондукторы – для размещения болтов в соответствии с осями отверстий в корпусных деталях машин, закрепляемых на данном фундаменте.

Поддерживающие устройства (каркас) собирают из типовых стоек и прогонов (продольных и поперечных балок), которые имеют одинаковую конструкцию для всех фундаментов цеха. Стойки различаются только высотой, а прогоны – длиной. Высоту стоек назначают на 200–300 мм меньше разницы высотных отметок бетонной подготовки фундамента и его поверхности. Длину продольных и поперечных балок каркаса определяют исходя из размеров опорного контура монтируемого оборудования.

Стойки крепят к закладным пластинам, залитым в специальные опоры, которые изготавливают одновременно с бетонной подготовкой фундамента (рис. 5.8). На стойках предусматривают узлы крепления балок каркаса, опалубки и настила.

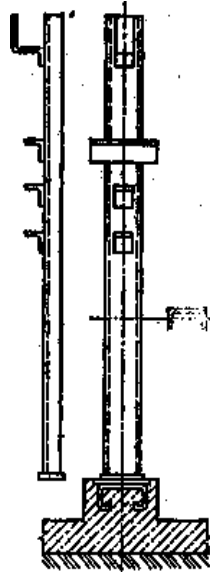


Рис. 5.8. Стойка каркаса, поддерживающего устройства

К стойкам на проектной высоте приваривают балки каркаса. Для повышения жесткости каркас скрепляют диагональными связями. На верхних балках каркаса располагают кондукторы (рис. 5.9). Конструкция кондуктора определяется числом и расположением устанавливаемых фундаментных болтов. Отверстия в кондукторах изготавливают с такими же допусками расположения, как и в корпусных деталях. Диаметр отверстий в кондукторе должен быть больше диаметра болтов с резьбой до М48 на 1 мм, а для болтов с резьбой М56 и более – на 2 мм. Аналогично изготавливают кондукторы для фиксации анкерной арматуры, коробок и пробок для образования колодцев под болты или шанцев.

Положение кондуктора в плане на балках каркаса выверяют геодезическими методами и фиксируют сваркой. После этого в кондукторе устанавливают и закрепляют болты, пробки и анкерную арматуру.

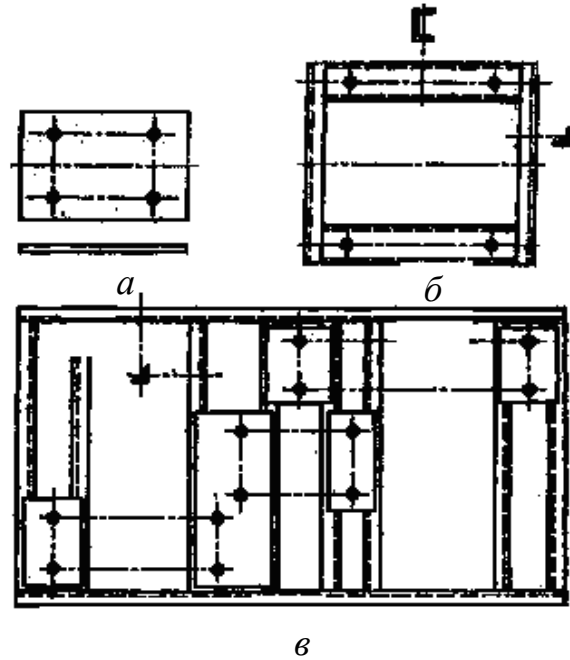


Рис. 5.9. Кондукторы для фундаментных болтов: *а* – листовой; *б* – на сортовой стали; *в* – комбинированный

При расположении глухих болтов с отгибами у края фундамента отогнутый конец болта необходимо ориентировать в сторону массива, а при расположении в углах – по их биссектрисе.

Нижние концы болтов, расположенные в местах пустот фундамента (проемов, тоннелей и др.), допускается выполнять с отгибом.

Для глухих болтов в фундаментах предусматривают специальные шанцы, предназначенные для исправления положения болтов в плане после бетонирования фундамента путем их изгиба.

Детали, установленные в кондукторе, с целью предотвращения их отклонений от вертикального положения, при бетонировании соединяют поперечными связями из мелкосортного проката.

На изготовление поддерживающих устройств и кондукторов расходуется значительное количество сортового проката – в среднем до 30 кг на один болт. Для уменьшения расхода металла применяют метод установки фундаментных болтов на поддерживающих устройствах с укороченными стойками и съемные кондукторы. При установке болтов в простые фундамента поддерживающие устройства не изготавливают, а кондукторы прикрепляют к опалубке или к арматуре.

При монтаже оборудования, опорные части которого стандартизованы, например химических аппаратов колонного типа, рекомендуется



применять групповую установку болтов, с помощью унифицированных кондукторов. Диаметр отверстий  $d_0$  под болты назначают на 2 мм больше диаметра болтов.

Плазово-блочный метод применяют при большом числе фундаментных болтов (свыше 500), устанавливаемых в цехе, с целью индустриализации их изготовления и монтажа блоками. Применение такого метода позволяет перенести изготовление блоков фундаментных болтов со строительной площадки в заготовительные мастерские или на заводы монтажных заготовок. Блоки собирают на специальных стендах, оборудованных плазом, т. е. дощатым щитом с наклеенным на него чертежом плана расположения болтов, выполненным в натуральную величину. Блоки (рис. 5.10) состоят из группы болтов 1, приваренных к базовой опорной балке 2 и связанных между собой продольными и поперечными связями 3 в жесткий каркас. Продольные и поперечные стороны блока образуют ферму. Размеры  $a$ ,  $l$ ,  $l_1$ ,  $l_2$  называют, исходя из расположения болтов, а размер  $b$  – из условия закрепления блока на опорных конструкциях. При длине блока  $L$  до 1 м высоту фермы  $m$  принимают равной 300 мм и диагональную связь не ставят; при длине блока до 2 м высоту  $m$  принимают равной 400 мм и ставят одну диагональную связь, а при длине блока до 3 м высоту  $m$  принимают равной 450–500 мм и ставят две диагональные связи. При длине болтов  $L = 2$  м высоту  $m$  назначают равной 1 м. Перепад высотных отметок торцов фундаментных болтов  $\Delta z = z_2 - z_1$  в одном блоке не должен превышать 500 мм. На чертежах блоков указывают высотные отметки торцов фундаментных болтов, которые назначают в соответствии с планом расположения болтов. Верхняя балка продольной стороны блока является базовой. На чертежах указывают высотную отметку  $h$  ее нижней стороны, а остальные размеры дают от этой отметки. Базовые балки выступают за габарит блока на 150–800 мм. Все элементы обвязки болтов в блоки выполняют из круглого стального проката диаметром 8–10 мм, а базовые балки из труб.

Опорные конструкции блоков выполняют в виде П-образных стоек, связанных сверху опорными балками, а внизу стержнями.

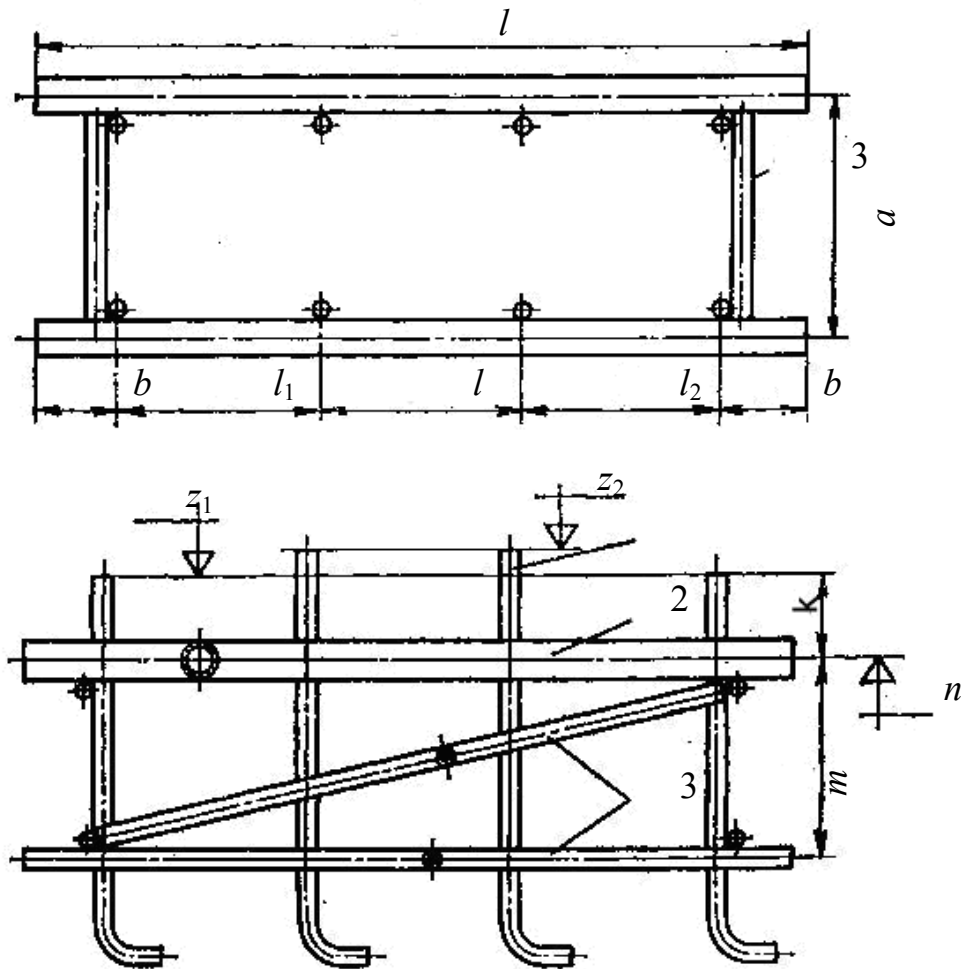


Рис. 5.10. Блок фундаментных болтов

При разработке плазового чертежа (рис. 5.11) на полотнище миллиметровой бумаги, размер которого соответствует самому большому блоку болтов, наносят оси  $X$  и  $Y$ , а также намечают все места расположения болтов (центры отверстий под них) с допуском  $\pm 1$  мм относительно рабочих осей.

Затем на этом же чертеже отмечают места расположения болтов в следующем блоке и т. д. в пределах одной монтажной схемы. Стенд для сборки блоков состоит из металлической рамы, установленной на стойках высотой 2–2,5 м, на которую уложен плаз с просверленными отверстиями под болты. Болты каждого блока подают под стенд, заводят в отверстия и крепят сверху гайками. У болтов с одинаковыми высотными отметками гайки навинчивают в уровень с их торцом. При разности высотных отметок под гайки устанавливают соответствующие им

дистанционные трубки. Болты балками и связями соединяют в блок сваркой. После этого отвинчивают гайки и опускают блок под щит.

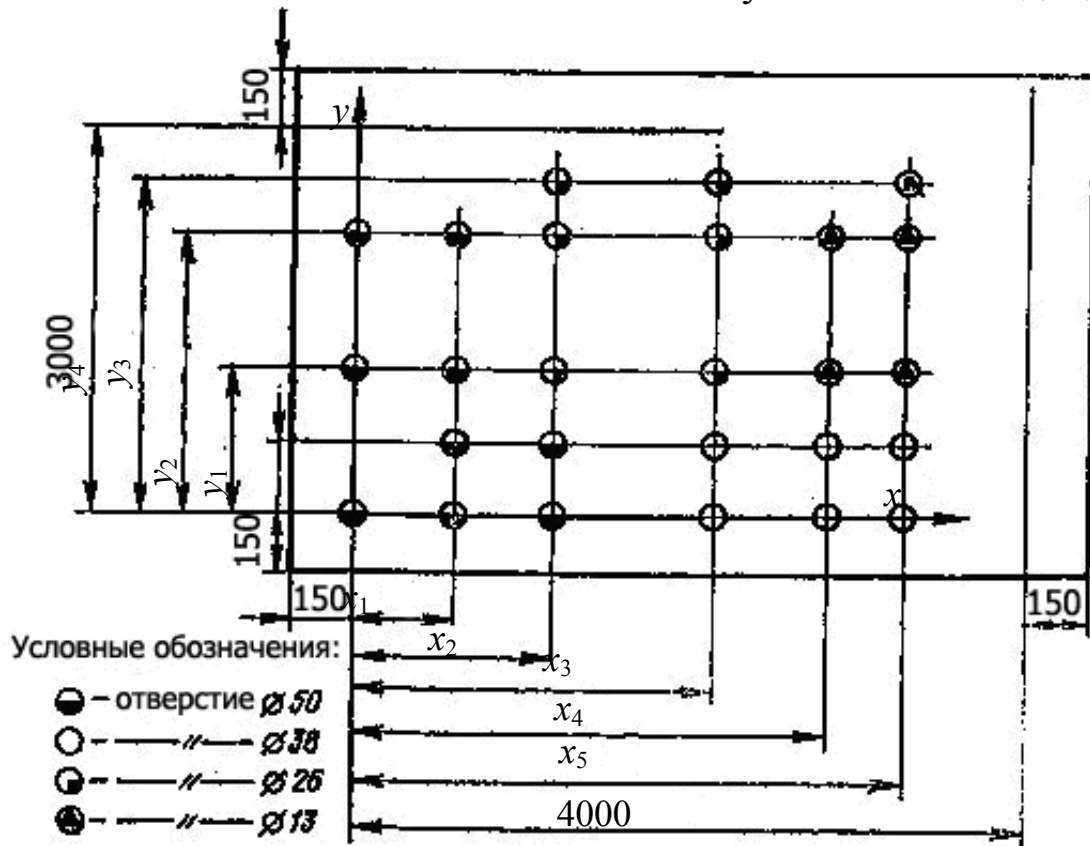


Рис. 5.11. Плазовый чертеж

Опорные конструкции блоков доставляют на место монтажа и устанавливают на бетонную подготовку фундамента. Соответствие положения опорных конструкций монтажной схеме тщательно проверяют. Блоки устанавливают на опорные конструкции базовыми опорными балками. Положение блока контролируется по двум диагонально расположенным и наиболее удаленным болтам, после чего блок приваривают к опорным балкам.

#### 5.1.2.2. Установка в скважины

Установку в скважины, пробуренные в готовых фундаментах, применяют для болтов прямых, конических с цементной зачеканкой и с вибропогружением, болтов с разрезными и разжимными цангами, а также составных с распорным конусом и дюбелей-штуков. Применение таких болтов, обладающих небольшой глубиной заложения  $H = (4 \div 8)d$ , позволяет не только устанавливать и закреплять оборудование на желе-

зобетонных перекрытиях промышленных зданий или непосредственно на полу цеха, но и дает возможность избежать изготовления металлоемких дорогостоящих кондукторов и поддерживающих устройств. При этом повышается точность установки болтов, что упрощает выверку оборудования.

Скважины под болты изготавливают с помощью станков для сверления, оснащенных алмазными кольцевыми сверлами. При небольших диаметрах (до 60 мм) более эффективно применять перфораторы и машины ударно-вращательного бурения со специальным рабочим инструментом: буровыми коронками, шнековыми бурами и спиральными сверлами с твердосплавными вставками. Буровые коронки и буры могут перетачиваться до диаметра на 4–6 мм меньше номинального. Диаметры скважин под болты различных конструкций приведены в табл. 5.4. При жестких допусках на диаметр отверстия преимущественно применяют сверление алмазными сверлами.

Разметку мест установки болтов осуществляют:

- а) методами геодезической разбивки; при этом рекомендуется оси оборудования и оси отверстий намечать керном по масляной краске;
- б) по шаблону (снятого с анкер-плана) или опорной части оборудования с использованием его как кондуктора;
- в) путем предварительной установки оборудования с кернением мест расположения болтов через отверстия в станине.

Разметка отверстий должна проводиться в соответствии с размерами на чертежах.

При ударно-вращательном бурении электроперфораторами с применением спиральных сверл их хвостовики должны быть переточены под патрон механизированного инструмента. При этом рекомендуется применять сверла с пластинами из твердого сплава типа ВК6 и ВК15.

Для образования скважин диаметром более 60 мм пневмоперфораторами бурение может проводиться в два этапа. Сначала просверливается скважина диаметром 20–40 мм, а затем скважина требуемого диаметра.

Таблица 5.4

## Диаметры (мм) скважин для установки фундаментных болтов

Диаметр резьбы болта, мм	Болты													
	прямые на клее		конические						составные с распор- ным кону- сом		дюбели			
			с вибропогруже- нием		с разрезной цангой		с распорной цангой				втулки		анкерные распорные	
диаметр	откло- нения	диаметр	откло- нения	диаметр	откло- нения	диаметр	откло- нения	диаметр	откло- нения	диаметр	откло- нения	диаметр	откло- нения	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5
M6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	8	+0,25	6	0,25
M8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	10	+0,3	8	0,3
M10	16	3	–	–	–	–	–	–	4	+05	12	+0,3	0	0,3
M12	18	3	25 (20)	–2+10	20	±0,2	16	+1	6	+1	15	+0,3	2	0,3
M16	22	4	36 (27)	–3+10	25	±0,2	22	+1	2	+1	20	+0,35	6	0,35
M20	26	4	46 (33)	–3+10	35	±0,2	28	+1	28	+1	35	+0,35	–	–
M24	34	4	52 (40)	–5+15	40	±0,3	32	+1,5	32	+1	–	–	–	–
M30	40	6	60 (43)	–5+15	50	±0,5	40	+1,5	–	–	–	–	–	–

Продолжение табл. 5.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
M36	46	6	80 (60)	-10 +20	60	±0,5	50	+3	–	–	–	–	–	–
M42	52	6	90 (63)	-10 +20	70	±0,5	60	+3	–	–	–	–	–	–
M48	58	6	100 (79)	-10 +20	80	±	68	+3	–	–	–	–	–	–

<sup>1</sup> Фактические отклонения при бурении перфораторами с применением рабочего инструмента номинального диаметра не превышают указанных допускаемых величин.

Ударно-вращательное бурение скважин в железобетоне с верхним армированием при необходимости может осуществляться с перерезкой арматуры с помощью кислородно-ацетиленовых резаков.

Установку болтов на клею, на цементных и цементно-песчаных смесях осуществляет строительная организация.

Конические болты с вибропогружением устанавливаются в скважины, заполненные цементной или цементно-песчаной смесью, внедряя их с помощью механизированного инструмента ударно-вращательного действия, оснащенного специальным переходником для захвата резьбы болта, или вручную легким постукиванием молотком.

Конические болты с распорными втулками или разрезными цангами устанавливаются в скважинах с помощью монтажных оправок, легким ударом слегка осаживая втулки или цанги на конусе (рис. 5.12). Так как эти болты являются самоанкерующимися и их расклинивание происходит в процессе затяжки, то при установке требуется обеспечить лишь первоначальное зацепление цанг.

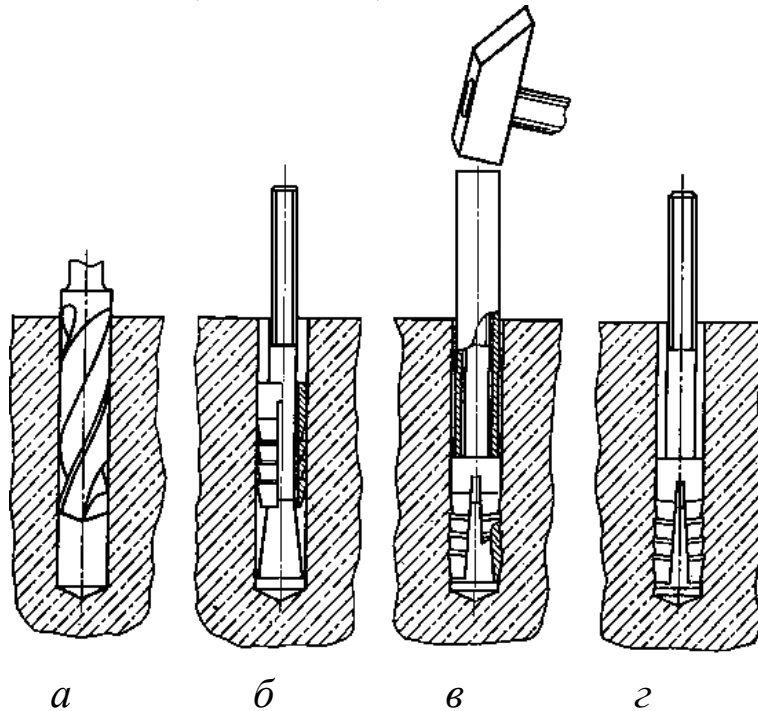


Рис. 5.12. Схемы установки конических болтов с расклиниванием цанг:  
*а* – бурение скважины; *б* – установка болта; *в* – расклинивание болта монтажной оправкой; *г* – установленный болт

Иногда болты этого типа устанавливают с помощью дистанционных монтажных трубок 1, расклинивая втулки или цанги заворачиванием гаек (рис. 5.13). Применение дистанционных трубок обеспечивает

извлекаемость болтов. После расклинивания цанг болтов, установленных до монтажа оборудования (рис. 5.13, *а*), трубки снимают. Если станину оборудования подливают, то трубки оставляют (рис. 5.13, *б*).

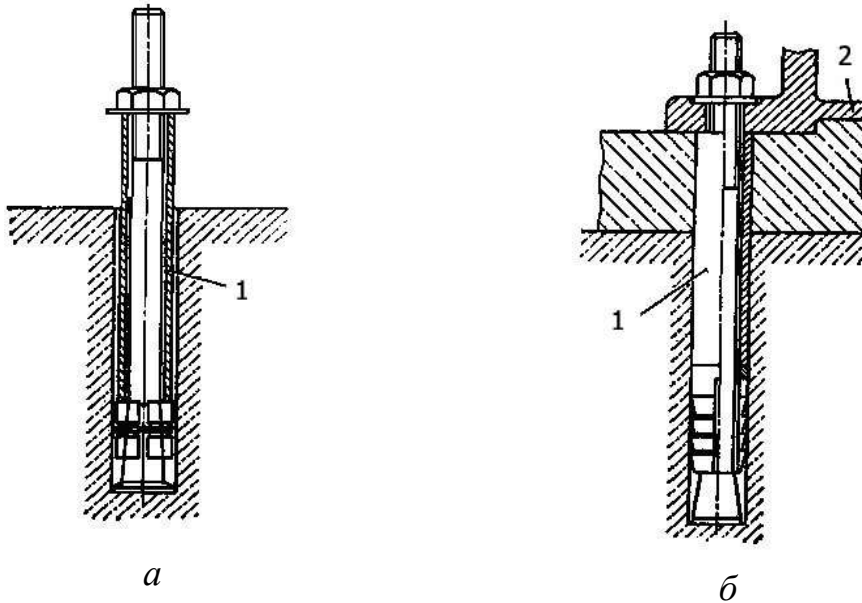


Рис. 5.13. Схема установки конических болтов с помощью монтажных трубок: 1 – монтажная трубка; 2 – станина оборудования

Болты с распорным конусом закрепляют в скважинах путем осаживания разрезной втулки на распорный конус механизированным инструментом ударного действия (рис. 5.14). При этом верх втулки не должен выступать над поверхностью бетона.

Дюбель-втулку устанавливают в скважину в два этапа. Вначале опускают в нее распорную втулку, при необходимости осаживая ее с применением специальной оправки до тех пор, пока верх втулки не будет заподлицо с поверхностью фундамента. После этого во втулку устанавливают конический элемент и расклинивают дюбель в скважине той же оправкой (рис. 5.15). Установку дюбелей анкерных распорных осуществляют, как показано на рис. 5.16.



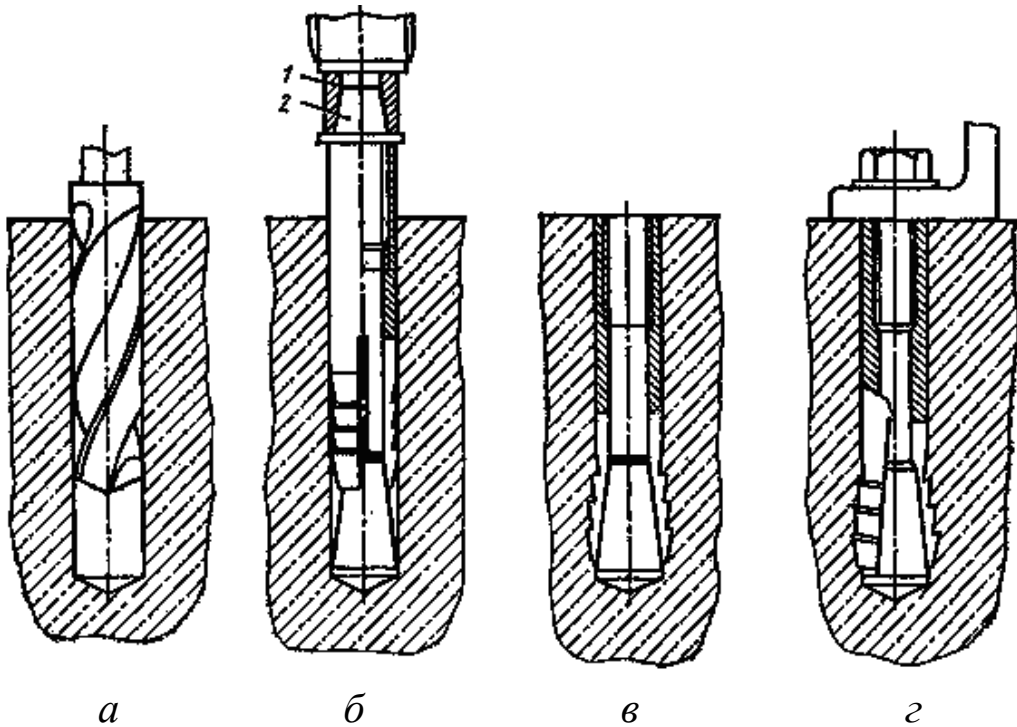


Рис. 5.14. Схемы установки болтов с распорным конусом:  
*а* – бурение скважины; *б* – начало расклинивания;  
*в* – окончательное расклинивание; *г* – закрепление  
 оборудования; 1 – патрон механизированного инструмента;  
 2 – переходный конус

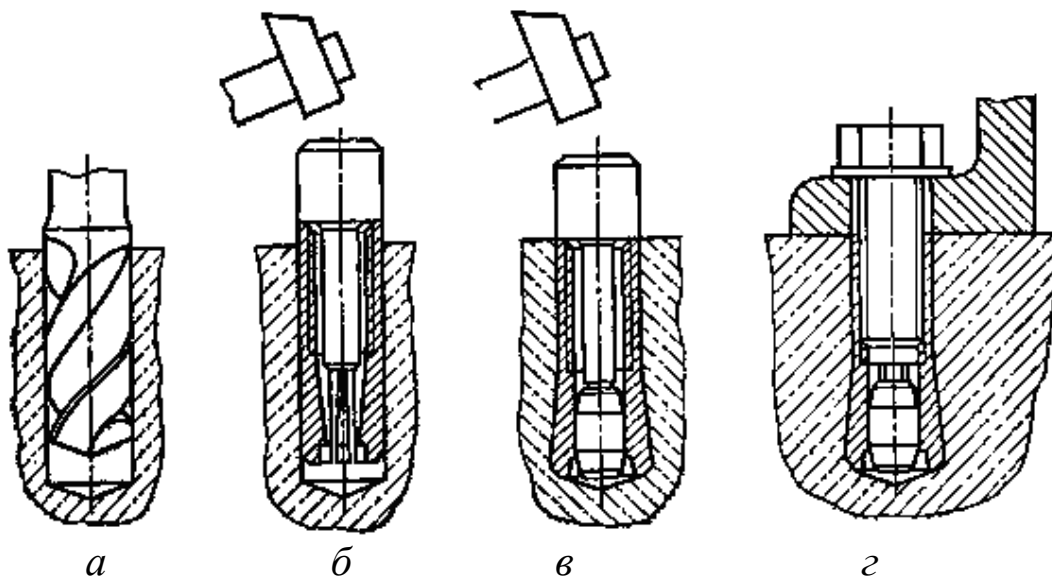


Рис. 5.15. Схема установки дюбель-втулок:  
*а* – бурение скважины; *б* – забивка втулки;  
*в* – расклинивание втулки; *г* – установка болта

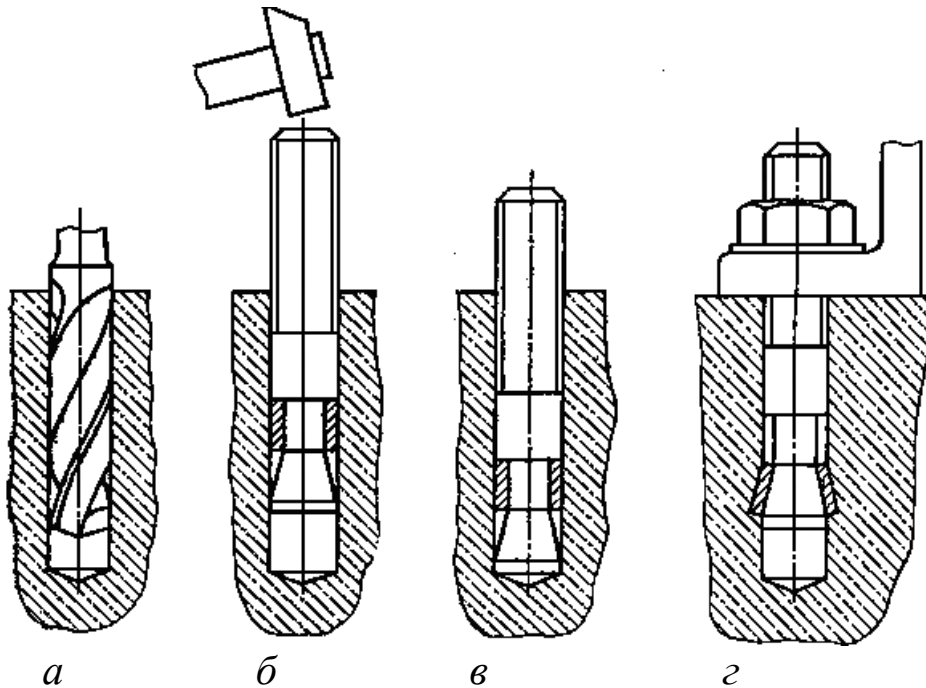


Рис. 5.16. Схемы установки анкерных распорных дюбелей:  
*а* – бурение скважины; *б* – забивка дюбеля; *в* – установленный дюбель;  
*г* – расклинивание дюбеля при затяжке гайки

Глухие изогнутые болты устанавливают в колодцы после предварительной выверки оборудования.

К выверке относятся регулировочные операции, обеспечивающие процесс введения оборудования в положение, предусмотренное проектом, с помощью специальных выверочных опорных элементов, центровочных приспособлений и грузоподъемных средств, а также технологические процессы и операции по измерению отклонений и контролю положения элементов оборудования. Средства и технологию измерения и контроля выбирают в зависимости от заданных допускаемых отклонений.

Оборудование выверяют в плане, по высоте и по горизонтали (вертикали), а также относительно ранее установленного оборудования с контролем отклонений от соосности, перпендикулярности и параллельности в зависимости от требований технической документации завода-изготовителя и проекта производства работ.

*Предварительную выверку в плане* осуществляют путем совмещения отверстий в опорной части оборудования с ранее установленными фундаментными болтами. При отсутствии заранее установленных фундаментных болтов оборудование ориентируют путем совмещения его осей, заданных разметочными рисками, с монтажными осями или ося-

ми фундамента, заданными натянутыми струнами, отвесами или визирными осями оптических приборов. Отдельные виды оборудования ориентируют относительно ранее установленного оборудования. При этом проверяют совмещение отверстий под болты в станинах с колодцами или скважинами в фундаментах.

После предварительной установки оборудования и выверки в плане изогнутые болты устанавливают в колодцах, оставленных при бетонировании фундамента. Корпусную деталь 1 опускают на уложенные брусья 4 так, чтобы совпадали центры отверстий под фундаментные болты 2 и центры колодцев (рис. 5.17). При монтаже динамически нагруженных машин фундаментные болты 2 на верхнем участке стержня изолируют от сцепления с бетоном с помощью защитных трубок 3. Концы фундаментных болтов 2 заводят в отверстия корпусной детали 1 и навинчивают гайки (рис. 5.13). Установленные болты заливают на 3/4 глубины колодца, но не менее чем на 100 мм ниже уровня фундамента бетоном на мелкозернистом заполнителе проектной марки при прочности на сжатие не ниже 200. Окончательную выверку в плане и по высоте и предварительное закрепление оборудования осуществляют после твердения бетона, затем полностью заливают колодцы и проводят подливку оборудования.

При наличии корпусной детали регулировочных винтов 5 перед удалением брусьев 4 под ними размещают опорные подкладки 6 (рис. 5.17). Окончательную затяжку болтов, установленных в колодцах, проводят, так же как и для других болтов, после твердения бетона подливки.

При *окончательной выверке в плане* оборудование вводят в проектное положение относительно монтажных контрольных или главных осей путем перемещения оборудования грузоподъемными механизмами, домкратами или монтажными приспособлениями (рис. 5.18) с проверкой положения относительно ранее выверенного смежного оборудования.

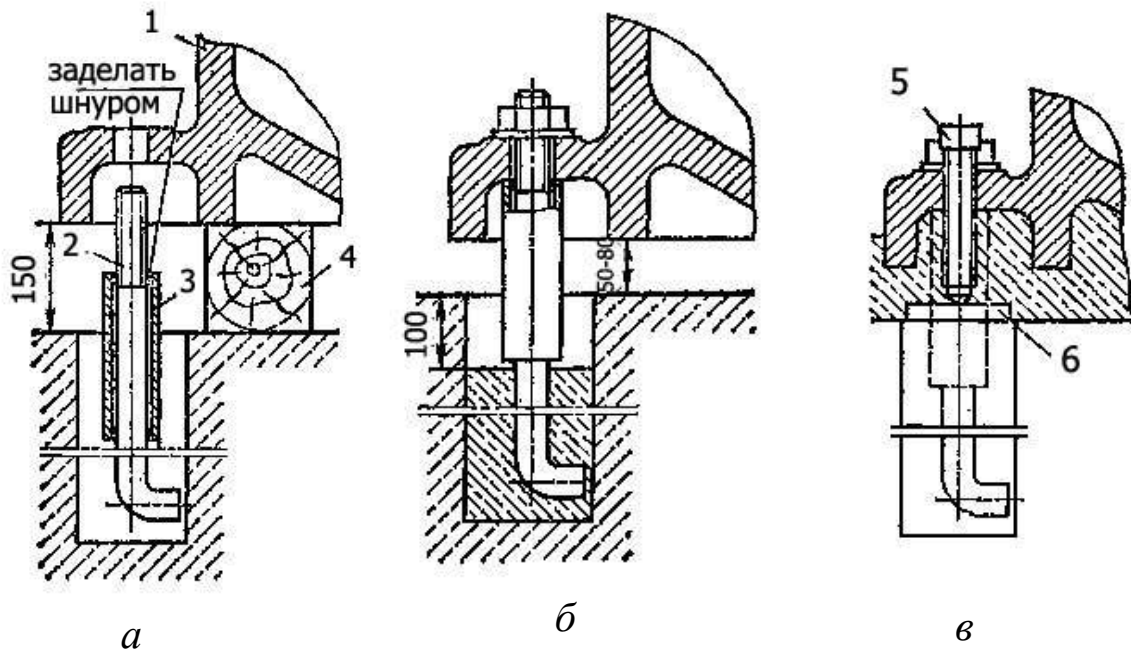


Рис. 5.17. Схемы установки изогнутых болтов:  
*a* – в колодце; *б* – подвеска на гайке и заливка бетонной смесью;  
*в* – выверка и закрепление оборудования затяжкой гаек

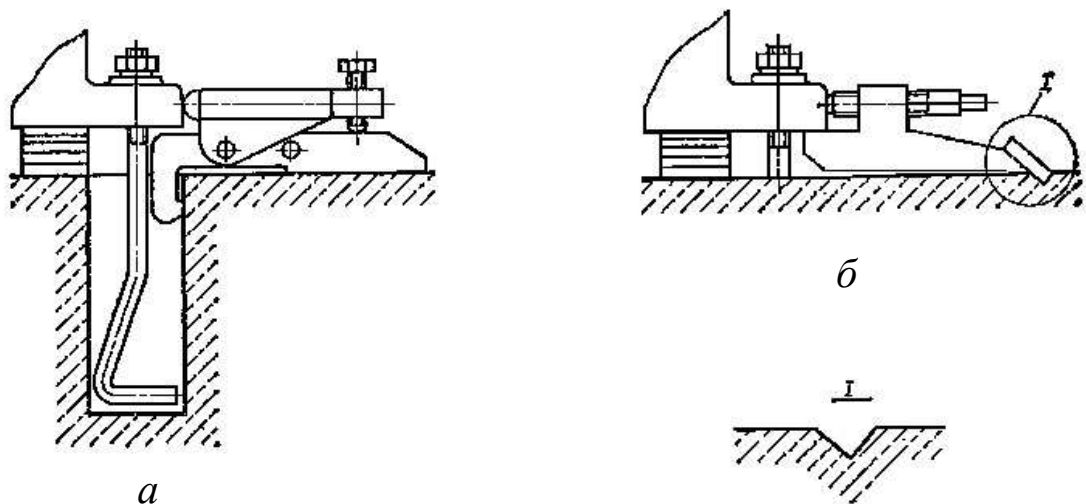


Рис. 5.18. Приспособления для выверки оборудования в плане:  
*a* – рычажно-винтовые; *б* – с упорным винтом

Положение оборудования при выверке в плане контролируют струнным, струнно-оптическим методами, боковым нивелированием теодолитами, створными методами, способами прямого контроля ли-

нейных размеров, а также с помощью специальных инструментов, приборов, шаблонов, центровочных и других приспособлений, обеспечивающих измерение и контроль отклонений от перпендикулярности, параллельности или соосности баз.

*Выверку оборудования по высоте* осуществляют относительно рабочих реперов либо ранее установленных машин, с которыми данное оборудование кинематически или технологически связано, с последующей проверкой по реперу.

При выверке оборудования контрольными базами служат специальные площадки, изготовленные на корпусных деталях, исполнительные поверхности оборудования (валов, полумуфт, направляющих и т. п.), установочные (опорные) поверхности, а также свободные поверхности корпусных деталей или опорных частей.

Точность выверки оборудования по высоте контролируют геометрическим или тригонометрическим нивелированием гидростатическими методами, косвенными способами контроля линейных размеров от промежуточной базы до репера или ранее установленного оборудования, а также микронивелированием с применением поверочных линеек и уровня.

*Выверку оборудования по горизонтали (вертикали)* выполняют с применением уровней, нивелиров, отвесов и теодолитов.

При установке на фундамент иногда контролируют отклонения формы рабочих и сопрягаемых поверхностей оборудования, искривление которых возможно под воздействием остаточных напряжений, монтажных нагрузок и процессов старения. Операцию по исправлению формы поверхностей оборудования и конструкций называют *рихтовкой*. Иногда таким способом устраняют отклонения формы в виде вогнутой или выпуклой поверхности, полученные при заводском изготовлении оборудования. Особенности регулирования положения оборудования при выверке зависят от способов его опирания и закрепления на фундаментах.

Конструкцию опорных элементов выбирают с учетом используемых методов достижения требуемой точности установки оборудования и данных сравнительной оценки способов установки оборудования (табл. 5.5).

Таблица 5.5

## Сравнительная оценка способов установки оборудования

Тип опорных элементов	Относительная трудность выверки, %	Относительный расход металла, %	Диаметр фундаментных болтов, мм
С закреплением на опорных элементах			
Пакеты прокладок	100	100	Не ограничен
Жесткие опоры (Бетонные подушки)	60–70	20–30	То же
Пирамидные пакеты подкладок	80–100	60–70	>>
С закреплением на подливке			
Регулировочные винты	30–40	10–15	До М42
Винтовые подкладки	40–60	15–25	До М42
Установочные гайки фундаментных болтов	30–50	5–10	До М42
Жесткие опоры (бетонные подушки)	40–60	10–15	Не ограничен
Уменьшенное число пакетов подкладок	60–70	40–60	То же
Инвентарные домкраты	30–40	–	>>

Регулирование положения оборудования, устанавливаемого со сплошным опиранием на подливку. Опорные элементы, применяемые для установки такого оборудования, служат только для его выверки, а эксплуатационные нагрузки воспринимает подливка. Несмотря на то, что выверочные опорные элементы могут оставаться под оборудованием в процессе эксплуатации, такой способ установки получил название «бесподкладочного» монтажа. При этом соединение оборудование – фундамент отличается высокой виброустойчивостью, повышенной жесткостью и прочностью. Установка и выверка оборудования таким способом отличается повышенной производительностью и позволяет получать экономию металла до 2% массы монтируемого оборудования.

В качестве опорных элементов при выверке оборудования, устанавливаемого со сплошным опиранием на подливку, применяют: отжимные регулировочные винты; установочные гайки фундаментных болтов; инвентарные домкраты; бетонные опоры; пакеты облегченных металлических подкладок.

Если в опорной части оборудования конструкторской документацией не предусмотрены отжимные регулировочные винты, тип и число

опорных элементов принимают в соответствии с технологической картой, проектом производства работ (ППР) или инструкцией на монтаж.

Опорные элементы необходимо размещать на возможно близком расстоянии от фундаментных болтов. Как правило, их располагают в местах нахождения ребер жесткости или перегородок в опорной части оборудования. При неравномерном распределении давления от массы оборудования на установочную поверхность опорные элементы размещают в местах действия наибольших нагрузок.

Число опорных элементов должно быть минимальным при соблюдении следующих условий: а) обеспечения устойчивого положения оборудования в процессе предварительного закрепления и подливки; б) исключения прогибов опорных частей под действием массы оборудования и усилий предварительной затяжки фундаментных болтов.

При рихтовке корпусных деталей оборудования в качестве опорных элементов используют пакеты подкладок, клиновые или другие домкраты, располагая их в местах наибольших отклонений от плоскостности или прямолинейности.

Суммарная грузоподъемность опорных элементов должна не менее чем в 2 раза превышать массу выверяемого узла оборудования или соответствовать указанной в проекте производства работ.

Минимально допускаемая площадь опирания опорных элементов на фундаменты (в см<sup>2</sup>)

$$S = 0,015M + 6nF,$$

где  $n$  – число фундаментных болтов, предварительно затягиваемых при выверке;  $F$  – расчетная площадь поперечного сечения фундаментного болта, см<sup>2</sup>, принимаемая по табл. 5.6.

*Регулирование положения оборудования с помощью отжимных регулировочных винтов* (табл. 5.7, рис. 5.19). Опорные пластины размещают на фундаментах в соответствии с расположением отжимных регулировочных винтов в опорной части оборудования. Места расположения опорных пластин на фундаментах выравнивают с отклонением не более 10 мм на 1 м.

Таблица 5.6

Расчетные площади поперечного сечения  
фундаментных болтов по резьбе

Резьба болта, мм	Площадь сечения, мм	Резьба болта, мм	Площадь сечения, мм	Резьба болта, мм	Площадь сечения, мм
M12	0,77	M42	10,34	M90×6	53,68
M16	1,44	M48	13,8	M100×6	67,32
M20	2,25	M56	18,74	M110×6	87,67
M24	3,24	M64	25,12	M125×6	108,56
M30	5,19	M72×6	32,23	M140×6	138
M36	7,59	M80×6	40,87		

Таблица 5.7

Размеры винтов отжимных регулировочных

Диаметр резьбы $d$ , мм	20	24	30	36	42	48
Шаг резьбы $P$	2	3	3,5	4	4,5	5
Размер «под ключ» $S$	27	32	41	50	60	70
Радиус опорной сферы $R$	20	25	32	32	40	50
Размеры опорных пластин:						
толщина, $\delta$	8	8	10	12	14	16
длина $l$	60	80	100	120	130	140

При опускании оборудования на фундаменты отжимные регулировочные винты должны выступать ниже установочной поверхности оборудования на одинаковую величину в пределах 10–30 мм.



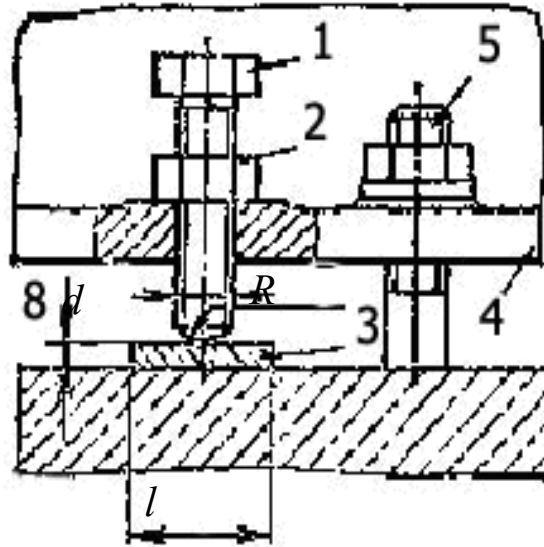


Рис. 5.19. Винты отжимные регулировочные:  
 1 – регулировочный винт; 2 – стопорная гайка; 3 – опорная  
 пластина; 4 – опорная часть оборудования;  
 5 – фундаментальный болт

Положение оборудования по высоте и горизонтали (вертикали) регулируют поочередно всеми отжимными винтами, не допуская в процессе выверки отклонения оборудования от горизонтальности (вертикальности) более чем 3 мм на 1 м. После завершения выверки плотность прилегания регулировочных винтов к опорным пластинам проверяют щупом толщиной 0,1 мм, а положение винтов фиксируют контргайками.

Перед окончательной затяжкой фундаментных болтов регулировочные винты должны быть вывернуты на два-три оборота. Неоднократно используемые винты выворачивают полностью. Оставшиеся отверстия, во избежание попадания масла и других разъедающих бетон веществ, заглушают резьбовыми пробками или заливают цементным раствором, поверхность которого покрывают маслостойкой краской.

*Регулирование положения оборудования на установочных гайках.* Для выверки оборудования с помощью установочных гаек используют заранее установленные фундаментные болты, которые должны иметь удлиненную (до шести диаметров) резьбу, что предусматривается при их изготовлении.

Оборудование выверяют на установочных гайках с помощью упругих элементов в виде тарельчатых стальных, плоских резиновых

или пластмассовых шайб. Установочные гайки 5 (рис. 5.20) с упругими шайбами 4 размещают на болтах 2 так, чтобы верх шайбы был на 2–3 мм выше проектной отметки опорной поверхности оборудования 3. После установки оборудования на шайбы его окончательно выверяют с помощью затяжки крепежных гаек 1, деформируя шайбы. Выверку в более широких пределах осуществляют регулировкой положения установочных гаек 5. При этом крепежные гайки 1 должны быть отвинчены. При использовании съемных фундаментных болтов и болтов с цапгами для их фиксации устанавливают дополнительные гайки 7 с шайбами 6.

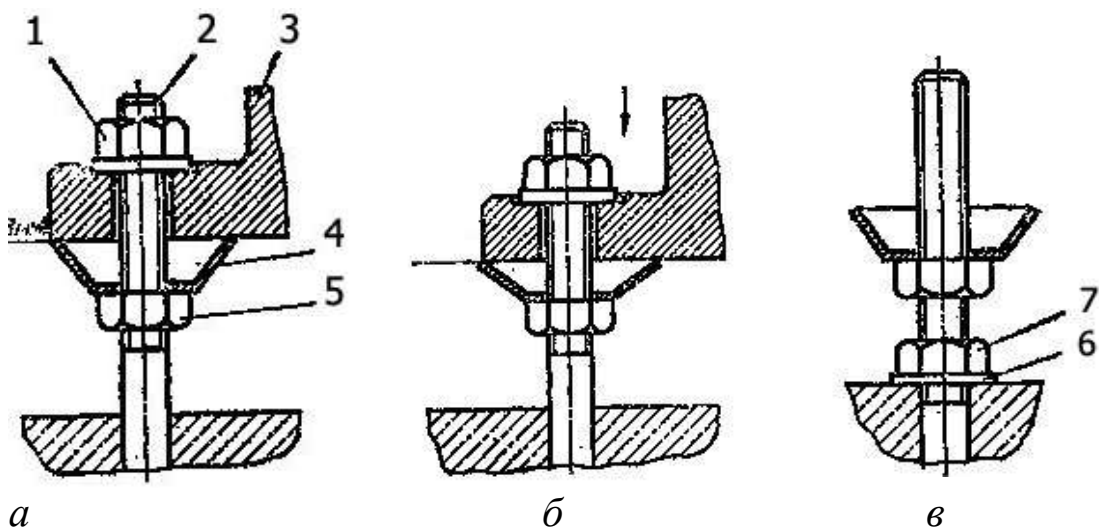


Рис. 5.20. Схемы регулирования положения оборудования на установочных гайках с упругим элементом: *а* – установка оборудования с завышением на 2–3 мм; *б* – регулирование положения оборудования затяжкой гайки; *в* – установка дополнительной гайки при использовании съемных болтов или болтов цапгами плоских резиновых или пластмассовых шайб

Для выверки можно также использовать установочные гайки без упругих элементов с регулированием положения оборудования на фундаментных болтах 2 по высоте (рис. 5.21). Перед подливкой установочные гайки 4 выгораживают опалубкой 5. После твердения подливки 6 (через двое-трое суток после подливки) опалубку 5 снимают, а закрепление оборудования осуществляют затяжкой крепежных гаек 5. Перед окончательной затяжкой фундаментных болтов установочные гайки опускают на 3–4 мм. Оставшиеся ниши заполняют составом, использу-

емым для подливки. Необходимость применения опалубки исключается при использовании гаек, срезающихся при окончательной затяжке фундаментных болтов (рис. 5.22).

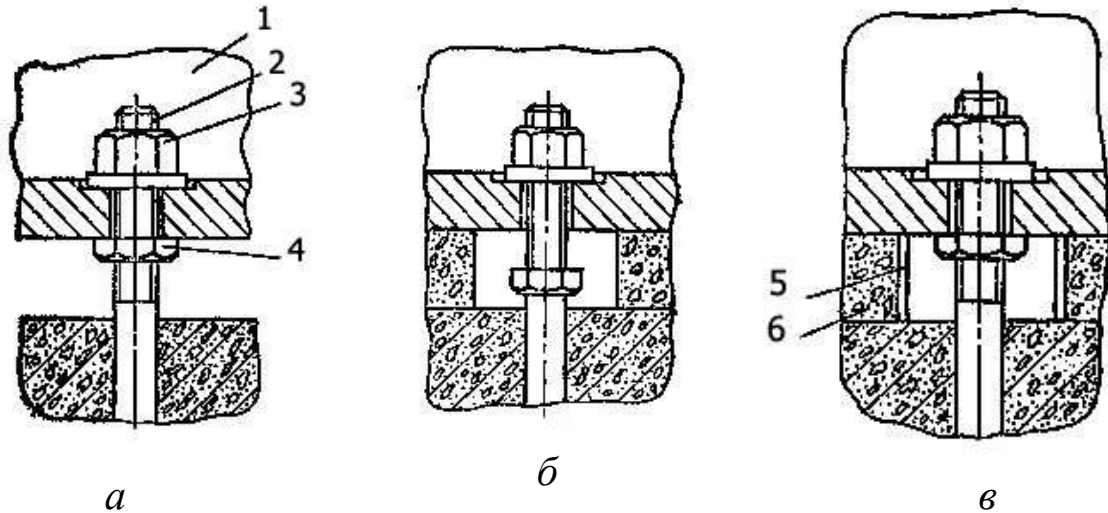


Рис. 5.21. Схемы регулирования положения оборудования на установочных гайках без упругого элемента:

*а* – установка в проектное положение; *б* – подливка оборудования;  
*в* – отвинчивание установочной гайки перед закреплением

Такие гайки должны выдерживать нагрузку от оборудования и сил предварительного закрепления, но разрушаться или деформироваться при окончательной затяжке фундаментных болтов. В качестве ослабленных установочных гаек рекомендуется использовать гайки из менее прочного, чем у крепежных гаек, материала, стандартные гайки с уменьшенной на 50–70% высотой, а также гайки, ослабленные путем расточки их до диаметра, соответствующего внутреннему диаметру резьбы, гайки с проточками или с резьбой неполного профиля. В этом случае после выверки оборудованиями его подливки при окончательной затяжке фундаментных болтов происходит срез или смятие резьбы установочных гаек, что сопровождается скачкообразным падением силы затяжки, а затем постепенным увеличением силы до заданного значения.

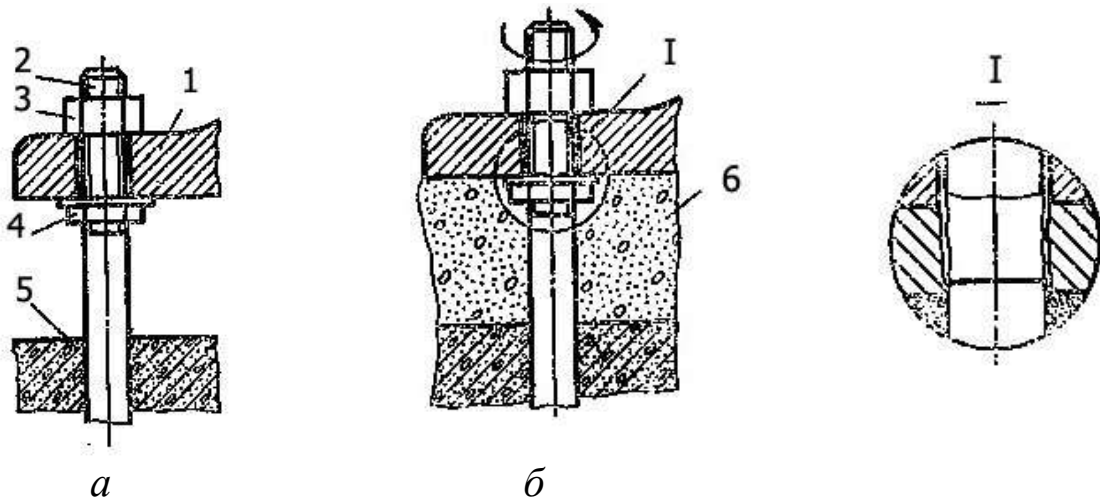
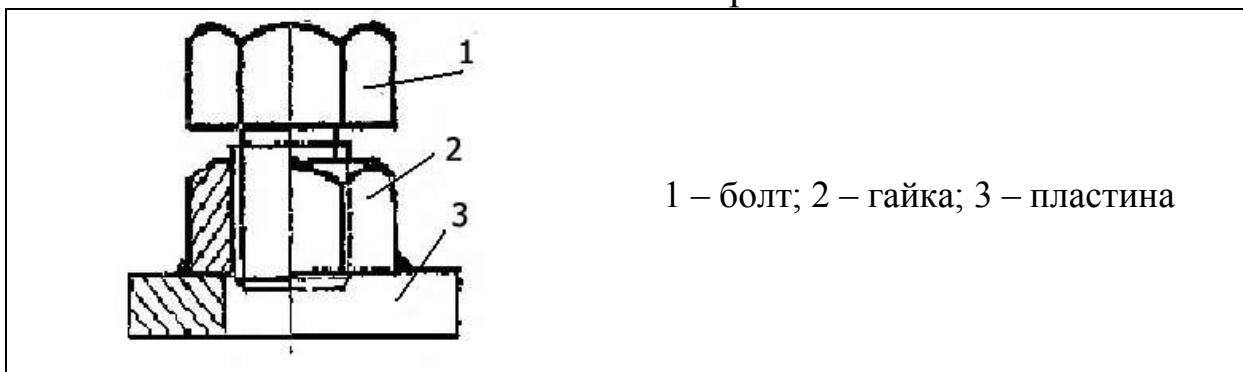


Рис. 5.22. Схемы регулирования положения оборудования на ослабленных установочных гайках: *а* – установка в проектное положение по высоте и горизонтали; *б* – подливка и последующее закрепление; 1 – оборудование; 2 – фундаментный болт; 3 – крепежная гайка; 4 – специальная установочная гайка; 5 – фундамент; 6 – подливка

*Регулирование положения оборудования с помощью домкратов.* Для выверки этим способом используют винтовые опоры (табл. 5.8), винтовые домкраты (табл. 5.9), регулируемые клиновые подкладки (табл. 5.10), гидравлические домкраты, опорные башмаки (табл. 5.11 и 5.12) и другие устройства.

Таблица 5.8

## Винтовые опоры

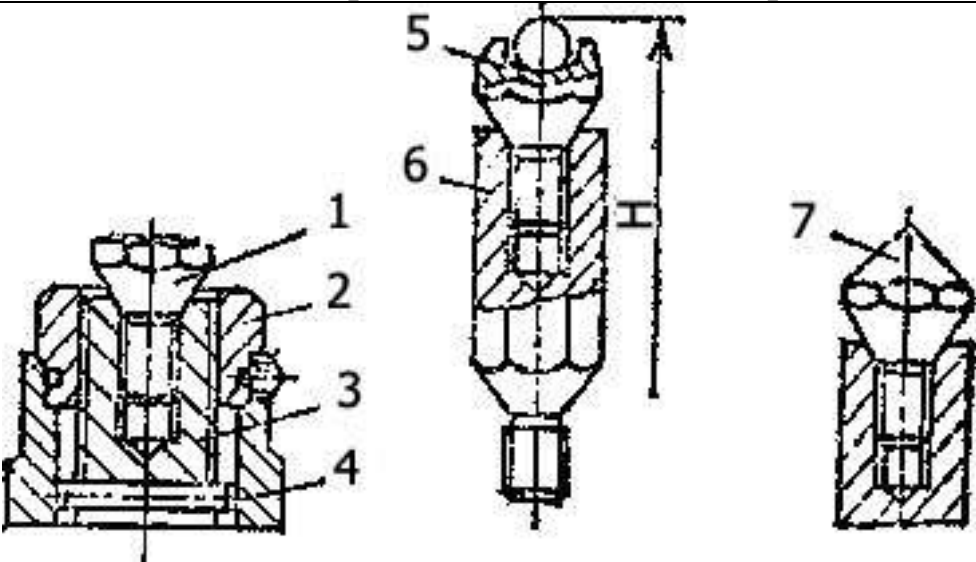


Продолжение табл. 5.8

Диаметр резьбы	Максимальная высота подъема, мм	Минимальная высота, мм	Крутящий момент, Н·м	Грузоподъемность	Масса подкладки
				кг	
M20	10	37	49	3300	0,4
M24	12	44	69	6000	0,7
M30	14	55	156	7600	1,4
M36	16	64	369	11000	2,2
M42	18	73	442	15000	3,6
M48	20	84	693	20000	5,3

Таблица 5.9

## Малогабаритный винтовой домкрат

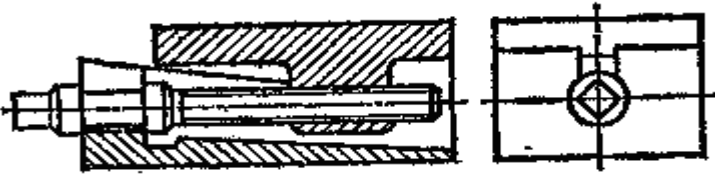


1, 5, 7 – сменные опоры; 2 – гайка; 3 – винт; 4 – корпус;  
6 – удлинитель

Параметр	ДМ-3	ДМ-5
Грузоподъемность, кг	3000	5000
Минимальная высота домкрата в сборе, мм	60	94
Высота подъема, мм	17	40
Масса	1,1	3,5

Таблица 5.10

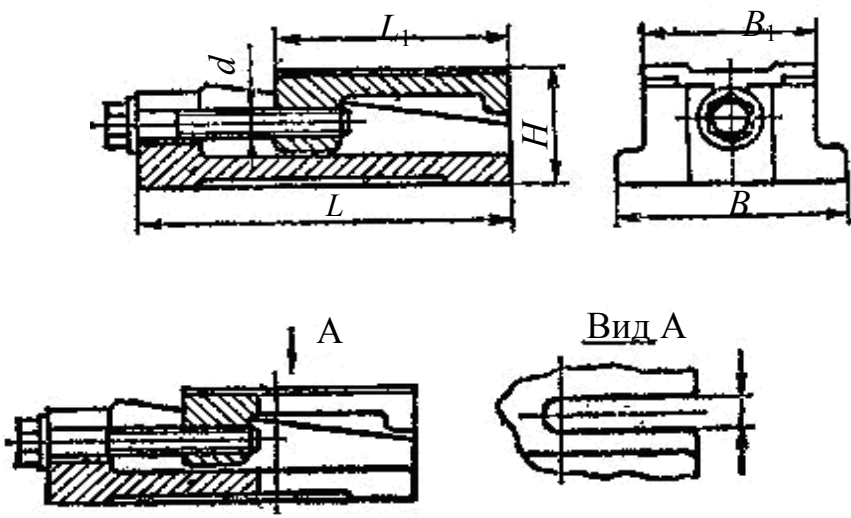
## Регулируемые клиновые подкладки



Параметр	ПР-3	ПР-5	ПР-10
Грузоподъемность, кг	3000	5000	10000
Высота подъема, мм	12	15	16
Усилие на рукоятке, Н	250	280	3000
Минимальная высота, мм	68	75	76
Масса, кг	3,7	5,3	7,2

Таблица 5.11

## Опорные башмаки



Параметр	Р79-1.1		Р79-1.2		Р79-1.3	
	1	2	1	2	1	2
1	2		3		4	
Грузоподъемность, кг	2000		3200		5000	
Высота подъема, мм	7		8		9	

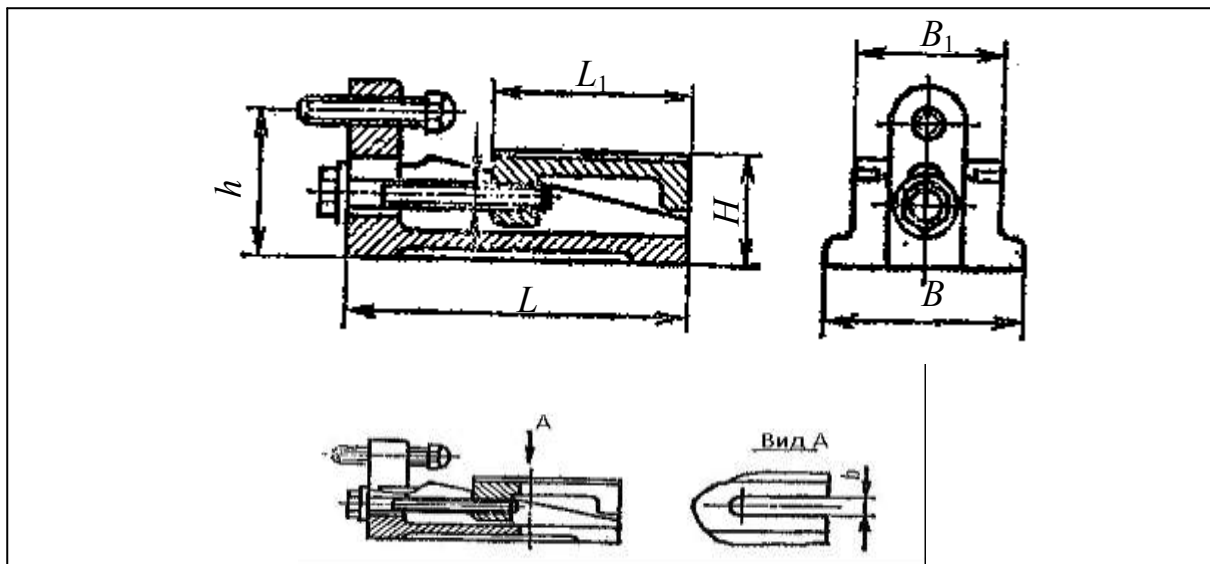
Продолжение табл. 5.11

1	2		3		4	
Минимальная высота $H$ , мм	80		94		108	
Длина башмака $L$ , мм	260		314		379	
Длина опоры $L_1$ , мм	150		190		240	
Ширина башмака $B$ , мм	150		170		200	
Ширина опоры $B_1$ , мм	110		130		150	
Размер под ключ, мм	27		32		41	
Ширина прорези $b$ , мм	–   24		–   28		–   334	
Диаметр резьбы $d$ , мм	M20		M24		M30	
Масса, кг	11,5	11,1	19,4	18,7	30,5	29,2

Примечание: 1 и 2 – исполнения.

Таблица 5.12

## Опорные башмаки с упорным винтом



Параметр	P79–1.1		P79–1.2		P79–1.3	
	1	2	1	2	1	2
1	2		3		4	
Грузоподъемность, кг	2000		3200		5000	
Высота подъема, мм	7		8		9	
Минимальная высота $H$ , мм	80		94		108	
Длина башмака $L$ , мм	260		314		379	
Длина опоры $L_1$ , мм	150		190		240	
Ширина башмака $B$ , мм	150		170		200	
Ширина опоры $B_1$ , мм	110		130		150	
Высота упора $h$ , мм	110		130		150	
Размер под ключ, мм	27		32		41	
Ход упорного винта, мм	55		60		68	

Параметр	P79–1.1		P79–1.2		P79–1.3	
	1	2	1	2	1	2
Ширина прорези $b$ , мм			–	28	–	34
Диаметр резьбы $d$ , мм	M20		M24		M30	
Масса, кг	2,5	12,1	1	0,2	2,8	1,5

Примечание: 1 и 2 – исполнения.

Домкраты, размещенные на подготовленных фундаментах, регулируют по высоте на проектный уровень помощью нивелира и рейки с точностью  $\pm 1,0$  мм. Затем оборудование опускают на домкраты и окончательно регулируют его положение.

Перед подливкой инвентарные домкраты «выгораживают» опалубкой. Опалубку и инвентарные домкраты удаляют через двое-трое суток после подливки. Оставшиеся ниши заполняют составом, используемым для подливки.

Удобство при выверке оборудования обеспечивают специальные домкраты с лапой. Такие домкраты не требуют выгораживания опалубкой, так как легко извлекаются из бетона подливки.

*Установка оборудования на бетонных опорах.* На бетонных опорах устанавливают оборудование, поверхность основания которого может выполнять функции установочной базы, погрешности изготовления которой значительно меньше допускаемых отклонений расположения оборудования по высоте. Суммарные погрешности изготовления поверхности бетонных опор и установочной поверхности оборудования (включая отклонения формы) не должны превышать допускаемых отклонений положения оборудования по высоте и горизонтали.

Бетонные опоры представляют собой местные возвышения на поверхности фундамента, изготавливаемые перед установкой оборудования.

Размеры опор выбирают такими, чтобы давление от оборудования не превышало 500 кПа. Опоры изготавливают из бетона марки не ниже 200 с наполнителем в виде щебня или гравия фракции 5–12 мм.

Для изготовления опор в специальную опалубку на предварительно очищенную и увлажненную поверхность фундамента загружают порцию бетонной смеси до уровня на 1–2 см выше требуемой отметки. Излишки смеси удаляют до требуемой высотной отметки. При этом поверхность опор выравнивают.

Для повышения точности бетонных опор на них укладывают металлические пластины с механически обработанной опорной поверхно-



стью. Расстояние от пластины до края бетонной опоры не должно быть меньше ширины пластины.

Для изготовления бетонных опор с металлическими пластинами бетонную смесь укладывают в опалубку до уровня ниже проектной отметки на  $1/2$ – $1/3$  толщины пластины. На несхватившийся бетон кладут пластину и легкими ударами молотка опускают ее до проектной отметки, которую выверяют с помощью нивелира с точностью  $\pm 0,5$  мм. Для достижения более высокой точности ( $0,1$ – $0,2$  мм) следует пользоваться прецизионным нивелиром с инварной рейкой или гидростатическим уровнем. Отклонение пластины от горизонтальности проверяют с помощью пузырькового уровня, который устанавливают на пластину последовательно в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Оборудование устанавливают при прочности бетона 1500 кПа. После опускания на опоры оборудование выверяют в плане и закрепляют путем предварительной затяжки гаек фундаментных болтов. В процессе выверки допускается точное регулирование высоты опорных элементов добавлением на пластину тонких металлических подкладок.

*Регулирование положения оборудования на пакетах облегченных металлических подкладок.* Пакеты подкладок применяют для выверки в тех случаях, когда регулировочные винты не предусмотрены конструкторской документацией, а также нет условий для использования установочных гаек, бетонных опор или инвентарных домкратов. Число и расположение пакетов при этом выбирают исходя из условия удобства выверки и обеспечения временного закрепления оборудования до момента твердения подливки. Обычно применяют три-четыре пакета подкладок.

Пакеты набирают из стальных чугунных подкладок толщиной 5 мм и более. Достижение проектного уровня и горизонтальности оборудования осуществляют подбором регулировочных подкладок толщиной 0,5–5 мм в процессе его предварительного закрепления. В пакет вместо регулировочных могут входить клиновые и другие, регулируемые по высоте подкладки. Для уменьшения расхода металла применяют верхние подкладки с площадью, меньшей нижних. Для установки легкого оборудования в пакет включают подкладки из швеллера или уголка. Рекомендуемые размеры и материал для нижних установочных подкладок приведены в табл. 5.13.

Таблица 5.13

## Размеры и материал установочных подкладок

Масса шин, т	Размеры подкладок, мм	Материал	Масса шин, т	Размеры подкладок, мм	Материал
Св. 100	250×120×80	Чугун	5–30	150×80×50	Чугун или сталь
	250×120×60			150×80×30	
	250×120×40	Чугун или сталь		150×80×20	Сталь
	250×120×30			150×80×10	
250×120×20	Сталь	150×80×5			
250×120×10		Чугун или сталь	До 5	Чугун или сталь	
250×120×5					
30–100	200×100×50	Чугун или сталь	До 5	100×60×30	Чугун или сталь
	200×100×30			100×60×20	
	200×100×20	Сталь		100×60×10	Сталь
	200×100×10				
200×100×5		100×60×5			

Регулирование положения оборудования, устанавливаемого с местным опиранием на фундамент. Такой метод применяют для легкого, переставляемого и часто регулируемого по высоте оборудования, не испытывающего существенных нагрузок, а также для оборудования, не закрепляемого на фундаменте. В качестве опорных элементов используют: опорные башмаки, винтовые опоры и клиновые регулируемые подкладки; бетонные опоры; пакеты металлических подкладок.

Для оборудования, закрепляемого на фундаменте, опорные элементы устанавливают около каждого фундаментного болта. Число опорных элементов выбирают так, чтобы суммарная площадь их контакта с фундаментом превышала минимально допустимую площадь контакта.

Подкладки в пакетах должны быть плоскими без заусенцев.

Перед установкой подкладок для предварительных расчетов их высоты в местах установки выполняют геодезическую съемку высотных отметок фундамента. При применении регулируемых опорных башмаков, винтовых опор съемку фундамента можно не делать.

Места установки опорных элементов должны быть тщательно выровнены. Приспособления для выравнивания фундамента и притирки

мест установки опорных элементов показаны на рис. 5.23, а механизированный инструмент приведен в табл. 5.14.

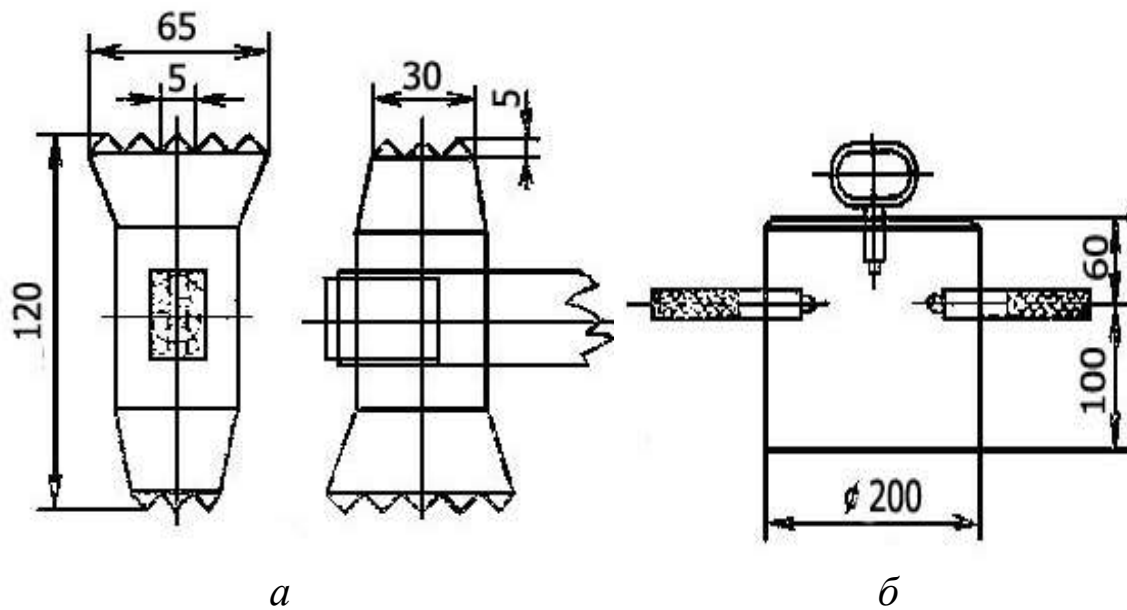


Рис. 5.23. Молоток с зубьями: *а* – для выравнивания фундамента; *б* – приспособление для притирки мест установки кладок

Таблица 5.13

Размеры плоских кладок пирамидальных пакетов

Но- ме- ра под кла- док	Рекомен- дуемый размер, мм	Опти- ти- маль- ная тол- щина, мм	Масса, кг	омер ра под кла- док	Реко- мендуе- мый размер, мм	Опти- маль- ная тол- щина, мм	Масса, кг
0	45×60	15–20	0,32–0,42	5	150×250	25–30	7,2–8,6
1	55×85	15–20	0,7–0,93	6	190×280	27–32	11,15– 13,5
2	75×100	18–22	1,05–1,3	7	210×320	30–35	16–18,5
3	100×140	20–25	2,2–2,7	8	260×400	32–38	26–31
4	130×200	22–27	4,4–5,4				

После установки подкладок с целью упрощения последующего регулирования контролируют их высотные отметки и горизонтальность с помощью нивелира и уровня.

При установке оборудования на опорных башмаках, винтовых опорах и клиновых опорах контроль высотных отметок опор можно не выполнять.

Число подкладок в пакете должно быть минимальным и не превышать пяти, включая и тонколистовые, применяемые для окончательной выверки.

После установки на подкладки частично затягивают фундаментные болты, а затем контролируют положение оборудования. При необходимости оборудование приподнимают, добавляют в пакеты тонколистовые подкладки или заменяют их на подкладки другой толщины. Затем вновь затягивают фундаментные болты и контролируют положение оборудования. После окончательной затяжки фундаментных болтов подкладки прихватывают между собой сваркой. Рекомендуемые размеры подкладок приведены в табл. 5.14. В схеме установки, показанной на рис. 5.24, применяют пирамидальные пакеты подкладок, размеры которых должны соответствовать табл. 5.13 и 5.14.

Таблица 5.14

Размеры клиновых подкладок

Типоразмер	Размеры, мм			Диаметр резьбы фундаментных болтов	Пределы регулирования высоты подъема подкладок, мм	Масса 1 шт., кг
	$a \times b$	$h$	$t$			
75×50	75×50	7,5	15	До М36	7,5	0,33
100×75	100×75	10	20	М36–М64	10	0,9
150×100	150×100	10	25	–М90	15	2,1

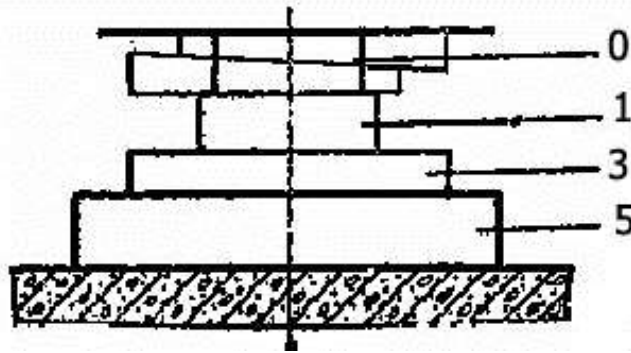


Рис. 5.24. Пирамидальный пакет подкладок;  
0, 1, 3, 5 – номер подкладок

Меньшие трудоемкость и расход металла достигаются при установке оборудования с использованием клиновых подкладок рис. 5.25, размеры которых приведены в табл. 5.14.

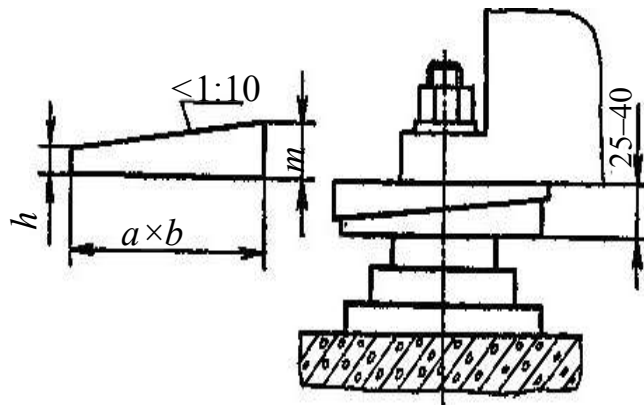


Рис. 5.25. Клиновые подкладки

Качество подбора пакета подкладок и закрепления оборудования проверяют в затянутом состоянии обстукиванием молотком. При этом подкладки должны издавать звук без дребезжания.

Установку на бетонные опоры выполняют так же, как при сплошном опирании оборудования на фундамент.

При применении регулируемых опор выверку осуществляют так же, как и оборудования, устанавливаемого со сплошным опиранием на подливку. После выверки оборудование окончательно закрепляют и не подливают.

Применяют также установку оборудования непосредственно на фундамент с опиранием на лапы корпусной детали. Фундамент в ме-

стах опирания предварительно выравнивают с требуемой точностью, а выверку по высоте не проводят.

Предварительную установку рам, каркасов, плит и их закрепление на фундаментах проводят так же, как и оборудования. Например, предварительную установку основания 4 (рис. 5.26) опоры 2 цилиндра 1 компрессора осуществляют бесподкладочным способом на регулировочных винтах 7. Основание 4 закрепляют фундаментными болтами 5, предварительно залитыми до уровня опорной подкладки 6. Подливают основание до уровня фундамента. Положение опоры 2 регулируют с помощью отжимных винтов 8 и регулировочных подкладок 3.

Без выверки по высоте монтируют оборудование, не требующее высокой точности расположения, а также оборудование, устанавливаемое на точно выверенные поверхности опорных конструкций.

Выверку и закрепление на пакетах постоянных и временных подкладок осуществляют так же, как при установке оборудования с местным опиранием на фундамент. При этом значительное внимание уделяется подготовке посадочных мест, которая заключается в зачистке, устранении забоин, заусенцев, а иногда – в шабрении. В ответственных случаях каждый пакет временных подкладок поочередно заменяют одной постоянной подкладкой, пришабренной к опорным поверхностям.

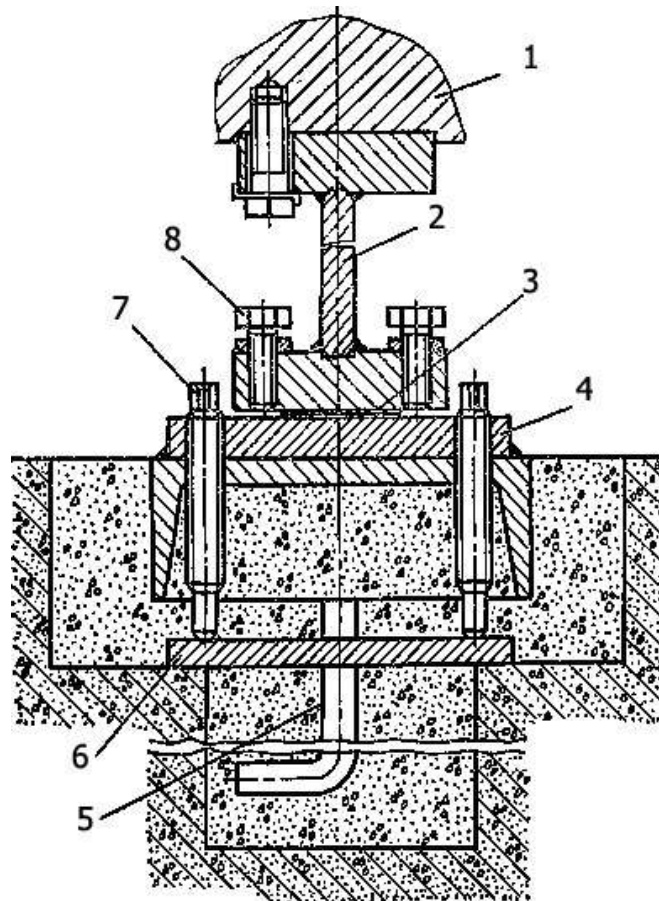


Рис. 5.26. Схема установки компрессора

## 5. МАТЕРИАЛЫ ФУНДАМЕНТОВ

Материалами для фундаментов под машины могут служить железобетон, бетон, бутобетон. Для фундаментов под станки больше других материалов подходит малоармированный бетон. Он хорошо сопротивляется действию усадочных напряжений, позволяет сохранить монолитность конструкции в местах устройства рабочих швов и вместе с тем не требует большого расхода арматурной стали.

Марка бетона соответствует пределу прочности при сжатии стандартных бетонных кубиков размером  $200 \times 200 \times 200$  мм, изготовленных из рабочей смеси и испытанных через 28 дней твердения в нормальных условиях (температура  $18\text{--}22$  °С; относительная влажность воздуха 90–100 %). Для фундаментов станков применяют тяжелые бетоны (средняя плотность более  $1800 \text{ кг/м}^3$ ), как правило, проектных марок 200–400, но не ниже 100, а при устройстве армированных фундаментов и фундаментов точных станков – не ниже 150.

При изготовлении бетона принимают водоцементное отношение не 0,1–0,2, а 0,5–0,7, что придает бетонной смеси большую подвижность. Избыточная вода остается в бетоне в порах или испаряется, оставляя поры, заполненные воздухом; вокруг пор концентрируются местные напряжения; поэтому прочность бетона тем меньше, чем больше было водоцементное отношение.

Прочность бетона растет со временем по мере твердения бетона. На скорость твердения влияет вид цемента (его минералогический состав и тонкость помола), водоцементное отношение, заполнители и др. С понижением температуры скорость твердения понижается; при повышении температуры бетон твердеет быстрее, особенно в условиях влажной среды. В случае преждевременного высыхания бетона поверхность его растрескивается и прочность снижается. При твердении цемента происходит усадка бетона, которая начинается снаружи и распространяется внутрь. Неравномерная усадка вызывает коробление фундамента и, как следствие, искривление станины. Усадка тем больше, чем больше цемента и меньше заполнителя, чем больше водоцементное отношение и меньше модуль упругости бетона.

На деформации станин длинных станков, закрепленных на фундаменте, влияют также температурные деформации фундаментов, связанные с колебаниями температурного поля в цехе и грунте. В строительных нормах принята величина коэффициента температурного расширения  $\alpha = 10 \cdot 10^{-6}$  1/град, т. е. очень близкая к значениям  $\alpha$  для чугуна. В действительности, величина  $\alpha$  не постоянна и в зависимости от наполнителя, применяемого при изготовлении бетона, может иметь значения от  $7 \cdot 10^{-6}$  до  $14 \cdot 10^{-6}$  1/град. При разности коэффициентов температурного расширения даже одинаковые изменения температуры станины и фундамента (например, при годовых колебаниях температуры) приводят к вертикальным прогибам станины. Так как напряжения в станочных фундаментах незначительны, ползучесть бетона во внимание может не приниматься.

Монтаж оборудования может быть допущен при достижении бетоном прочности на сжатие не ниже 50 % проектной (примерно соответствует семидневному бетону). К моменту пуска станков прочности бетона должна быть не ниже 70 % проектной (примерно соответствует 15-дневному бетону). Качество бетона контролируют по прочности контрольных кубов. В практике прочность бетона в готовом фундаменте может быть грубо оценена по звуку и ударам (табл. 6.1).



Таблица 6.1

## Признаки, характеризующие прочность бетона

Предел прочности на сжатие, кгс/см <sup>2</sup>	Звук	Способ проверки	
		Удары по поверхности бетона молотком	Нанесение рисок острым зубилом
110–140	Звонкий	Почти не остается следов удара	При легком штриховании дает слабый след
60–90	Глуховатый	Остаются вмятины от удара	Штрихуется на глубину 1–1,5 мм
30–50	Мягкий	При ударе получают вмятины с осыпающимися краями	Режется и осыпается

### 6.1. Рекомендации по проектированию и конструкциям фундаментов

Наиболее простой и дешевой является установка станков непосредственно на пол цеха. При этом пол выполняют с жестким подстилающим слоем. Толщина подстилающего слоя обычно выбирается из расчета на прочность в соответствии с рекомендациями СНиП II-V. 8–71. По выбранной толщине плиты и способу закрепления станины определяют приведенные размеры фундамента, эквивалентного по деформациям плите, и, рассматривая станину и фундамент как балки на упругом основании, производят проверочный расчет на жесткость. Аналогично определяют высоту индивидуальных фундаментов. Ориентировочно высота фундамента принимается в соответствии с рекомендациями табл. 9, а затем по заданным размерам фундамента проводят проверочный расчет. При расчете вычисляются перемещения станины или относительные перемещения инструмента и детали под действием сил резания, веса перемещающихся узлов и в результате осадок фундамента. Положение узлов станка принимается таким, при котором деформации системы максимальны. В том случае, если вычисленные пе-

ремещения окажутся существенно больше допустимых, проводится повторный расчет при большей высоте фундамента (или толщине плиты).

При установке станков на специально проектируемые фундаменты чаще всего применяют массивные бесподвальные фундаменты, опирающиеся на естественное основание (рис. 6.1).

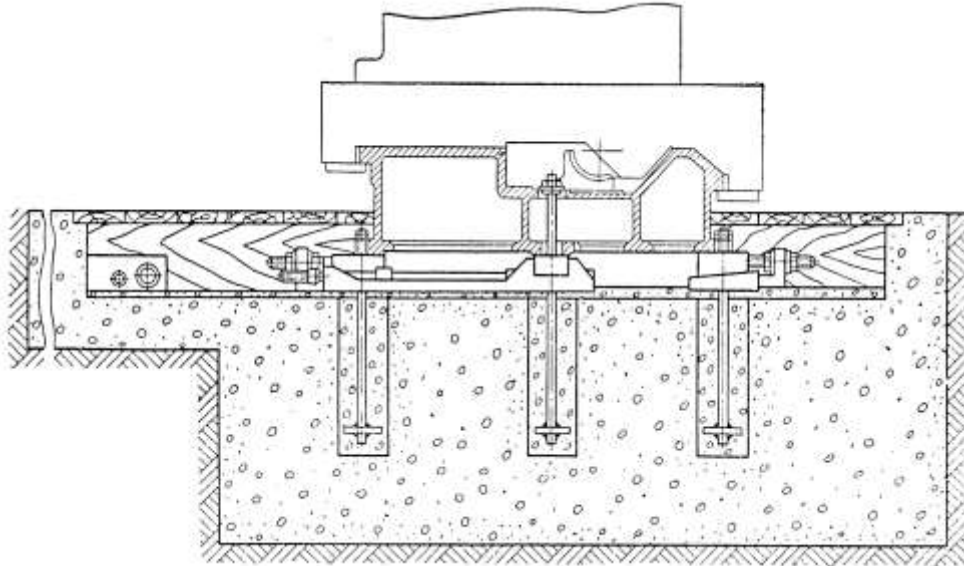


Рис. 6.1. Фундамент тяжелого расточного станка

Фундаменты могут быть отдельными под каждый станок или групповыми под несколько станков. При больших размерах фундамента в плане увеличивается жесткость основания фундамента, уменьшаются амплитуды колебаний и перекосы фундамента при неравномерных осадках. Поэтому при групповой установке станков во всех случаях, когда это экономически оправдано, следует устанавливать станки на общий фундамент.

Индивидуальные фундаменты должны быть компактными, относительно небольших размеров и простой формы в плане. Как правило, под всей площадью подошвы станины делают один сплошной фундамент. Под вспомогательные устройства, жестко не связанные со станком (например, под опоры для поддержания прутка в револьверных станках), можно выполнять отдельные фундаменты. Размеры и форма верхней части фундамента назначаются в соответствии с габаритными размерами станка. Расстояния от граней колодцев анкерных болтов до наружных граней фундамента принимают не менее 100–120 мм.

Глубину заложения фундамента назначают исходя из требуемой по условиям жесткости высоты фундамента, с учетом размещения приямков, шахт для фундаментных болтов, условий примыкания фундамента к смежным подземным конструкциям, грунтовых и гидрогеологических условий. Глубину заложения выгодно принимать минимально возможной. При устройстве фундаментов с небольшими в плане, но глубокими приямками можно сократить глубину заложения, делая у приямков местное заглубление. Расстояние от нижних концов анкерных болтов до подошвы фундамента должно быть не менее 100 мм. Толщина нижней плиты монолитных фундаментов принимается в консольных частях в пределах 0,4–1 м (в зависимости от вылета консоли), а под замкнутыми углублениями не менее 0,2 м. Если по местным грунтовым условиям или по условиям размещения фундамента глубина его заложения значительно превышает минимально необходимую высоту, то для экономии бетона под фундаментом устраивают подушку из тщательно уплотненного крупнозернистого или среднезернистого песка (рис. 6.2).

Подошву фундамента, как правило, выполняют прямоугольной формы в плане и располагают на одной общей отметке. При определении размера подошвы стремятся совместить общий центр тяжести фундамента и станка (вместе с вспомогательным оборудованием) с вертикалью, проходящей через центр тяжести подошвы. Величина эксцентриситета не должна превышать 5% размера соответствующей стороны. При проектировании групповых фундаментов это требование выполняется только в направлении короткой стороны, в направлении длинной стороны эксцентриситет не оговаривается. Для армирования фундаментов применяется сталь горячекатаная (ГОСТ 5781–61) обычно класса А-1.

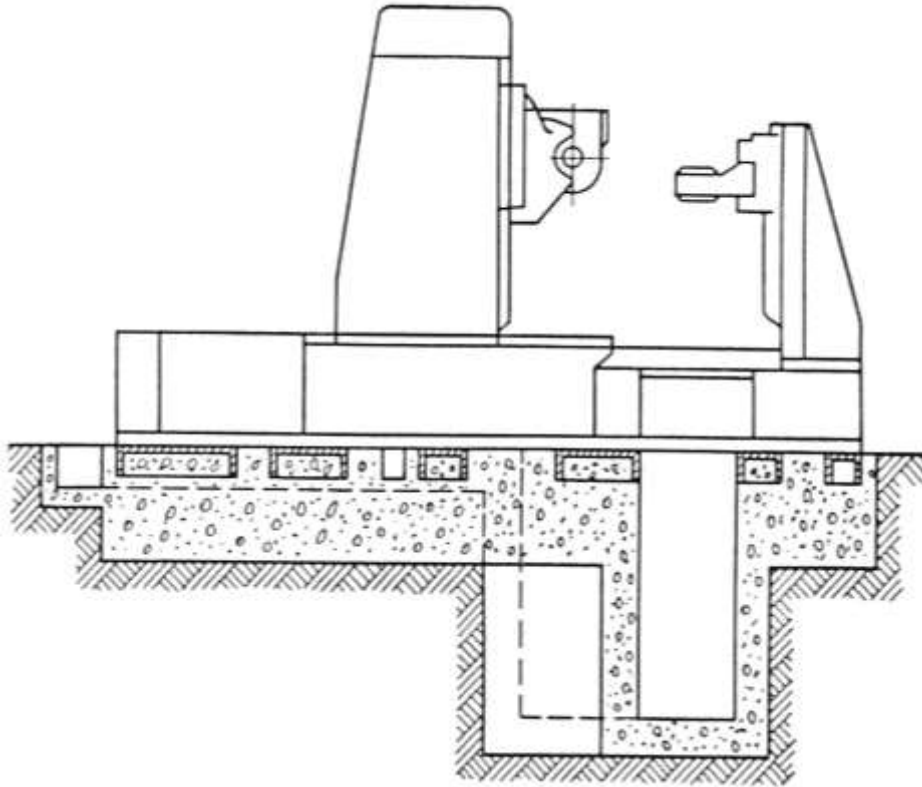


Рис. 6.2. Фундамент зубофрезерного станка

Фундаменты под станки массой более 12 т, а также под станки с повышенными динамическими нагрузками (долбежные, поперечно-строгальные и т. п.) армируют сеткой с квадратными ячейками размером  $15 \times 15$  см из круглой стали диаметром 6–8 мм, укладываемой под подошвой станины на расстоянии 20–30 мм от верхней грани фундамента. Фундамент длиной более 5 м часто армируют двумя сетками – по верху и у подошвы фундамента. Арматура, установленная в верхней части фундамента, предохраняет от появления трещин, вызванных усадочными напряжениями, а в нижней части – напряжениями растяжения при изгибе фундамента. В крупных фундаментах, в тех местах, где можно ожидать появления рабочих швов, предусматривают вертикальную арматуру.

В крупных, в частности, в групповых фундаментах устраивают температурно-усадочные швы на расстоянии 30 м. Швы следует размещать таким образом, чтобы оборудование, расположенное на разных участках фундамента, не было жестко связано между собой. В зарубежной практике для уменьшения искривления фундаментов длинных станков, вызванного изменением температуры, на поверхности фунда-

мента делают пазы глубиной 150 мм, шириной 10–15 мм на расстояниях около 1 м друг от друга.

Поверхности фундамента, подверженные воздействию агрессивных жидкостей (грунтовых вод, технических масел и т. п.), соответствующим образом защищают, например, маслостойкими покрытиями. Для стока жидкости делают соответствующие уклоны. При наличии в фундаменте приемков, опускающихся ниже уровня грунтовых вод, для защиты их от сырости применяют гидроизоляцию, в ответственных случаях металлическую.

Полы первых этажей производственных зданий проектируют в соответствии с указаниями СНиП П-В.8–71. Конструкцию пола выбирают в зависимости от условий эксплуатации – механических, тепловых, агрессивных и других воздействий. Для конструктивных элементов полов, устраиваемых на грунте, приняты следующие названия (рис. 6.3): покрытие – верхний элемент пола, непосредственно подвергающийся эксплуатационным воздействиям; подстилающий слой (подготовка) – элемент пола, распределяющий нагрузки по основанию; теплоизоляционный слой – элемент пола на грунте, уменьшающий общую теплопроводность пола. При необходимости установки станков полы с жестким бетонным подстилающим слоем выполняют с жестким подстилающим слоем. Толщину подстилающего слоя и проектную марку бетона назначают на основе проверочного расчета, проводимого по предварительно заданным значениям характеристик прочности бетона и толщины слоя [3].

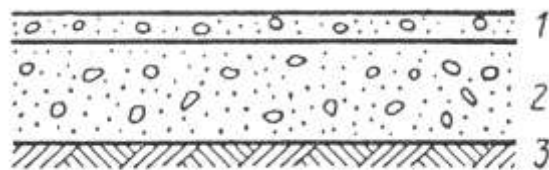


Рис. 6.3. Схема конструкции пола установки станков:

1 – покрытие; 2 – бетонный подстилающий слой; 3 – грунт

При нагрузке от станков  $5 \text{ тс/м}^2$  и более бетонный подстилающий слой рекомендуется армировать двойной сеткой из стержней диаметром 10 мм с квадратными ячейками  $15 \times 15 \text{ см}$ . В этом случае толщину пола принимают не менее 20 см. При использовании бетонного подстилающего слоя в качестве покрытия его толщина по сравнению с уста-

новленной расчетом на прочность должна быть увеличена на 20–30 мм. Марка бетона такого подстилающего слоя должна быть 300. В местах примыкания пола к деформационным швам подстилающий слой соответствующим образом армируется. При применении бетонного подстилающего слоя по основанию из некаменистого грунта производят уплотнение грунта щебнем или гравием.

Ленточные фундаменты используют для установки ряда станков и выполняют в виде сплошных полос шириной 1,5–3 м. Расчет ленточных фундаментов производят как балок на упругом основании. В первом приближении нагрузку от опор станка можно рассматривать как равномерно распределенную по ширине фундаментной балки. Расчетные характеристики бетона и коэффициенты постели грунтов основания можно принимать такими же, как при расчете плит.

## **6.2. Закрепление оборудования**

**6.2.1. Предварительное закрепление оборудования** при установке со сплошным опиранием на подливку проводят после выверки во избежание его смещения. При этом затягивают только гайки фундаментных болтов, расположенных вблизи опорных элементов, с помощью стандартных гаечных ключей без надставок. При затяжке фундаментных болтов диаметром до 24 мм усилие на ключе не должно превышать 200 Н.

При выверке оборудования с помощью упругих элементов процесс предварительной затяжки совмещают с выверкой. После предварительного закрепления контролируют положение оборудования.

**6.2.2. Окончательное закрепление оборудования**, устанавливаемого с местным или смешанным опиранием, осуществляют сразу после выверки, а устанавливаемого со сплошным опиранием на подливку – после достижения бетоном 70 % проектной прочности, о чем от строительной организации необходимо получить соответствующую справку.

Окончательно затягивать фундаментные болты следует равномерно в два-три обхода. Вначале затягивают болты, расположенные по осям симметрии опорной части, затем более удаленные от оси симметрии.

Для затяжки используют стандартные ключи, гайковерты и специальные приспособления. Можно также применять затяжку фундамент-

ных болтов вытяжкой. Для этого при заданном усилии затяжки предварительно рассчитывают вертикальное перемещение  $\Delta l$  торца болта вследствие удлинения его стержня и деформаций в зоне анкеровки. На фундамент устанавливают домкраты, выравнивая их установочные поверхности по нивелиру с занижением высотной отметки относительно заданной для опорной поверхности оборудования на величину перемещения  $\Delta l$ . Иногда выверяют оборудование, установленное на домкраты, по горизонтали и высоте с занижением на величину  $\Delta l$ , используя в качестве баз его исполнительные поверхности. Затем завинчивают гайки до их упора в станину и, используя домкраты, поднимают оборудование до проектной отметки, вытягивая фундаментные болты. В этом положении фиксируют домкраты, огораживают их опалубкой и подливают оборудование. После твердения подливки домкраты извлекают, а оставшиеся ниши заполняют бетоном.

**6.2.3. Подливка оборудования.** Подливаемые поверхности оборудования до его установки на фундаменты должны быть обезжирены и промыты чистой водой.

Все работы на подливке выполняет строительная организация под наблюдением представителя монтажной организации не позже чем через 48 ч после проверки точности выверки оборудования и оформления соответствующего акта и заявки. Поверхность фундаментов перед подливкой очищают от посторонних предметов, масел и пыли. Затем поверхность увлажняют, не допуская при этом скопления воды в углублениях и приямках.

При наличии в фундаменте съемных (анкерных) болтов перед подливкой оборудования предпринимают меры по их изоляции от сцепления с бетоном. Для этого пространство между стержнем 2 болта и стенками анкерной арматуры 4 заполняют сухим песком 5 (рис. 6.4). При наличии зазоров между анкерной плитой 8 и закладной коробкой 7 их уплотняют прокладкой 6. На верхней части стержня 2 устанавливают защитную трубку 1 с уплотняющим шнуром 3.

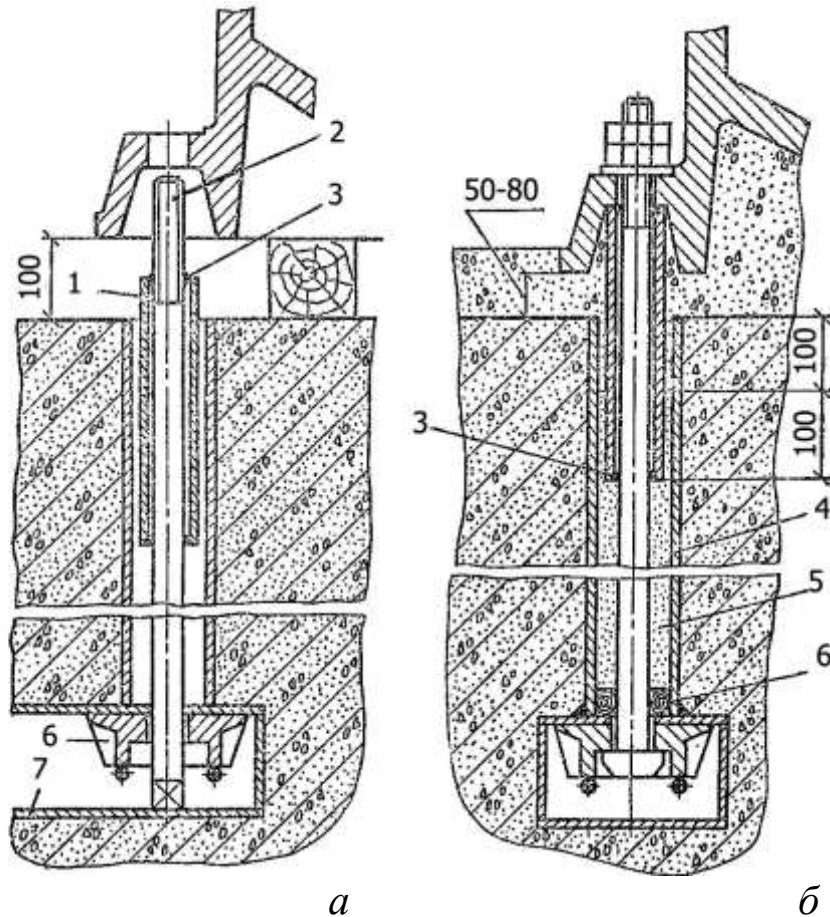


Рис. 6.4. Установка съемных болтов перед подливкой оборудования

Бетонную смесь или раствор с применением вибраторов подают через отверстия в опорной части или с одной стороны подливаемой детали до тех пор, пока с противоположной стороны смесь или раствор не достигнут уровня, на 20–30 мм превышающего высоту основной части подливки. Смесь или раствор следует подавать без перерывов. Уровень смеси или раствора со стороны подачи должен превышать уровень подливаемой поверхности оборудования не менее чем на 100 мм. Для подливки оборудования 4 (рис. 6.5) сложной конфигурации или с большой площадью опорной поверхности применяют специальные лотки-накопители 1. Подливаемое пространство огораживают опалубкой 2, а подачу бетонной смеси осуществляют с помощью вибратора 3. Во избежание усадочных деформаций смеси для подливки должны иметь осадку конуса не более 1 см и жесткость не более 10 с. Для повышения пластичности смеси на период подливки применяют специальные добавки.



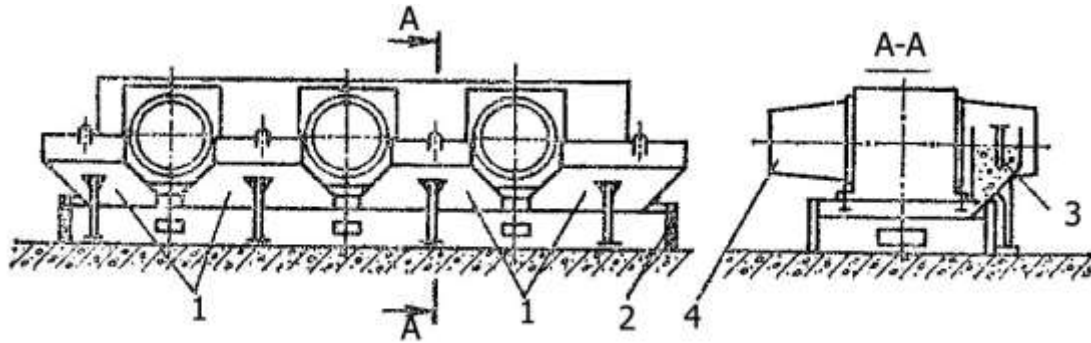


Рис. 6.5. Схема применения лотков-накопителей для подливки оборудования

Расстояние от опорной части оборудования до края слоя подливки должно составлять 100–200 мм (рис. 6.6).

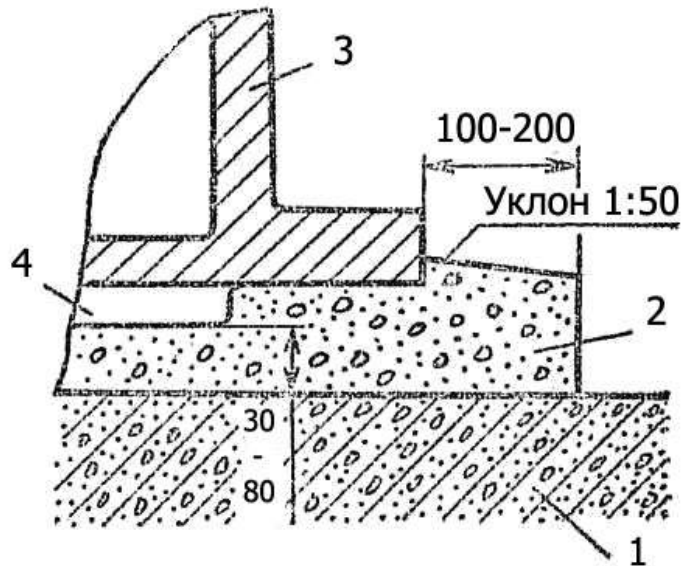


Рис. 6.6. Схема подливки оборудования

Минимальная высота слоя 2 подливки между ребрами жесткости 4 и фундаментом 1 должна быть не менее 50 мм. Высота слоя подливки, лежащего вне опорной детали, должна на 20–30 мм превышать высоту основной части подливки.

Поверхность подливки, примыкающей к опорной части оборудования 3, должна иметь уклон в сторону от оборудования, равный 1:50. Эту поверхность в течение 3 суток после подливки необходимо систематически увлажнять, а для сохранности влаги следует посыпать древесными опилками или укрывать мешковиной. После окончательного

закрепления оборудования эту поверхность при необходимости защищают специальными покрытиями.

### **6.3. Рекомендации по закреплению станков на фундаментах с помощью фундаментных болтов**

Станки на фундаменте можно закреплять с помощью фундаментных (анкерных) болтов или подливки опорной поверхности станины цементным раствором.

Наиболее надежное и жесткое закрепление обеспечивается с помощью фундаментных болтов. Нагрузки на фундаментные болты от станков по сравнению с нагрузками от других машин относительно невелики, размеры болтов, как правило, выбирают из конструктивных соображений. При выборе размеров болта можно исходить из того, чтобы напряжения в элементах опоры, в частности, по ее подошве, при затяжке болта были близки к предельно допустимым.

В зависимости от способа установки и закрепления в бетоне фундаментные болты могут быть разделены на три группы: а) глухие или заливные болты, заделанные в бетонном фундаменте; б) съемные болты, устанавливаемые в фундаменте так, что стержень болта не имеет сцепления с бетоном, а анкеровка осуществляется с помощью, например, закладных плит; в) болты, устанавливаемые в готовом фундаменте путем ввертывания в предварительно заделанные фундаментные гайки, закрепления в пазах монтажного пола или в скважинах, изготовленных на готовых фундаментах и т. п.

При закреплении с помощью глухих болтов (рис. 6.7) возможны два способа заделки болтов – либо при бетонировании фундамента оставляют специальные глубокие колодцы, которые заполняются бетоном после установки станка и размещения болтов в этих колодцах, либо болты на части длины заделываются в фундамент непосредственно при его бетонировании. При этом совпадение болта с соответствующим отверстием в станине обеспечивается деформированием стержня болта на свободной незалитой части длины [обычно примерно равной  $(5\div 6)d$ ]. Заделка болта на оставшейся свободной части длины происходит после установки станка.

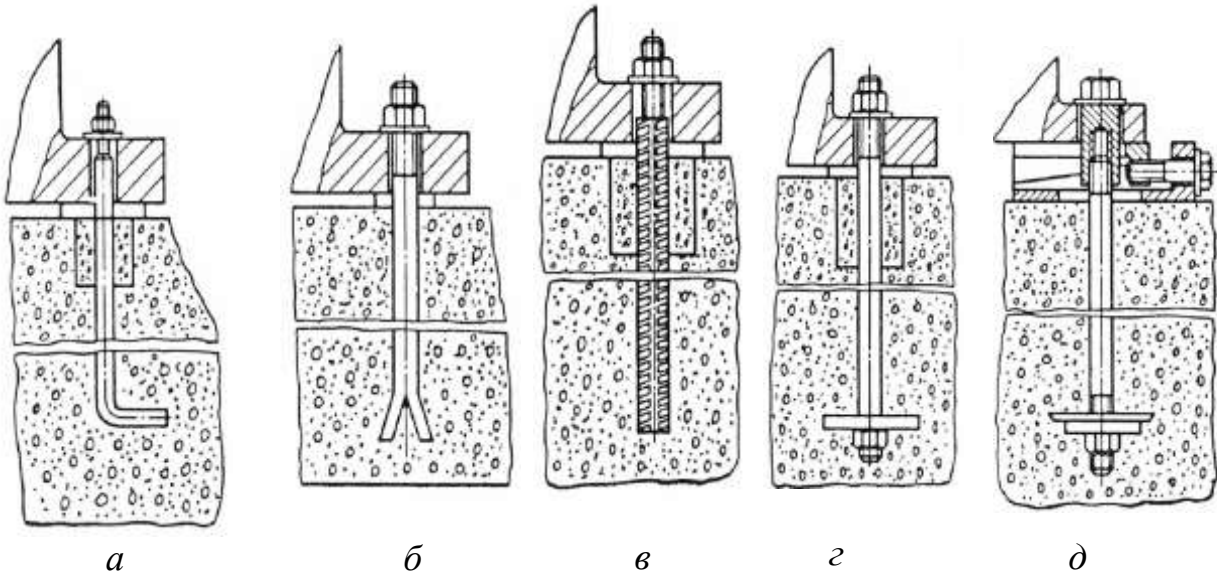


Рис. 6.7. Глухие или заливные фундаментные болты:  
*а, б* – с отгибом; *в* – из периодического проката; *г* – с анкерной плитой;  
*д* – составные с анкерной плитой

Установить болты по разметке проще, чем делать для них колодцы. Кроме того, при плохой очистке колодцев перед их бетонированием сцепление бетона в колодце с остальной частью фундамента оказывается недостаточно прочным. Но при заделке болтов в тело фундамента при его бетонировании одной из основных помех, возникающих при монтаже станка, является несовпадение осей фундаментных болтов и отверстий в станине (обычно допуск на расстояние между осями отверстий не превышает 1 мм). Поэтому необходимо обеспечить соответствующую точность расположения болтов при установке их до бетонирования фундамента, либо устанавливать болты в колодцы непосредственно при монтаже станка.

Крепление наиболее простыми глухими болтами с отгибом (рис. 6.7, *а, б*) используется для станков средних размеров при сравнительно небольших диаметрах болтов. Применять болты диаметром  $d < 14$  мм не рекомендуется. Длина заделки болтов, назначаемая из условий равной прочности болта и бетонного массива, обычно принимается  $l = (13 \div 15) d$ . Для болтов из периодического проката (рис. 6.7, *в*) или с насечками можно принимать  $l = (10 \div 12) d$ . На конце гладких болтов выполняют крюки, раздвоения (рис. 6.7, *б*), утолщения; крюк иногда зацепляется за горизонтальный металлический стержень и т. п. Форма конца болта не

имеет значения, так как прочность и жесткость соединения определяются сцеплением стержня болта с бетоном. Расстояние от болта до грани фундамента  $c \geq 4d$ ; между болтами  $c_1 \geq 6d$ .

Глухие болты с анкерной плитой (рис. 6.7, *з*) применяют для болтов  $d > 24$  мм; плиту приваривают или привертывают; размеры плиты  $a \approx 4d$ , глубина заделки  $l \approx (10 \div 12)d$ ;  $c \geq 10d$ ;  $c_1 \geq 6d$ . Для упрощения установки станков на башмаках иногда верхние концы глухих болтов располагают ниже опорной поверхности башмака; при этом болт делают составным или затягивают фигурной гайкой (рис. 6.7, *д*).

При установке тяжелых станков на индивидуальных фундаментах чаще используют закрепление станков съемными фундаментными болтами с закладными анкерными плитами или с изолирующими трубами (рис. 6.8). Анкерную арматуру заделывают в фундамент при его бетонировании. Болты, обычно больших диаметров ( $d > 30$  мм), устанавливают в гнездо при монтаже станка и соединяют с плитой на резьбе или с помощью специального замка. Для болтов с анкерными плитами размеры плиты  $a \approx (S \div 6) d$ ; глубина заделки болтов: для бетона марки 100 –  $l \approx 10d$ ; марки 200 –  $l \approx 8d$ ; марки 300 и выше –  $l \approx 5d$ , расстояние от болта до грани фундамента должно быть не менее  $15d$ . Для болтов с изолирующими трубами  $l \approx (10 \div 12) d$ ;  $c \geq 6d$ ;  $c_1 \geq 10d$ .

При установке станков на общей плите цеха или перекрытиях используют крепление болтами на монтажных полях или фундаментных плитах (рис. 6.9), а также крепление с помощью болтов, устанавливаемых в скважины на готовых фундаментах (рис. 6.10). Крепление с помощью фундаментных гаек применяют главным образом для станков средних размеров, требующих перестановки, а также в сборочных цехах. Жесткость соединения относительно невысокая. Для точных станков используют крепление на чугунных фундаментных плитах с помощью болтов, завертываемых в плиту.

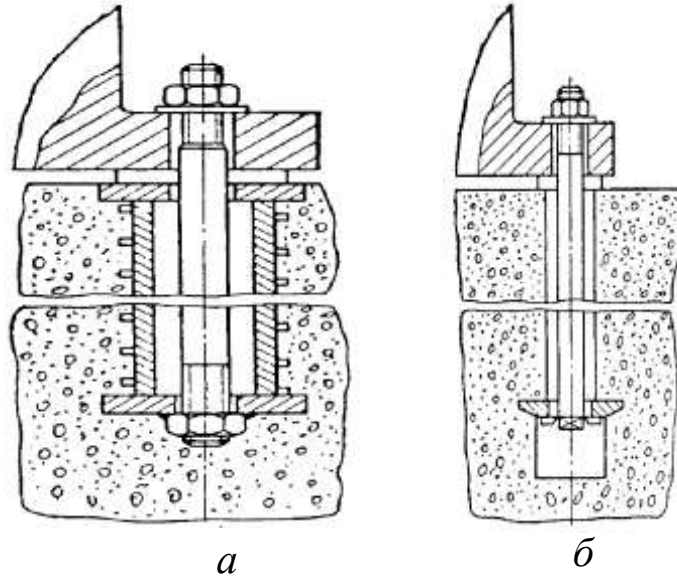


Рис. 6.8. Съёмные фундаментные болты:  
*а* – с закладкой анкерной плитой;  
*б* – с изолированием на монтажных лапах

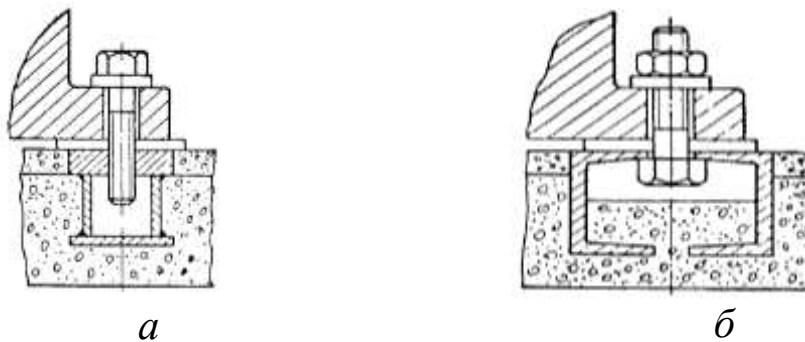


Рис. 6.9. Примеры крепления станков: *а* – из швеллеров;  
*б* – из сварных балок

Крепление с помощью болтов, устанавливаемых в скважины на готовых фундаментах, характеризуется высокой точностью и быстрой работой, связанных с установкой станка. Отверстия под болты сверлят с помощью специальных переносных станков алмазным или твердосплавным инструментом обычно по разметке (иногда удается использовать опорную часть машины как кондуктор). Могут использоваться прямые болты в виде стержня, закрепляемого в скважине с помощью эпоксидного клея или резиновой анкерной части (рис. 6.10, *а*), и конические, закрепляемые с помощью цементной зачеканки (рис. 6.10, *б*), распорных цанг или втулок (рис. 6.10, *в*).

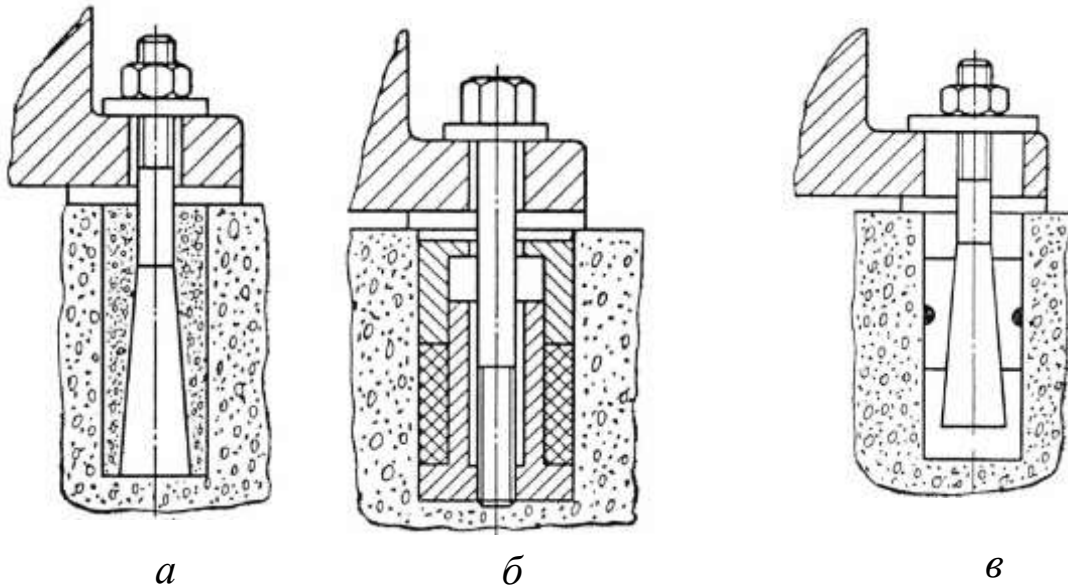


Рис. 6.10. Примеры крепления станков болтами, устанавливаемыми в скважинах на готовых фундаментах:  
*а* – прямыми болтами с резиновой анкерной частью; *б, в* – коническими болтами, закрепляемыми, соответственно, с помощью цементной зачеканки и распорных втулок

Болты на эпоксидном клее могут устанавливаться как до монтажа, так и после монтажа и выверки станка, через отверстия в опорных лапах станины. Глубина заделки болтов  $l = 10d$ ; расстояние от болта до грани фундамента  $c \geq 5d$ . Для закрепления болтов применяют эпоксидные клеи холодного отверждения. Толщина клеевого слоя для болтов  $d = 10 \div 48$  мм принимается 3–8 мм. Для равномерного распределения клея болты в отверстиях центрируют с помощью фиксирующих колец. Так как составляющие эпоксидного клея токсичны, при работе с ними должны приниматься специальные меры по технике безопасности. На станке можно начинать работать через 7 суток после установки болтов.

Конические болты, закрепляемые с помощью цементной зачеканки, заделывают на глубину  $l = 10d$ ; расстояние от болта до грани фундамента  $c \geq 10d$ . Для крепления применяют цементный раствор с водоцементным отношением 0,15 из цемента марки не ниже 300. Болты можно вводить в эксплуатацию через 10 суток с момента заделки.

Конические болты с распорными цангами или втулками позволяют эксплуатировать станок сразу же после установки болтов. Глубина заделки этих болтов  $l = (7 \div 8)d$ . Для образования отверстий в фундаментах под конические болты с распорными цангами, требующих жестких

допусков на диаметр отверстия, применяют станки алмазного сверления. С помощью болтов с распорными цангами закреплена значительная часть станков, установленных на ВАЗе. При креплении станков на монтажных полах или фундаментных плитах иногда для увеличения демпфирования под опоры подкладывают прокладки из неметаллических материалов.

Следует считать целесообразной затяжку фундаментных болтов со значительными силами. Во избежание пластических деформаций в бетоне напряжения в элементе, заделанном в бетон (в болте или в трубе), не должны превышать  $500 \text{ кгс/см}^2$ . Для болтов из арматурной стали эти напряжения могут приниматься более высокими [3]. Напряжения в теле болта должны быть  $1000\text{--}1400 \text{ кгс/см}^2$ . Давления на поверхности контакта опоры и фундамента от веса станка и затяжки болта не должны превышать  $80 \text{ кгс/см}^2$ , а для станков с динамическими нагрузками  $40\text{--}50 \text{ кгс/см}^2$ .

Максимальные крутящие моменты  $M_k$  при затяжке болтов не должны превышать следующих значений:

Диаметр болта	M12	M16	M20	M24	M30	M36	M42
$M_k$ , кгс·м	1,9	4,5	9,1	14	35	60	90

При установке станка на клиньях или подкладках применяют крепление к полу с помощью подливки – бетонирования монтажного зазора между поверхностью фундамента и подошвой станка. Подливают также основания регулируемых опор при установке станков с креплением болтами. Подливку осуществляют после установки и выверки станка. Минимальный зазор между фундаментом и подошвой станины должен быть не менее  $50\text{--}80 \text{ мм}$ . Чем шире опорная поверхность станины, тем больше должен быть зазор. Для получения высокой прочности подливки поверхность фундамента под станком насекается. Для подливки применяют пластичный бетон, желательно марки не менее 200. Если оставленный зазор менее  $50 \text{ мм}$ , то используют малоусадочные растворы (состава 1:4:5) на цементах марки  $400\text{--}500$ . Перед подливкой поверхность фундамента очищают, обдувая сжатым воздухом и увлажняют. Вокруг станины на расстоянии от ее контура не меньше двойной высоты оставленного зазора делают деревянную рамку и пространство, ограниченное рамкой, заполняют пластичным бетоном, подливая его под станину. Часть подливки, окружающую опорную поверх-

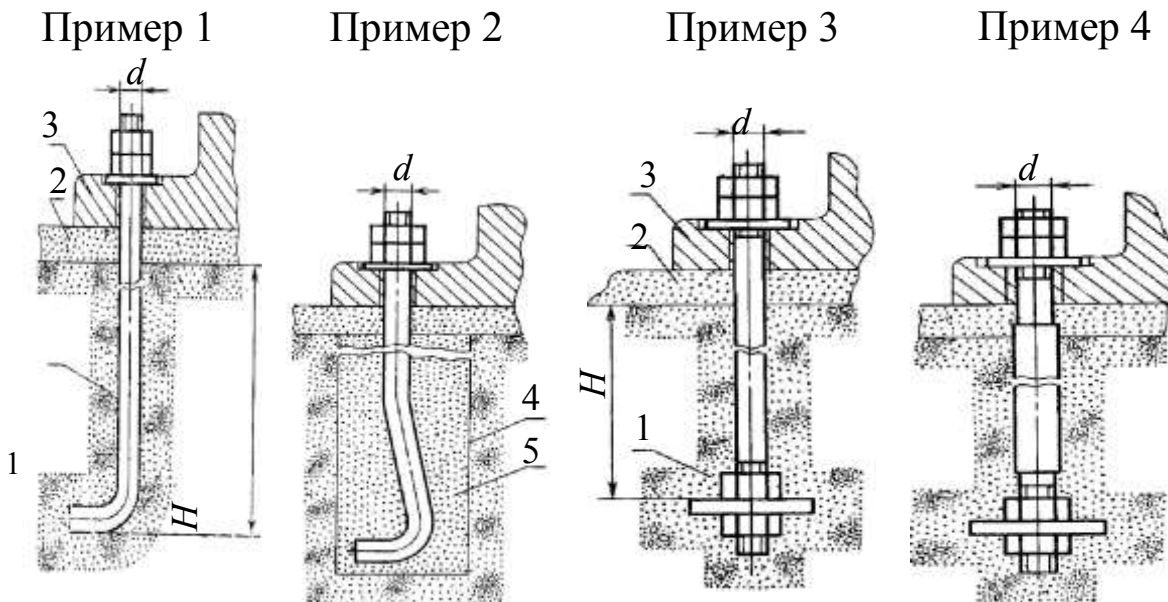
ность станины, поднимают над уровнем подошвы станины не менее чем на 30 см. Во избежание усадки подливки и образования зазоров в соединении можно применять расширяющиеся цементы или соответствующие добавки.

Поскольку станок, не закрепляемый болтами, выверяется до подливки, точность установки определяется регулировкой опор. Подливка не должна вызывать перераспределения нагрузки в опорах, так как иначе точность установки после подливки нарушится.

Высокая динамическая жесткость соединения станка с фундаментом обеспечивается при установке на жесткие опоры и подливке битумом. Битум эластичен и прочно пристает к станине и фундаменту. Перед подливкой пол смачивают инертным маслом и затем осуществляют подливку в заготовленную заранее опалубку. Через 24 ч битум твердеет. Соединение не нарушается даже при повторных выверках станка. Подливку битумом применяют редко, главным образом из-за трудности очистки станка и пола от битума при перестановке станка.

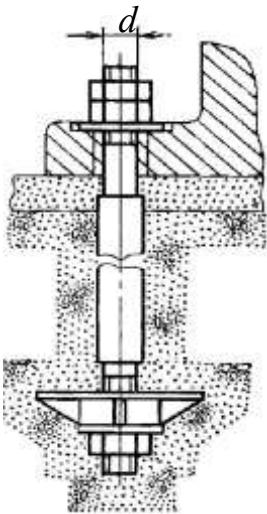
#### 6.4. Примеры установки болтов в фундамент

1. Болты изогнутые исполнения 1 устанавливаются до бетонирования фундаментов (пример 1, рис. 6.11).

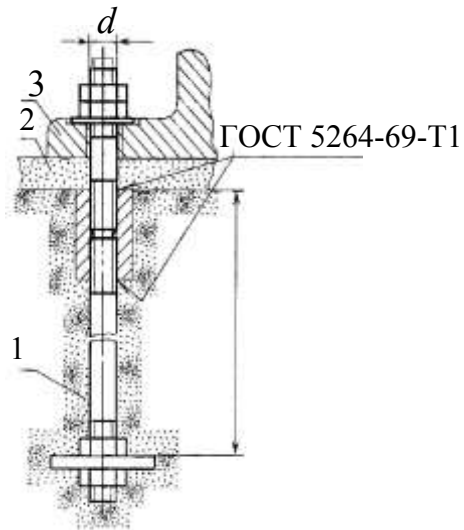




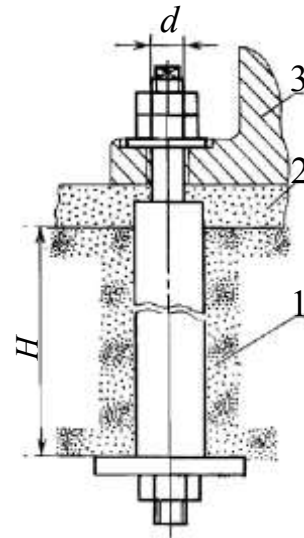
Пример 5



Пример 6



Пример 7

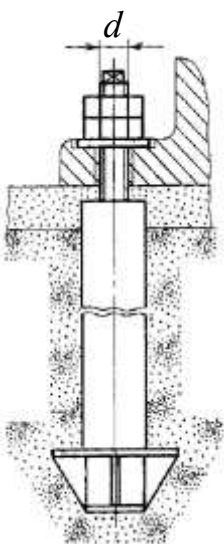


6.11. Примеры установки болтов в фундамент:

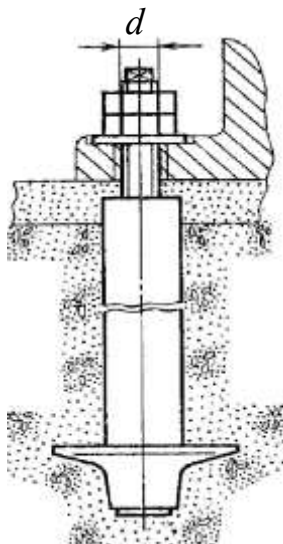
1 – фундамент; 2 – подливка; 3 – оборудование или строительная конструкция; 4 – колодец; 5 – бетон на мелком заполнителе;

6 – скважина; 7 – клеевой состав; 8 – цементно-песчаная смесь; 9 – цементный раствор

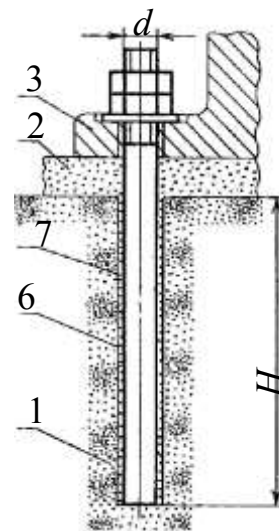
Пример 8



Пример 9



Пример 10



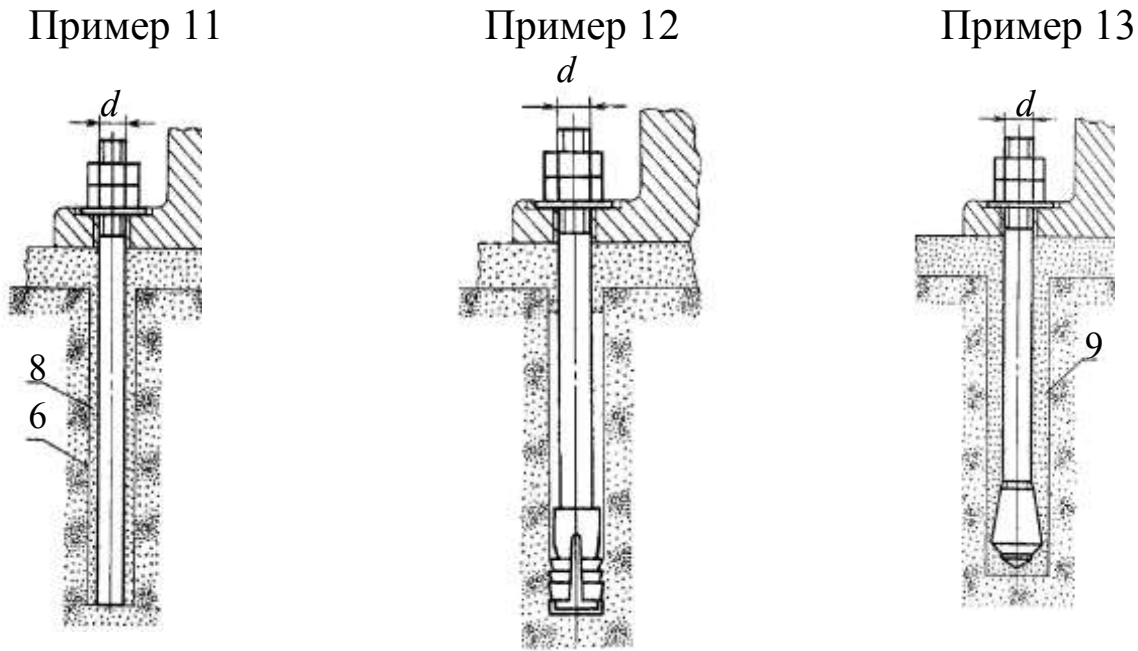


Рис. 6.11. Продолжение

2. Болты изогнутые исполнения 2 устанавливаются в колодцах готовых фундаментов с последующим заполнением колодцев бетоном (пример 2, рис. 6.11).

3. Болты с анкерной плитой исполнений 1–3 устанавливаются до бетонирования фундаментов (примеры 3, 4 и 5, рис. 6.11).

4. При установке составных болтов исполнений 1 и 2 нижняя шпилька, совместно с муфтой и анкерной плитой, устанавливается до бетонирования фундамента. Верхняя шпилька ввертывается в муфту и прихватывается сваркой после установки оборудования (пример 6, рис. 6.11), которое монтируется методом поворота или надвигки.

5. При установке съемных болтов исполнений 1–3 анкерная арматура устанавливается до бетонирования фундаментов, а шпильки – после устройства фундамента (примеры 7–9, рис. 6.11).

6. Болты прямые и с коническим концом исполнений 1–3 устанавливаются в просверленные скважины готовых фундаментов.

Болты прямые закрепляются с помощью эпоксидного или силиконового клеев (пример 10, рис. 6.11) или виброзачеканкой цементно-песчаной смесью (пример 11, рис. 6.11).

Болты с коническим концом закрепляются с помощью разжимной цанги (пример 12, рис. 6.11) или цементным раствором при вибропогружении в него шпильки болта (пример 13, рис. 6.11).

7. Глубина заделки болтов в бетон (размер  $H$ ), состав и марка бетона фундаментов, цементно-песчаной смеси, цементного раствора и клея назначаются в соответствии с действующими нормативными документами, утвержденными в установленном порядке.

## **7. УСТАНОВКА СТАНКОВ НА ВИБРОИЗОЛИРУЮЩИЕ ОПОРЫ**

### **7.1. Выбор виброизолирующих опор**

Для получения деталей с высокой точностью и чистотой поверхности необходимо изолировать высокоточные станки и станки нормальной точности от вибрации, передающейся от соседнего оборудования, проходящего транспорта и т. п. Наиболее целесообразный способ виброизоляции станков с жесткими станинами – установка их на виброизолирующие опоры. При размещении станков на перекрытиях промышленных зданий этот метод виброизоляции является единственно возможным. Виброизоляция станков возможна при установке их на виброизолирующие опоры, коврики и на специальные виброизолирующие фундаменты.

Установка станка на виброизолирующие опоры должна обеспечить надежную его защиту от внешних вибраций и ударов, создающих в месте установки станка вибрационный фон среднего уровня интенсивности, т. е. регулярные колебания основания в вертикальном и горизонтальном направлениях с амплитудами до 2,5 мкм в частотном диапазоне 1–30 Гц или импульсные колебания (от ударного воздействия молотов и т. п.) с амплитудами до 12 мкм при периоде импульсов  $T \geq 0,04$  с.

При установке станков на виброизолирующие опоры сокращаются затраты на монтаж и перестановку станков, уменьшаются динамические нагрузки на несущие конструкции зданий и уровень колебаний оснований.

Разработанные ЭНИМСом совместно с НИИ резиновой промышленности оригинальные конструкции виброизолирующих опор ОВ–30 и ОВ–31 и резиновых виброизолирующих ковриков КВ–1 и КВ–2 (ГОСТ 17725–81 и ГОСТ 17712–72) используют для виброизоляции металлорежущих станков разных типов и других машин и приборов.

Виброизолирующие опоры ОВ–30 и ОВ–31 предназначены для установки станков с жесткими станинами (т. е. такими, для которых  $\frac{l}{h} = 4 \div 5$ , где  $l$  – длина станины,  $h$  – высота сечения станины) весом до 10–15 т.

Опоры для установки станков основных типов выбирают по номограмме рис. 7.3, габаритные размеры опор даны в табл. 7.1.

Частота собственных колебаний станка на опорах ОВ–31 мало зависит от нагрузки на опору, благодаря чему отпадает необходимость рассчитывать нагрузки на опорные точки, уменьшается номенклатура опор (требуется 1 типоразмер для большинства высокоточных станков) и улучшается качество виброизоляции.

При использовании опор типа ОВ–30 необходимо предварительно рассчитать распределение весовой нагрузки станка по опорным точкам, для чего вначале определяют положение центра тяжести станка, а затем, исходя из уравнений равновесия и из того факта, что все опоры находятся в одной плоскости (опорная плоскость станины станка), определяют опорные реакции (пример расчета опорных реакций и подбора опор приведены ниже).

Таблица 7.1

Габаритные размеры опор

Тип опоры	Размеры, мм		Диаметр болтов
	$D_1$	$d$	
ОВ–31	142	45	M16
ОВ–30–1–1 ОВ–30–1–2 ОВ–30–1–3	105	43	M12
ОВ–30–2–2 ОВ–30–2–3	140	46	M16
ОВ–30–3–2 ОВ–30–3–3	180	50	M20

Конструкции и параметры виброизолирующих опор и ковриков приведены на рис. 7.1 и в табл. 7.2.

ОВ-31

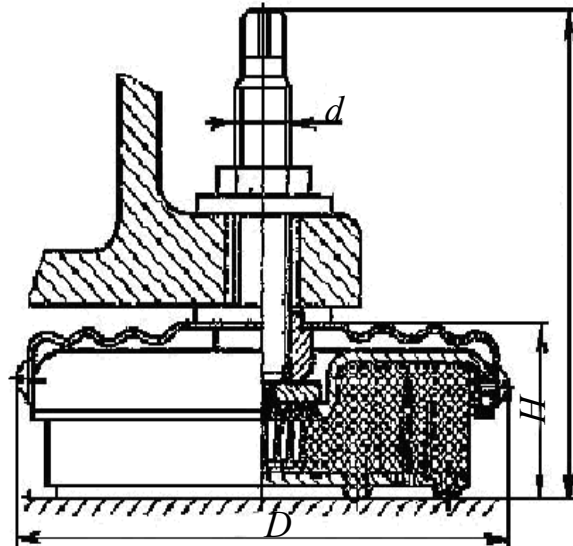


Рис. 7.1. Конструкции виброизолирующих опор ОВ-31 и ОВ-30

ОВ-30

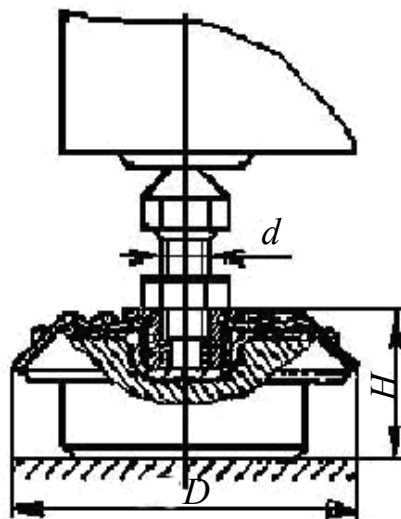


Рис. 7.1. Продолжение

Таблица 7.2

Параметры виброизолирующих опор

Параметры	ОВ-30-2		ОВ-30-3		ОВ-31	ОВ-30-1		
	1	2			1	1	2	3
Нагрузка, Н:					1	2		
номинальная	5 600	8 700	12 500	18 500			300	500
максимальная	15 000	23 000	42 000	50 000				1
мини-	0	0	0	0		000	0 000	

Параметры	ОВ-30-2		ОВ-30-3		ОВ-31	ОВ-30-1		
	1	2			1	1		3
мальная	2 500	4 000	6 300	000			000	600 1
Диаметр опоры $D$ , мм	140		180		142	105		
Высота опоры $H$ , мм	46		50		45	180		
Диаметр винта $d$ , мм	16		20		16	12		
Высота регулирования, мм	15				15	10		
Масса, кг	1,535	1,215	3,00	2,60	1,82	0,705	0,745	0,655

Оборудование, установленное с виброизоляцией, обычно не закрепляют. Для его установки применяют виброизолирующие опоры, прокладки и коврики различной жесткости (рис. 7.2, табл. 7.3).

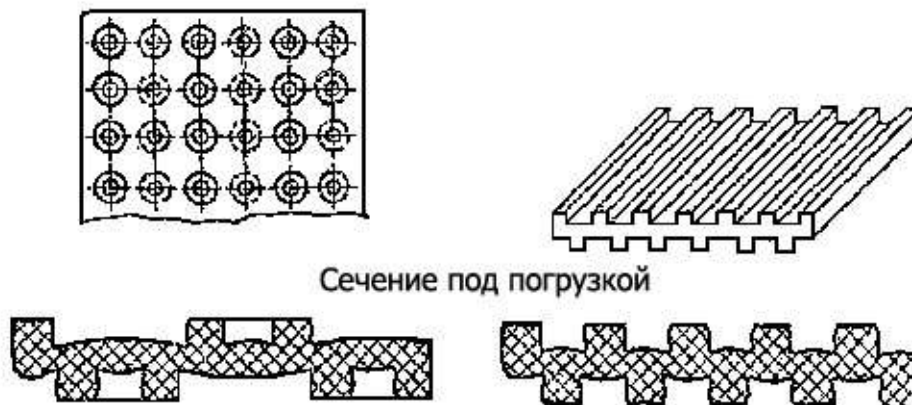


Рис. 7.2. Виброизолирующие коврики

Таблица 7.3

**Параметры виброизолирующих ковриков**

Параметр	KB1-1	KB1-2	KB1-3	KB2-1	KB2-2	KB2-3
Высота, мм	21				26	
Размеры, мм	350×350					
Характеристика деформации: сжатие, мм	1,4				1,8	2,1
Отношение продольной жесткости к вертикальной	1,5	1,1	1,3	1,8	0,6	1,3
Отношение поперечной жесткости к вертикальной				1,1		

Пол или фундамент в местах расположения опор выравнивают по горизонтали и зачищают. При установке оборудования на виброизолирующих опорах их обычно предварительно прикрепляют к удерживаемой на весу станине. После опускания оборудования на фундамент регулированием винта выверяют оборудование по уровню и равномерно загружают опоры. В связи с тем, что на виброизолирующих опорах обычно устанавливают отдельно стоящее оборудование, не связанное между собой кинематически, выверку в плане практически не проводят.

Виброизолирующие прокладки и коврики предварительно укладывают на тщательно выровненный по горизонтали пол. Так как при этом выверка оборудования весьма затруднена, часто используют установку оборудования с регулируемыми опорами, размещенными между станиной и ковриком (рис. 7.3).

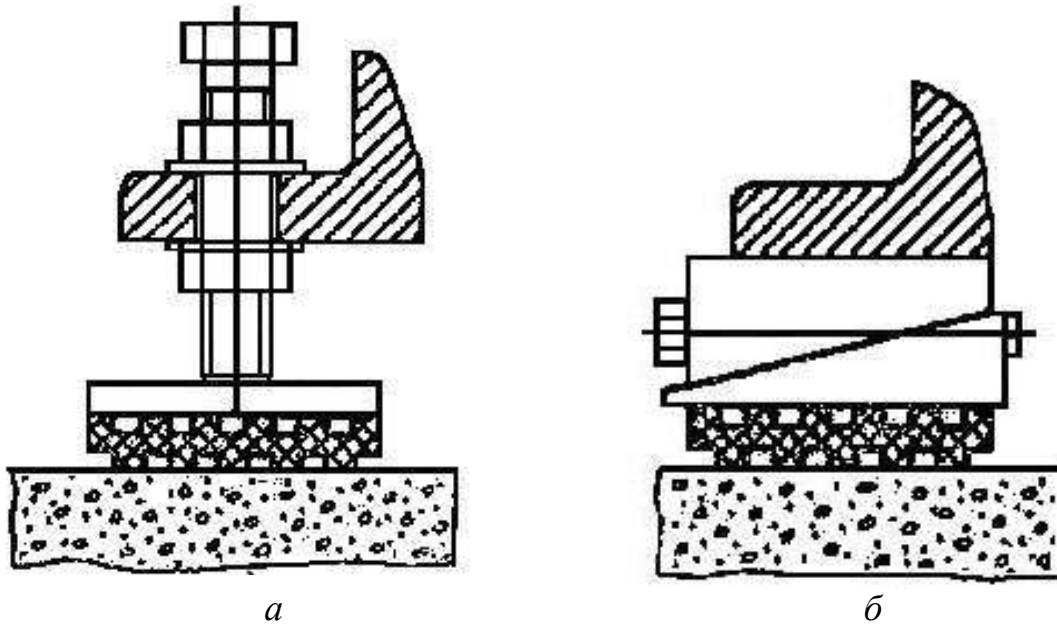


Рис. 7.3. Установка оборудования на виброизолирующих ковриках с применением отжимных винтов (*а*) и регулируемых клиновых подкладок (*б*)

Для уменьшения горизонтальных колебаний оборудования виброопоры крепят к станине гайкой-втулкой (рис. 7.4, *а*) или обычными гайками с фиксирующими втулками (рис. 7.4, *б*).

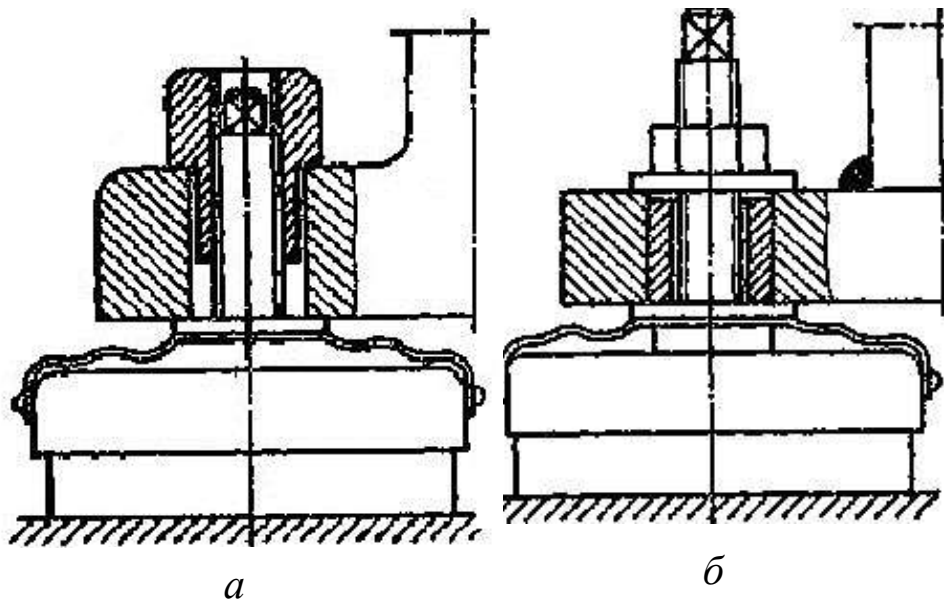


Рис. 7.4. Установка оборудования на виброизолирующих опорах с креплением: *а* – гайкой-втулкой; *б* – фиксирующей втулкой



Применение виброизолирующих опор и ковриков значительно упрощает установку и выверку, часто позволяет отказаться от устройства фундаментов и устанавливать оборудование непосредственно на пол или перекрытия, что дает значительный экономический эффект.

## 8. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ОПОРНЫХ РЕАКЦИЙ И ВЫБОРА ОПОР

Пример расчета опорных реакций для плоскошлифовального станка 3В71М.

Из-за симметричности системы (рис. 8.1) реакции в точках В и Д, а также в точках А и Е попарно равны между собой, т. е.

$$P_B = P_D; \quad P_A = P_E. \quad (8.1)$$

Уравнения статического равновесия (сумма опорных реакций равна весу; Сумма моментов относительно линии, проходящей через А и Е, равна нулю).

$$2P_D + 2P_B + P_C = G = 1900 \text{ кг} \quad (8.2)$$

$$2P_D \cdot 640 + P_C(640 + 390) - G(640 + 390 - 630) = 0$$

Для составления недостающего уравнения рассматриваем деформацию опор в плоскости, проходящей через С и ц. т. Принимая, что жесткость станины значительно больше жесткости опор, получаем уравнение перемещений в виде:

$$D_C - D_A / D_B - D_A = 640 - 390/640 - 1,6 \quad (8.3)$$

или, так как

$D_C = P_C / K_C$  ;  $D_B = P_B / K_B$  ;  $D_A = P_A / K_A$ , где  $K_A = K_B + K_C$  – жесткости опор, которые мы принимаем одинаковые, то

$$P_C - P_A / P_B - P_A = 1,6 \text{ или } 0,6P_A - 1,6P_B + P_C = 0$$

Решая совместно (8.1), (8.2), (8.3), находим, что  $P_A = 430 \text{ кг}$ ,

$P_B = 395 \text{ кг}$ ,  $P_C = 125 \text{ кг}$ ,  $P = 130 \text{ кг}$ .

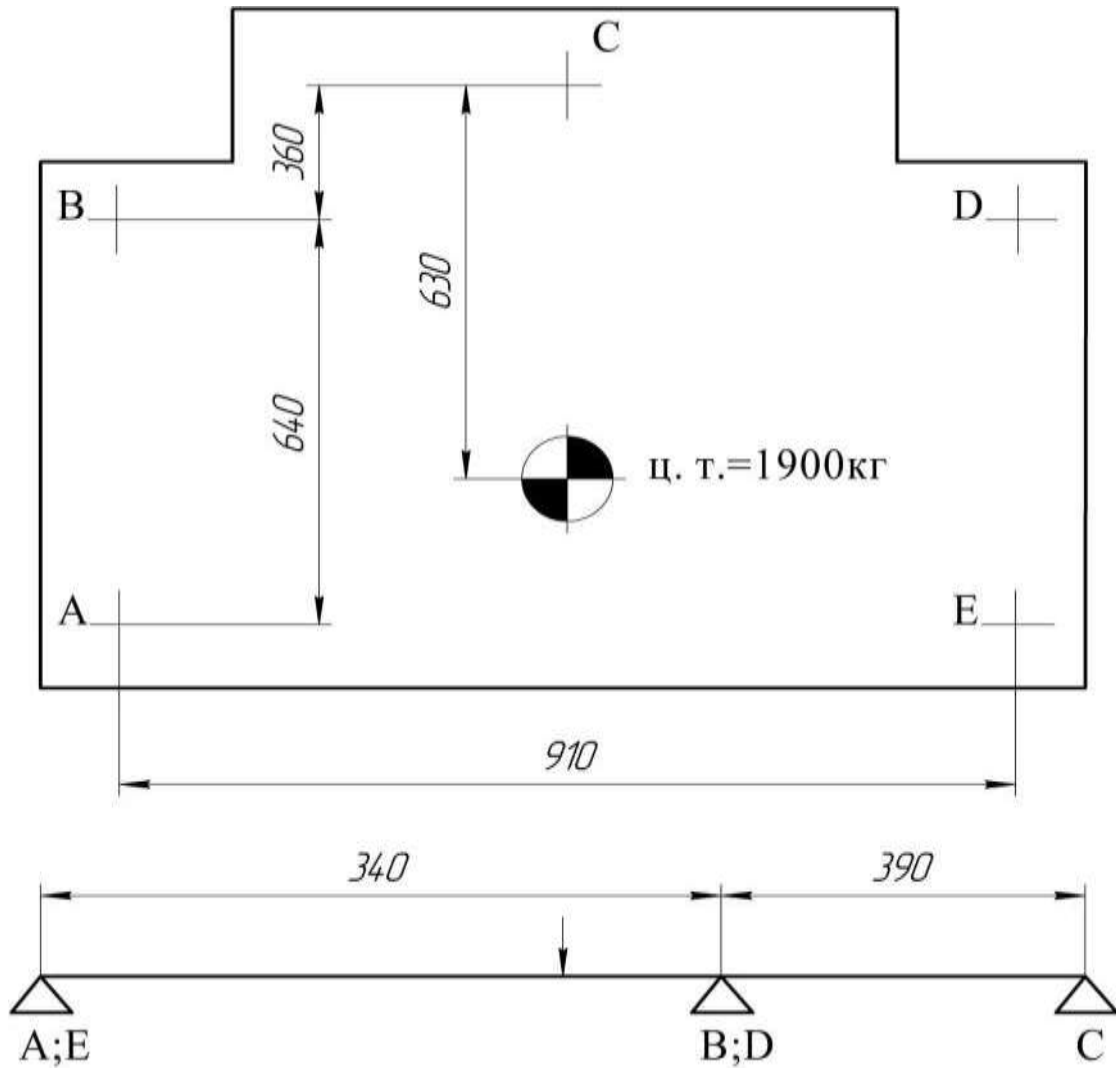


Рис. 8.1. Распределение опорных реакций станка

Выбор виброизолирующих опор для установки токарно-винторезного станка, повышенной точности IE IM.

Вес станка  $G = 1650$  кг, план фундамента с указанием центра тяжести (ц. т.) приведена на (рис. 8.2).

Количество опор (четыре) зависит от имеющихся в станине отверстий под фундаментные болты. Для установки станка выбраны ОВ-30.

Для уменьшения разборки необходимо, во-первых, надежно закреплять контргайки на опорах и, во-вторых, проводить повторную выверку станка по уровню через 3–4 дня после его установки на виброизолирующие опоры.

При обработке неуравновешенных заготовок на токарных станках, установленных на виброизолирующие опоры, возникают интенсивные колебания станка, поэтому станок балансируют установкой противовес-

сов. При установке на опоры станков, работающих с реверсами, может возникнуть значительная раскачка станка.

При установке станков на перекрытиях или при интенсивных колебаниях оснований с частотой, близкой к собственной, иногда наблюдается резонансное усиление колебаний станка. В таких случаях целесообразно переставить станок на опоры, обеспечивающие изменение значения собственной частоты колебаний станка.

При тяжелых режимах обработки (обдирка, обработка стыкованных заготовок и т. п.) в некоторых случаях при установке станков на виброизолирующих опорах наблюдается недопустимая раскачка станка или возникают вибрации при меньших объемах металла, чем при установке на жестких опорах.

В этих случаях необходимо изменить режим работы и (или) переставить станок на опоры, обеспечивающие большое значение собственной частоты  $f_z$ . если эти меры не обеспечивают устойчивую работу станка, его следует переставить на жесткие опоры и подлить цементным раствором.

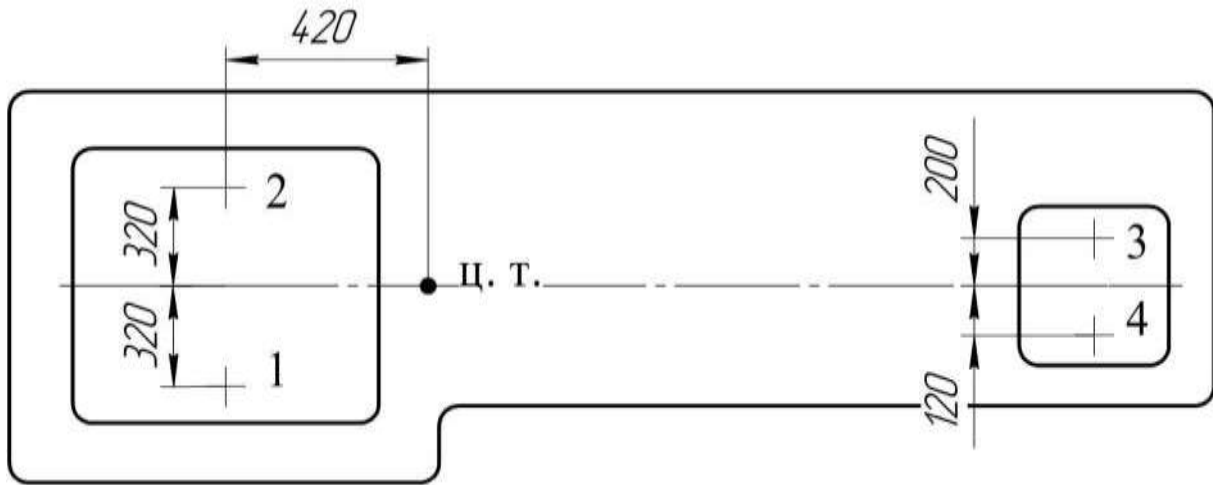


Рис. 8.2. План фундамента станка с указанием центра тяжести

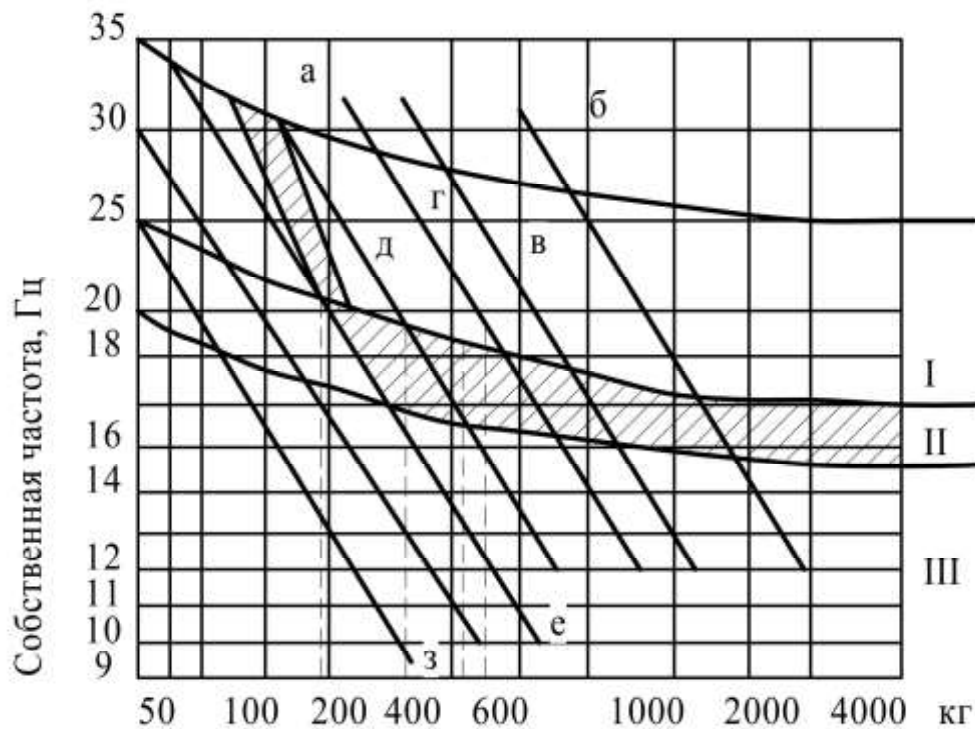


Рис. 8.3. Номограмма для подбора опор при установке станков.

а – ОВ-31; б-ОВ-30-3-3; в-ОВ-30-3-2; г-ОВ-30-2-3; д-ОВ-30-2-2;  
е-ОВ-30-1-3; ж-ОВ-30-1-3; з-ОВ-30-1-1.

## 9. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

9.1. Изучить теоретические вопросы установки металлорежущих станков на фундамент и виброизолирующие опоры.

9.2. Для конкретной модели металлорежущего станка (по указанию преподавателя) выбрать способ установки станка и разработать установочный чертеж.

9.3. Оформить отчёт по работе.

## 10. СОСТАВЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчёт выполняется на отдельных листах А4 (ГОСТ 2.10595) объемом 10–15 стр. В отчёте должно быть обоснован выбор способа установки станка на фундамент или виброизолирующие опоры, описан способ установки станка и приведен эскиз установленного чертежа станка.

## **11. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какие вопросы необходимо учитывать при выборе способа установки станка.
2. Приведите рекомендации по установке станков нормальных, повышенной и высокой точности.
3. Как производится установка станков на фундамент и виброизолирующие опоры?
4. Как разрабатывается установочный чертёж станка?

## **12. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА**

1. Подготовить отчёт по лабораторной работе (1,5 часа).
2. Подготовиться к защите лабораторной работы по контрольным вопросам.
3. Ознакомится с установочными чертежами металлорежущих станков, используя литературу.