НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ

# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Курс лекций

Новосибирск 2020

УДК 621.9
ББК 34.5
К 647

*Кафедра надежности и ремонта машин*

Составитель: *М.Е. Перфилов* канд. техн. наук, доц.

Рецензент: *И.В.Тихонкин* канд. техн. наук, доц.

**Материаловедение и технология конструкционных материалов**: Курс лекций / Новосиб. гос. аграр. ун-т. Инженер. ин-т.; сост.: М.Е. Перфилов, Е.В. Агафонова. – Новосибирск, 2020. – 188 с.

В методических указаниях по дисциплине «Материаловедение и технология конструкционных материалов» представлен краткий курс лекций по основным разделам и темам дисциплины.

Курс лекций предназначен для студентов Инженерного Института, обучающихся по направлениям подготовки Агроинженерия, Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов, Технология транспортных процессов, Профессиональное обучение (по отраслям), Техносферная безопасность, Стандартизация и метрология.

Утвержден и рекомендован к изданию методическим советом Инженерного института (протокол №7 от 1 марта 2020г.).

© Новосибирский государственный аграрный университет, 2020
© Инженерный институт, 2020

# ВВЕДЕНИЕ

Предмет «Материаловедение и технология конструкционных материалов» является одним из профилирующих и одновременно комплексных предметов, изучаемых студентами многих специальностей очного и заочного отделений.

В объеме данной дисциплины студентам необходимо изучить основные вопросы, связанные с применяемыми в сельском хозяйстве материалами, в том числе, с использованием самых современных технологий, ознакомиться с процессами получения заготовок различными методами, и дальнейшей их обработкой на металлорежущем оборудовании, что необходимо для современной постановки вопросов ремонта техники в АПК.

Изучение данной дисциплины является особенно актуальным, учитывая то, что материаловедение и технология конструкционных материалов служат базой для изучения специальных дисциплин, таких, как сопротивление материалов, детали машин, технология сельскохозяйственного машиностроения и др.

В представленном курсе лекций сделана попытка в сжатой форме представить материал, необходимый для изучения и понимания основных вопросов и разделов дисциплины.

## *Лекция 1.* МЕХАНИЧЕСКИЕ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

### *Производство цветных и черных металлов*

*Металлы* – кристаллические вещества, обладающие прочностью, пластичностью (ковкостью), электропроводностью, теплопроводностью и блеском.

*Технические металлы* – это сплавы, образованные за счет примесей, которые во многих случаях вводят специально.

*Сталь и чугун* – черные металлы (при содержании <2% углерода (С) и >2% С соответственно).

*Цветные металлы* – медь, алюминий, магний, цинк, олово, свинец, титан и их сплавы.

Получение металлов, как черных, так и цветных, основано на металлургическом производстве – области науки, техники и отрасли промышленности, охватывающей различные процессы получения металлов из руд или других материалов, а также процессы, способствующие улучшению свойств металлов и сплавов.

### 1. Механические свойства металлов и сплавов

Механические свойства характеризуют работоспособность металла.

*Прочность* – способность металла под воздействием внешних сил не разрушаться. В зависимости от направления внешних сил различают прочность при растяжении, сжатии, изгибе.

*Твердость* – характеризует сопротивление металла проникновению в него другого тела.

Под воздействием внешних сил металл меняет свою форму и размеры – деформируется.

*Два вида деформаций* – упругие, которые после прекращения действия сил исчезают, и пластические (остаточные), которые после действия сил остаются в металле.

Эти свойства характеризуют статические характеристики металлов при воздействии постепенно приложенных или медленно возрастающих сил.

Возможны и *динамические нагрузки* – быстро возрастающие, или мгновенно приложенные ударные силы.

*Вязкость* – характеризует способность металла под ударными нагрузками пластически реформироваться, не разрушаясь.

*Хрупкость* – свойство металла разрушаться под ударными нагрузками без заметных пластических деформаций.

Все детали машин должны обладать определенной прочностью и упругостью, а также пластичностью и вязкостью.

Эти свойства проверяются механическими испытаниями, основные из них: испытания на растяжение, на удар и на твердость (сжатие, изгиб, кручение, циклическое нагружение и др.).

### 1.1. Испытания на растяжение

Вырезают из металла образец, вставляют в зажимы разрывной машины и подвергают растяжению под действием постепенно возрастающих нагрузок.

Напряжение (нагрузка на единицу площади поперечного сечения) :

$$\sigma = P / F_0, \text{ МН / м}^2 \text{ (кгс / мм}^2\text{)}$$

где $P$ – нагрузка, МН (кгс); $F_0$ – площадь поперечного сечения образца, м$^2$ (мм$^2$).

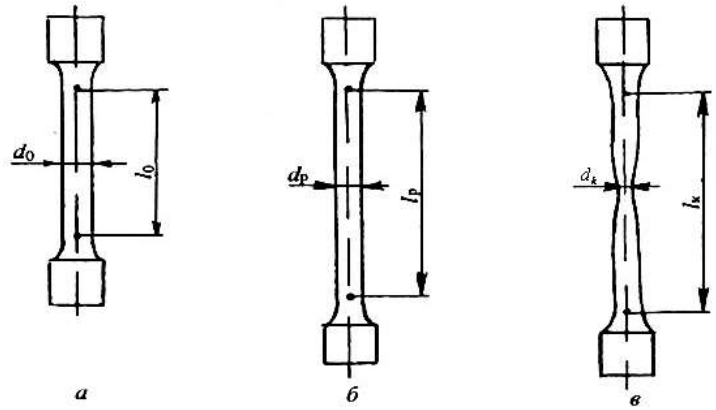



*Рис. 1. Схемы цилиндрического образца на различных стадиях растяжения: а – образец до испытания ($l_0$ и $d_0$ – начальные расчетные длина и диаметр), б – образец, растянутый до максимальной нагрузки ($l_p$ и $d_p$ – расчетные длина и диаметр образца в области равномерной деформации); в – образец после разрыва ($l_k$ – конечная расчетная длина; $d_k$ – минимальный диаметр в месте разрыва)*

При напряжениях, превышающих предел упругости, наряду с упругими возникают и пластические деформации. Далее наступает момент, когда материал пластически деформируется без дальнейшего увеличения нагрузки, т.е. наблюдается текучесть материала.

Минимальное напряжение, при котором начинается текучесть, называется пределом текучести:

$$\sigma_T = \frac{P_B}{F_0}, \text{ МН/м}^2 \text{ (кгс/мм}^2\text{)},$$

где $P_T$ – минимальная нагрузка, при которой появляется текучесть материала.

При максимальном значении нагрузки деформация сосредоточивается на участке, близком к середине образца, где происходит пластическое удлинение, площадь поперечного сечения уменьшается, нагрузка падает и происходит разрушение образца. Напряжение при наибольшей нагрузке перед разрушением образца:

$$\sigma_B = \frac{P_B}{F_0}, \text{ мн/м}^2 \text{ (кгс/мм}^2\text{)},$$

называется пределом прочности при растяжении.

***Диаграмма растяжения малоуглеродистой стали***

Условное напряжение, при котором остаточные деформации впервые достигают некоторой малой величины, называются пределом упругости:

$$\sigma_{уп.} = \frac{P_e}{F_0},$$

где $P_e$ – нагрузка, соответствующая пределу упругости; $F_0$ – площадь поперечного сечения образца.

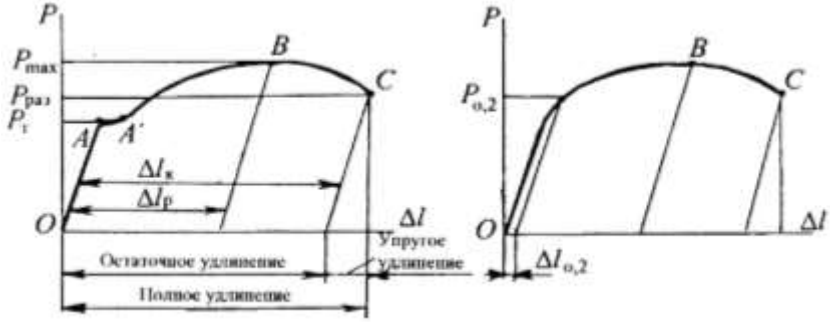



*Рис. 2. Схема машинных (первичных) диаграмм растяжения пластичных материалов: а – с площадкой текучести; б – без площадки текучести*

Абсолютное удлинение образца после разрушения:

$$\Delta\lambda = \lambda_k - \lambda_o, \text{ м},$$

где $\ell_к$ – конечная длина образца; $\ell_o$ – начальная длина образца.

Относительное удлинение:

$$\delta = \frac{\lambda_k - \lambda_0}{\lambda_0} \cdot 100\%$$

Относительное сужение образца после испытания:

$$\psi = \frac{F_o - F_k}{F_o} \cdot 100\%$$

Упругость металла характеризуется показателем $\sigma_{уп}$, прочность – $\sigma_т$ и $\sigma_в$ пластичность – $\delta$ и $\psi$.

## 1.2. Испытания на твердость

***Твердость*** – свойство материала оказывать сопротивление контактной деформации или хрупкому разрушению при внедрении индентора (наконечника из твердого материала) в его поверхность. Испытания на твердость – самый доступный и распространенный вид механических испытаний. Наибольшее применение в технике получили статические методы испытания на твердость при вдавливании индентора: метод Бринелля, метод Роквелла и метод Виккерса.

При испытании на твердость по методу Бринелля (ГОСТ 9012-59) в поверхность материала вдавливается твердосплавный шарик диаметром D под действием нагрузки P и после снятия нагрузки измеряется диаметр отпечатка d. Число твердости по Бринеллю обозначается символом НВ с указанием числа твердости (безразмерного).

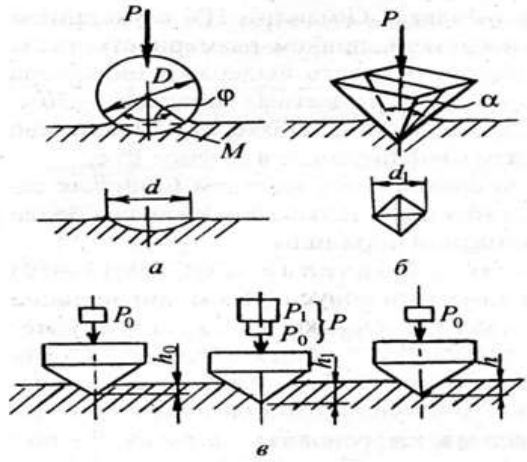



*Рис. 3. Схема испытания на твёрдость:*
*а – по Бринеллю; б – по Виккерсу; в – по Роквеллу*

При испытании на твердость по методу Виккерса (ГОСТ 2999-75) в поверхность материала вдавливается алмазная четырехгранная пирамида с углом при вершине $\alpha = 136^0$

После снятия нагрузки вдавливания измеряется диагональ отпечатка $d_1$. Число твердости по Виккерсу обозначается символом HV с указанием нагрузки P и времени выдержки под нагрузкой, причем размерность числа твердости (кгс\мм$^2$) не ставится. Преимущество метода Виккерса по равнению с методом Бринелля заключается в том, что методом Виккерса можно испытывать материалы более высокой твердости из-за применения алмазной пирамиды.

При испытании на твердость по методу Роквелла (ГОСТ 9013-59) в поверхность материала вдавливается алмазный конус с углом при вершине $120^0$ или стальной шарик диаметром 1,588 мм. Число твердости по методу Роквелла обозначается символом HR. В зависимости от формы индентора и значений нагрузок вдавливания к этому символу добавляется буква А, или В, или С, обозначающая соответствующую шкалу измерений.

Преимущество метода Роквелла по сравнению с методами Бринелля и Виккерса заключается в том, что сравнение твердости по методу Роквелла фиксируется непосредственно стрелкой индикатора, при этом отпадает необходимость в оптическом измерении размера отпечатка.

Для измерения твердости тонких слоев материалов и даже их отдельных структурных оставляющих применяют метод микротвердости (ГОСТ 9450-76). Этот метод по существу не отличается от метода Виккерса, однако, при этом используют малые нагрузки вдавливания: 0,049 (0,005), 0,098 (0,01), 0,196 (0,02), 0;9 (0,05), 0,98 (0,1), 1,962 (0,2), 4,9 (0,5). Н (кгс).

### 1.3. Испытание на ударную вязкость

Образец с надрезом устанавливается на опоры маятникового копра при дальнейшем ударе маятника по образцу.

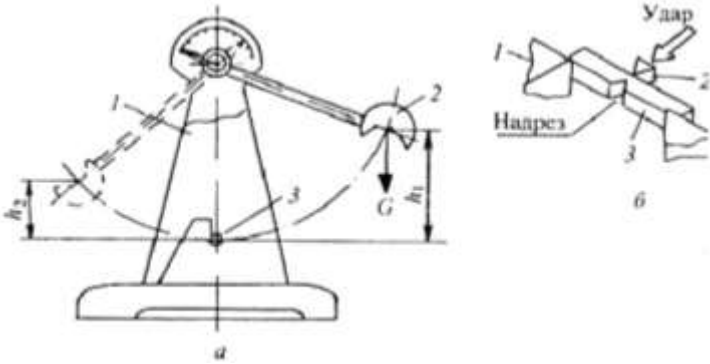



*Рис. 4. Схема испытания на ударную вязкость:*
*а – схема маятникового копра; б – расположение образца на копре; 1 – корпус; 2 – маятник; 3 – образец*

Работа на разрушение образца:

$$A = P(H - h), \text{ МДж (кгсм)},$$

где $P$ – сила, с которой маятник действует на образец, Н (кгс), (вес маятника).

Ударная вязкость:

$$a_н = A / F, \text{ МДж/м}^2 \text{ (кгсм / см}^2\text{)},$$

где $F$ – площадь сечения образца в месте надреза, м$^2$.

***Усталость*** – характеристика, определяемая при разрушении металла после многократного воздействия нагрузок, меняющих величину и направление.

Выносливость – свойство металла сопротивляться разрушению от усталости. Разрушение происходит по поверхности действия наибольших растягивающих напряжений $\sigma_B$.

Предел выносливости – наибольшее напряжение, которое может выдержать металл без разрушения $N$ раз (задается техническими условиями).

Для стальных образцов предел выносливости определяют на базе 5 млн циклов, для легких литейных сплавов – на базе 20 млн циклов.

Предел выносливости сталей примерно равен половине предела прочности при растяжении. Он зависит от размеров образца, концентраторов напряжений (галтель, выточки и др.), степени чистоты поверхности, коррозии и др.

***Износостойкость*** – сопротивление металла износу, т.е. уменьшению размеров при трении.

## 2. Физические, химические и технологические свойства

*Физические* – плотность, теплопроводность, электропроводность, способность притягиваться магнитом, намагничиваться, размагничиваться и др.

*Химические* – характеризуют способность металлов и сплавов сопротивляться воздействию окружающей среды.

*Стойкость против воздействия агрессивной среды* – химическая инертность, кислотоупорность, коррозионная стойкость.

*Технологические свойства* – способность металлов поддаваться технологической обработке, т.е. обработке, целью которой является придание металлу определенной формы, размеров и свойств.

*Литейные свойства* – способность металла в жидком состоянии заполнять форму, а после охлаждения, в твердом состоянии, давать плотную и однородную отливку.

*Ковкость* – способность металла под минимальными нагрузками пластически деформироваться без разрушения в холодном или нагретом состоянии.

*Свариваемость* – способность металлов образовывать неразъемные прочные соединения при местном нагреве кромок соединяемых деталей.

*Обрабатываемость резанием* – способность поддаваться обработке режущим инструментом.

*Способность поддаваться термической обработке* – изменение структуры металла, изменение твердости, износостойкости, прочности и других свойств.

*Технологические пробы* – способность металла коваться, свариваться, обрабатываться резанием и т.д.

## 3. Кристаллическое строение металлов

*Характерные свойства металлов* – прочность, пластичность, электро- и теплопроводность, обусловлены их строением на межатомном и внутриатомном уровнях.

Металлы – тела кристаллические, т.е. атомы в них расположены строго упорядоченно, находясь в определенных местах на вполне определенных расстояниях друг от друга.

### *3.1. Основные типы кристаллических решеток*

Если соединить атомы воображаемыми линиями в трех взаимно перпендикулярных направлениях, то получится пространственная кристаллическая решетка.

Элементарная ячейка решетки по контуру, составленному из атомов, представляет какое-то геометрическое тело: куб, шестизначную призму и др.

Ячейки, примыкая друг к другу, и многократно повторяясь, образуют более крупные образования – зерна или кристаллиты.

Наиболее простая кристаллическая ячейка – кубическая, имеющая две разновидности: кубическую объемноцентрированную (ОЦК), и кубическую гранецентрированную (ГЦК).

***ОЦК*** имеют α – железо, хром, ванадий, вольфрам, молибден, бета-титан и др.

***ГЦБ*** – γ – железо, алюминий, медь, никель, свинец, титан, магний, цинк.

***ГПУ*** – гексагональная плотноупакованная решетка.

***Наиболее характерное расстояние*** – параметр решетки, т.е. расстояние между ближайшими атомами (грань кристаллической ячейки) – от 0,2 до 0,7 нм.

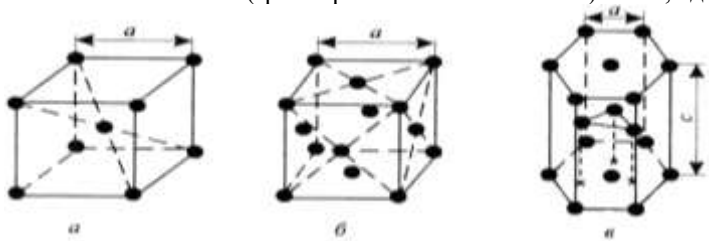



*Рис.5. Основные типы кристаллических решёток материалов: а – кубическая объемно-центрированная (ОЦК); б – кубическая гранецентрированная (ГЦК); в – гексагональная плотноупакованная (ГПУ)*

### *3.2. Кристаллические направления и плоскости*

*Кристаллические направления* – прямые или лучи, выходящие из точки отсчета (например, вершина куба), вдоль которых на определенном расстоянии друг от друга располагаются атомы.

*Кристаллические плоскости* – плоскости, на которых лежат атомы, например, грани куба или его диагональные плоскости.

Кристаллические направления или плоскости принято обозначать индексами Миллера (вдоль X – 100; вдоль Y – 010; Z → 001).

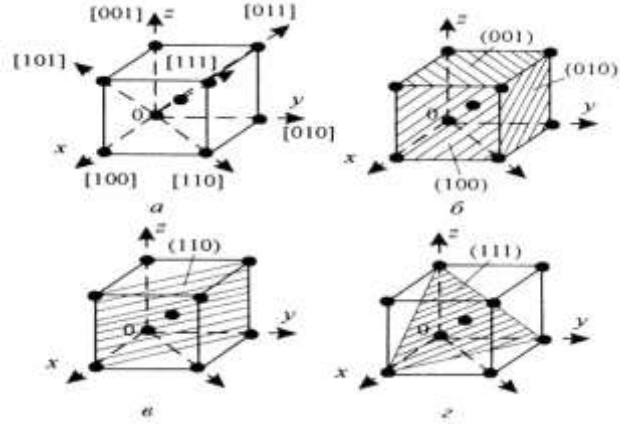



*Рис. 6. Основные кристаллографические направления (а) и плоскости (б, в, г)*

***Анизотропия в кристаллах.*** Физические, (прочностные в том числе) свойства металлов вдоль различных кристаллических направлений зависят от числа атомов, расположенных на упомянутых направлениях.

В кристаллических веществах должна наблюдаться анизотропия, т.е. неодинаковость свойств вдоль различных кристаллических направлений, что является закономерным результатом упорядоченного расположения атомов в кристаллических телах.

Реальные металлы являются изотропными телами (с примерно одинаковыми свойствами по всем направлениям).

***Аллотропия металлов.*** Способность при достижении определенных температур применять свое кристаллическое строение, перестраивая тип элементарной ячейки – явление аллотропии или полиморфизма (ОЦК – железо при 911°С становится ГЦК железом, при 1392°С – опять ОЦК, до t° плавления 1539°С).

Причина аллотропии – стремление любого вещества обладать min запасом свободной энергии $F$, которая изменяется в зависимости от абсолютной температуры $T$:

$$F = U - TS,$$

где $U$ – внутренняя энергия вещества; $S$ – энтропия (термодинамическая функция).

Аллотропические формы металлов: α, β, γ, δ и др.

Благодаря полиморфным превращениям у металлов изменяются такие свойства, как плотность, способность растворять в своей решетке другие элементы и т.д., и их можно подвергать термической обработке для целенаправленного изменения их свойств.

### 3.3 Дислокационная структура и прочность металлов

Фактическая или техническая прочность металлов при испытаниях на 2-3 порядка ниже их теоретической прочности, т.е. прочности бездефектного металла, имеющего идеально построенную, однородную во всех ее частях кристаллическую решетку.

Из физики твердого тела: формула для определения теоретической прочности:

$$\tau = KG / 2\pi,$$

где $K$ – постоянный для данного металла коэффициент; $G$ – модуль сдвига металла.

Техническая прочность в сотни раз меньше вычисляемой за счет наличия в реальном металле концентраторов напряжений, металлургических дефектов и дефектов кристаллической решетки, важнейшим из которых является дислокация.

Понятие о дислокациях и других дефектах кристаллической решетки.

Наиболее характерные дефекты кристаллической решетки металлов: точечные и линейные.

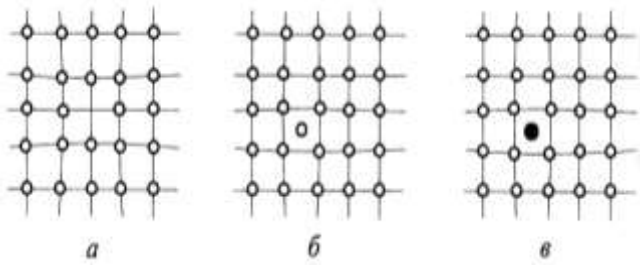



*Рис. 7. Точение дефекты в кристаллической решетке:*
*а – вакансии; б – атом внедрения; в – примесный атом внедрения*

*Точечные* – вакансии и внедренные атомы (данного или примесного элемента).

Наиболее распространенные, очень важные с точки зрения формирования прочностных свойств металлов являются дефекты, имеющие протяженность только в одном направлении, или линейные дефекты.

Их принято называть дислокациями. Образуются они в результате смещения кристаллических плоскостей.

*Краевая дислокация* – нижняя граница (край) экстра плоскости.

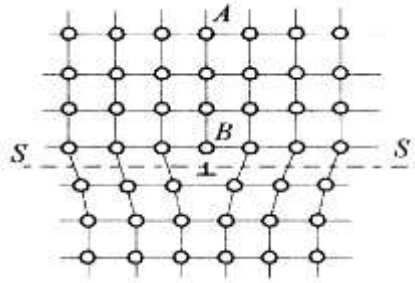



*Рис. 8. Схема краевой дислокации в кристаллической решётке*

*Винтовая дислокация* – формируется и перемещается при сдвиге одной части кристалла относительно другой по какой-нибудь плоскости под действием внешних сдвиговых (касательных) сил.

При упругопластической деформации под действием внешней силы необратимо изменяются форма и размеры изготовленной из металла детали. Зерна металла под действием силы *P* расслаиваются на пачки скольжения, с дальнейшим вытягивание зерен в волокна.

В местах скопления дислокаций и сдвигов пачек скольжения на границах зерен возникают зародыши трещин, что приводит в дальнейшем металл к разрушению.

Значение дислокационной природы и особенности механизма пластической деформации металла позволяет уяснить важный вопрос о причине

более высокой прочности мелкодисперсного металла по сравнению с крупнозернистым.

Размером зерна металла можно целенаправленно управлять путем изменения условий кристаллизации или применением термической обработки.

К элементам дислокационной структуры относятся высокодисперсные твердые включения – стопоры, т.е. очень мелкие, измеряемые нанометрами, частицы очень твердых химических соединений – карбидов, нитридов, интерметаллидов.

Упрочнением сплавов за счет стопоров можно управлять, подбирая соответствующим образом их химический состав и подвергая сплав соответствующей термической обработке.

### 3.4 Наклеп металла

После ковки холодного металла заметно возрастает его прочность и твердость, и в то же время он становится хрупким.

Наклепом называют как сам процесс изменения внутреннего строения металла при холодной пластической деформации, так и получающийся при этом результат, т.е. повышение прочности и твердости, сопровождающееся уменьшением пластичности.

Кроме того, при наклепе уменьшаются плотность, теплопроводность и электропроводность металла.

Наклеп используется для поверхностного упрочнения деталей с целью уменьшения износа и предотвращения усталостного разрушения.

## *Лекция 2.* ОСНОВЫ ТЕОРИИ СПЛАВОВ

### 2.1 Понятие о металлических сплавах

**Сплавы** – сложные вещества, получаемые сплавлением или спеканием двух или нескольких простых веществ (компонентов).

**Металлический сплав** – сплав, содержащий более 50% по массе металлических компонентов. Обладает более высокими прочностными и другими механическими свойствами по сравнению с чистыми металлами.

### 2.2 Виды двойных сплавов

Компоненты при сплавлении могут образовывать:

1. Смеси своих зерен с ничтожной взаимной растворимостью. (Смеси из практически чистых зерен обоих компонентов с их типами кристаллических решеток и прочностными свойствами).
2. Неограниченно или частично растворяться друг в друге. (Образуются твердые растворы (зерна с кристаллической решеткой из атомов обоих компонентов – виды твердых растворов: замещения и внедрения).
3. Образовывать химические соединения.

Химические соединения имеют строго определенный состав. Представляют зерна со специфической кристаллической решеткой, отличной от решеток обоих компонентов.

Связь между атомами в решетке сильнее и жестче металлической, поэтому они являются твердыми и хрупкими веществами.

Все металлические сплавы можно разделить на четыре основных вида:

1. Смесь зерен компонентов.
2. Неограниченные твердые растворы.
3. С ограниченной растворимостью компонентов
4. С устойчивым химическим соединением.

### 2.3 Диаграммы состояния (ДС) двойных сплавов и характер изменения свойств в зависимости от состава сплавов

*ДС* – график в координатах температура – состав сплава, на котором отражены продукты, образующиеся в результате взаимодействия компонентов сплава друг с другом в условиях термодинамического равновесия при различных температурах. Продукты – вещества, имеющие в зависимости от температуры и состава определенное агрегатное состояние, специфический характер строения и вполне определенные свойства.

*Жидкая фаза* – раствор расплавленных компонентов.

*Твердые фазы* – зерна с определенной формой, размером, составом, строением и свойствами.

Четыре основных типа (рода) диаграмм состояния.

#### *2.3.1 ДС I рода. Правило отрезков.*

Сплавы, компоненты которых образуют смеси практически чистых зерен без взаимной растворимости.

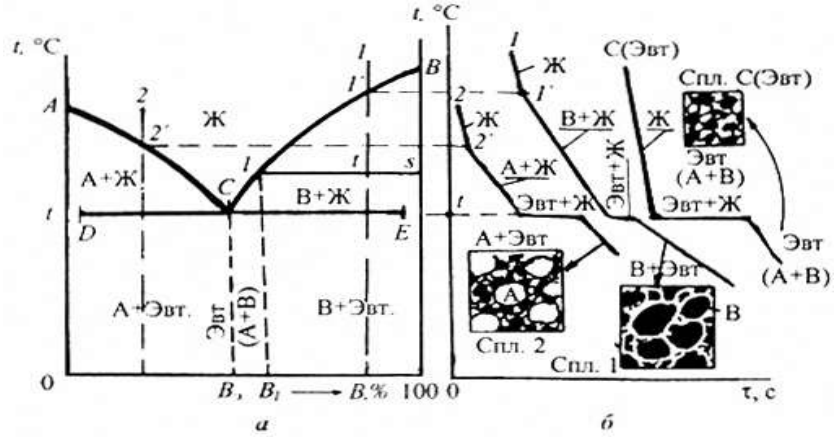



*Рис. 1. Диаграмма состояния I рода (а) и схемы получения структур (б)*

Сплав двух компонентов, который плавится при минимальной температуре, называется *эвтектическим или эвтектикой*.

*Эвтектика* – равномерная смесь одновременно кристаллизовавшихся мелких зерен обоих компонентов.

*Эвтектическая температура* $t_э$ – та, при которой одновременно плавятся или кристаллизируются оба компонента.

Температуры, выше которых сплавы находятся в жидком состоянии, лежат на линии *ACB*, называемой линией ликвидуса (от лат. «ликвидус» - жидкий, текучий.

Переход сплавов из жидкого состояния в твердое при кристаллизации происходит в интервале температур, лежащих между линией ликвидуса и эвтектической температурой, которой соответствует линия солидуса *DCE* (от лат. «солидус» - твердый).

Количественные изменения в сплавах данной системы компонентов (состав твердой и жидкой фаз и их доли в единице массы сплава) при кристаллизации подчиняются правилу отрезков. Правило используется для определения состава и числа фаз при произвольно взятой температуре, например, соответствующей изотерме *lts*. При кристаллизации сплавов состав жидкой фазы изменяется по линии ликвидуса от исходного до эвтектического. Масса твердой фазы при данной температуре определяется величиной отрезка *lt*, а жидкой - отрезка *ts*. Если массу всего сплава выразить Q выразить через *ls*, то относительные доли твердой $Q_в$ и жидкой $Q_ж$ фаз можно представить в виде $Q_в/Q = lt/ ls$ и $Q_ж/Q = ts/ ls$. Пользуясь этими выражениями, можно вычислить и абсолютные массовые доли каждой из фаз при любой температуре.

Количество каждой структурной составляющей, от которого зависят свойства сплава, может быть вычислено по правилу отрезков применительно к эвтектической температуре.

Та часть сплава, которая представлена эвтектикой, имеет более высокую прочность, чем часть, представленная более крупными зернами избыточной фазы.

Закон аддитивности (изменение прочности), согласно которому каждая из фаз вносит в суммарную прочность сплава часть своей прочности, соответствующей доле этой фазы в сплаве.

### *2.3.2 Диаграмма состояния II рода. Дендритная ликвация.*

При неограниченной растворимости компонентов друг в друге, имеющих одинаковые типы решеток и сходное строение наружных электронных оболочек.

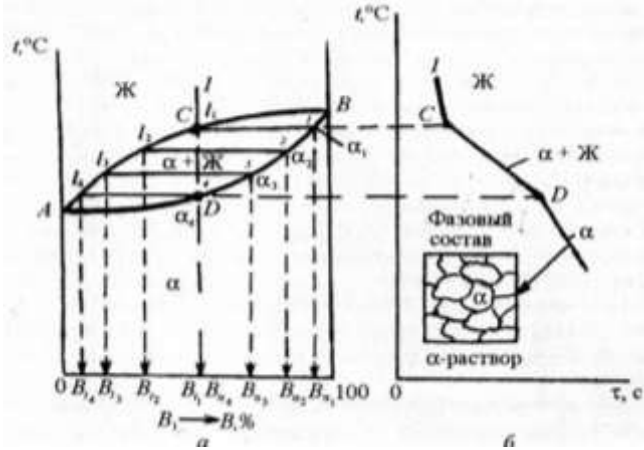



*Рис. 9. Диаграмма состояния II рода (а); характер кристаллизации сплавов и схема их фазового строения (б)*

Различают три фазовые области.

1. Жидкая фаза, находящаяся выше линии ликвидуса *ADB*.
2. α+ж – двухфазная область, находящаяся под ней до линии солидуса *ADB*. (α – твердый раствор компонентов А и В).
3. Область, расположенная под линией солидуса, является однофазной ( фаза α).

При равновесной кристаллизации (с малой скоростью охлаждения) фаза α должна соответствовать исходному составу сплава (за счет непрерывно происходящей диффузии между обеими фазами).

Дендритная ликвация – незавершенность диффузионных процессов при ускоренном охлаждении (центральная часть зерна обогащена более тугоплавким компонентом, периферия - легкоплавким).

Может быть устранена путем длительного, так называемого, диффузионного отжига (выравнивается химический состав в зернах).

Существует зависимость:

$$\sigma_т = G \cdot \varepsilon^2 \cdot C,$$

где $G$ – модуль сдвига; $\varepsilon = (r - r_0) / r$ ($r$ и $r_0$ – атомные радиусы компонентов); $C$ – атомные концентрации растворенного компонента.

### *2.3.3 Диаграмма состояния III рода. Ограниченная растворимость компонентов*

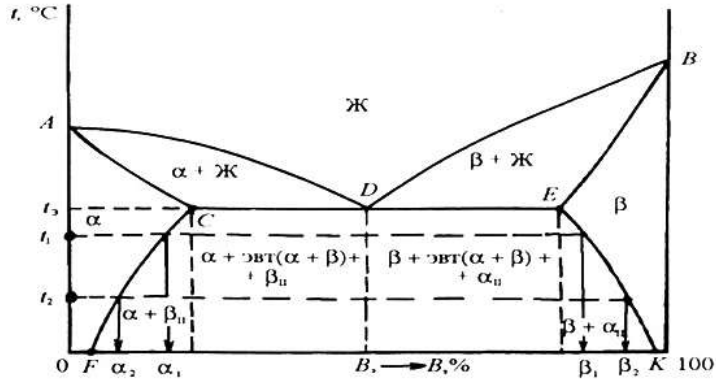



*Рис. 10. Диаграмма состояния III рода*

За пределами растворимости компонентов образуются механические смеси твердых растворов на основе каждого из них.

Взаимная растворимость компонентов друг в друге, как правило, зависит от температуры.

Характер изменения свойств сплавов в зависимости от состава отражает уровень свойств равновесных сплавов, обладающих минимальной плотностью дислокаций ($10^6$-$10^7$ $см^{-2}$) и идеальным металлургическим качеством.

### *2.3.4 Диаграмма состояния IV рода*

Сплавляемые компоненты при соотношении $А_м$, $В_н$ образуют устойчивые химические соединения, не диссоциирующие при нагреве вплоть до *Т* плавления.

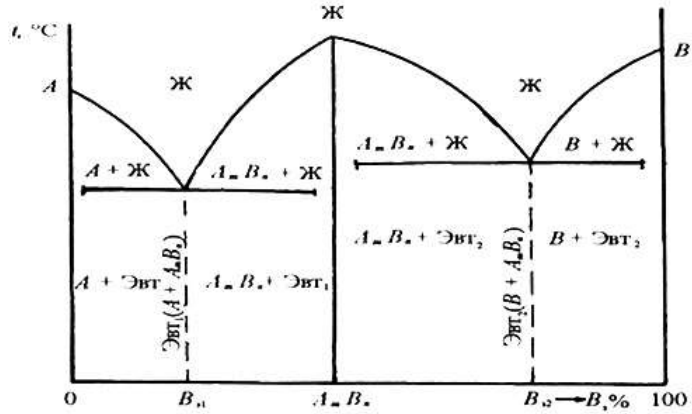



*Рис.11. Диаграмма состояния IV рода*

Фазовый состав любого сплава системы А-В в твердом состоянии должен представлять смесь химического соединения и одного из исходных компонентов.

## 2.4 Методы исследования строения и свойств сплавов. Теоретические и экспериментальные

Развитие этих методов обусловлено необходимостью получать сведения об эксплуатационной надежности используемых материалов, о причинах поломок и аварий, об остаточном ресурсе вязкостно-прочностных свойств у материала изделия в процессе эксплуатации, а также о путях совершенствования строения и свойств конструкционных материалов.

*Теоретические методы* представляют анализ диаграмм состояний (не только в равновесном состоянии, но и после термообработки)

*Экспериментальные методы* основаны на анализе результатов наблюдения строения металла или результатов его испытания, проводимого по какой-то методике.

В основу всех методов исследования положено предположение о причинно-следственной зависимости между строением и свойствами.

### *Метод микроскопического исследования*

Оценка качества металла производится по виду излома специального образца (фактографическое исследование).

*Оптическая микроскопия* – дает возможность различать в строении металла структурные элементы размером до 0,2 мкм (200 нм). Увеличение – 1500-2000 раз.

*Электронная микроскопия* – различают разновидности электронных микроскопов: просвечивающие (ПЭМ) и растровые (РЭМ).

ПЭМ – разрешающая способность до 0,2-0,5 нм. РЭМ – основана на вторичной эмиссии электронов поверхностью излома, на которую направляется сканирующий поток первичных электронов, что позволяет получать разрешающую способность до 25-30 нм.

*Рентгеноструктурный микроанализ* (РСМА – дифракция рентгеновских лучей рядами атомов) позволяет обнаружить особенности распределения примесей и компонентов в сплавах (в том числе легирующих элементов в зернах стали). РСМА основан на определении химического состава микрообластей на специально приготовленном микрошлифе. Разрешающая способность – порядка нескольких микрометров. Методом можно успешно изучать ликвационные процессы в сплавах, особенно дендритную ликвацию.

При физических методах исследования металл подвергается тепловому, электрическому или магнитному воздействию, по результатам которого судят об особенностях его строения и свойств.

Дилатометрический метод служит для обнаружения структурно-фазовых превращений в сплавах. Он основан на изменении объема (т.е. размеров) образца при фазовых превращениях.

Самыми распространенными и наглядно информативными являются методы испытания механических свойств, включая и безобразцовый метод Мар-

ковца-Матюнина. Наиболее надежные и достоверные результаты дают натурные испытания деталей или готовых изделий при нагружении в эксплуатационных условиях на специально создаваемых стендах (стендовые испытания).

### *Диаграмма состояния железо-углерод*

Она дает представление о строении железоуглеродистых сплавов – сталей и чугунов (рис.12). Первое представление о диаграмме железо-углерод дал Д.К.Чернов, который в 1868 г. отметил существование в стали критических точек и их зависимость от содержания в стали углерода, т.е. по сути, впервые указал на полиморфизм железа.

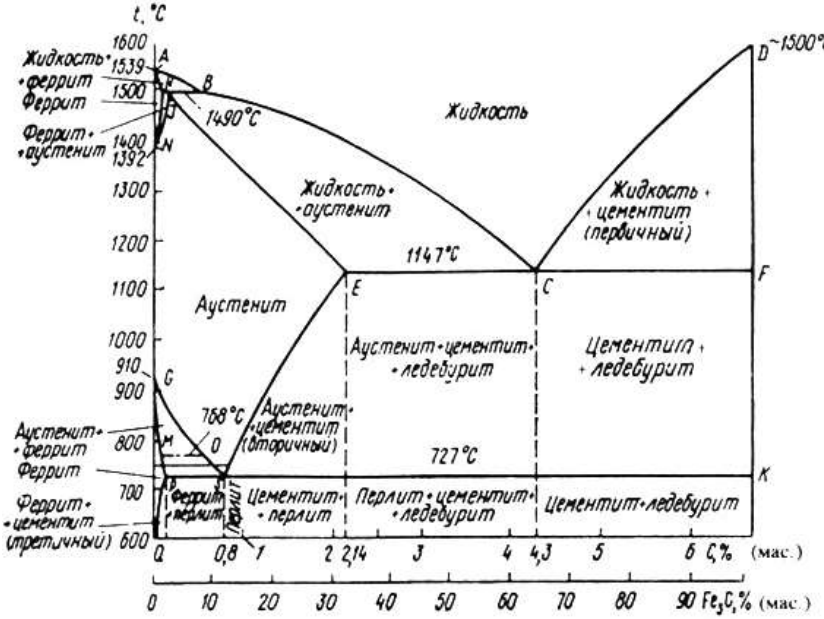



*Рис. 12. Диаграмма фазового состояния Fe – $Fe_3C$*

Содержание углерода в диаграмме ограничивается 6,67%, так как при этой концентрации образуется химическое соединение – карбид железа ($Fe_3C$) или цементит, который и является вторым компонентом данной диаграммы.

Точка *A* диаграммы (1539°C) отвечает температуре плавления железа,

точка *D* (1500 °C) – t° плавления цементита,

точки *N* (1392°C) и *G* (910°C) – соответствуют полиморфному превращению $Fe_\alpha$–$Fe_\gamma$.

Концентрация углерода (по массе) для характерных точек диаграммы состояния следующая:

*B* – 0,51% C в жидкой фазе, 1499 °C,

*H* – 0,1%C в σ-феррите при 1490°C,

*J* – 0,16%C – в аустените перитектике при 1490°C,

*E* – 2,14%C, представляет предельное содержание в аустените при 1147°C,

*S* – 0,8%С в аустените при реакции эвтектоидного превращения 727°С,

*P* – 0,02%С – предельное содержание в феррите ($Fe_{\alpha}$(С)) при 727°С.

Линии диаграммы:

*AB* – линия ликвидуса – указывает температуру начала кристаллизации δ – феррита из жидкого сплава; *BC* – линия ликвидуса - температуру начала кристаллизации аустенита из жидкого сплава; *CD* – линия ликвидуса – начало кристаллизации первичного цементита $Fe_3C$ из жидкого сплава.

Вся линия ABCD – линия ликвидуса.

Линия AHJECF – линия солидуса.

Так как железо образует с углеродом химическое соединение $F_{e3}C$, имеет две аллотропические формы α и r, в системе существуют следующие фазы:

Жидкость (жидкий раствор углерода в железе), существующая выше линии ликвидуса.

Цементит $Fe_3C$ – вертикаль DFKL.

Феррит – структурная составляющая – раствор углерода в α-железе ($Fe_{\alpha}$). Область феррита – левее линий GPQ и AHN.

Аустенит – раствор углерода в γ-железе, область NJESG.

Ледебурит – эвтектика (аустенит + цементит) – точка С при t°1147°С, 4,3%С.

В системе (Fe – C) имеются две большие группы сплавов: стали и чугуны. Сталями называют сплавы железа с углеродом, содержащие до 2,14% С; сплавы с большим содержанием углерода называют чугунами. Стали бывают по составу – доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные. Сталь, содержащую 0,8% С, называют эвтектоидной. Если в стали углерода менее 0,8%, то ее называют доэвтектоидной, а при содержании углнрода более 0,8%, но менее 2,14% С – заэвтектоидной. Структура доэвтектоидной стали состит из феррита (светлая составляющая) и перлита (темная составляющая), структура эвтектоидной стали состоит из перлита; структура заэвтектоидной стали состоит из перлита (темная составляющая) и цементита вторичного (светлая составляющая в виде сетки) (рис. 13).

*Рис. 13. Микроструктура сталей:*
*а – структура доэвтектоидной стали 40 (×200); б – структура эвтектоидной стали У8 (×1000); в – структура заэвтектоидной стали У12 (×200)*

***Феррит*** – наименее твердая и наиболее пластичная структура с твердостью НВ около 80.

***Перлит*** – состоит из чередующихся пластинок цементита и феррита, с НВ около 200 (пластинчатый).

В заэвтектоидной стали цементит располагается по границам зерен перлита, образуя цементитную сетку. Твердость НВ цементита около 800. Цементитную сетку необходимо разрушать предварительной ковкой или прокаткой или специальным обжигом.

Чугунами называют сплавы железа с углеродом, содержащие более 2,14% углерода. Чугун, содержащий углерода больше 2,14%, но меньше 4,3%, называют доэвтектическим. Чугун, содержащий 4,3% С, называют эвтектическим, а при содержании углерода более 4,3%, но менее 6,67% - заэвтектическим. Доэвтектический чугун имеет структуру перлита, ледебурита (перлит + цементит) и вторичного цементита. Эвтектический чугун состоит только из ледебурита (перлит + цементит). Заэвтектический чугун состоит из первичного цементита, имеющего форму пластин, и ледебурита (перлит + цементит) (рис. 14).

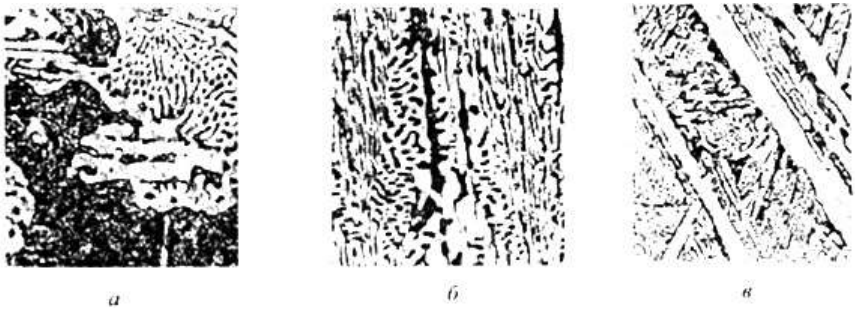



*Рис. 14. Микроструктура чугунов:*
*а – доэвтектический (С < 4.3%), б – эвтектический (С=4,3%), ×500; в – заэвтектический (С > 4.3%), ×500.*

**Классификация углеродистых сталей**

По содержанию углерода, назначению, качеству, степени раскисления и структуре в равновесном состоянии.

1. По содержанию С:

– низкоуглеродистые <0,3%С

– среднеуглеродистые 0,3-0,7%С

– высокоуглеродистые >0,7%С

2. По назначению:

– конструкционные (цементуемые, улучшаемые, высокопрочные, рессорно-пружинные)

– инструментальные (для режущего, измерительного инструмента; штампов холодного и горячего (до 200°С) деформирования.

3. По качеству:

– обычного качества;

– качественные;

– высококачественные.

Однородность химического состава, строения и свойств стали, технологичность во многом зависят от содержания газов (кислорода, водорода,

азота) и вредных примесей – серы и фосфора.

– обыкновенного качества – до 0,06% S и до 0,07% P;

– качественные – до 0,04%S и 0,035% P;

– высококачественные – до 0,025%S и 0,025%P.

Стали обыкновенного качества – только углеродистые (до 0,5%C); качественные и высококачественные – углеродистые и легированные.

4. По степени раскисления и характеру затвердевания:

– спокойные

– полуспокойные;

– кипящие.

Раскисление – процесс удаления из жидкого металла кислорода, проводимый с целью предотвращения хрупкого разрушения стали при горячей деформации.

Спокойные стали раскисляют марганцем, кремнием, алюминием.

Кипящие - раскисляют марганцем.

Легированные – только спокойные стали. Углеродистые стали бывают спокойными, полуспокойными, кипящими.

5. По структуре в равновесном состоянии:

– доэвтектоидные – имеющие в структуре феррит и перлит;

– эвтектоидные – имеющие в структуре перлит;

– заэвтектоидные – перлит и цементит вторичный.

### Влияние постоянных примесей на углеродистые стали

Постоянными примесями в стали считают такие, которые попадают в нее в процессе получения, разливки, а также их исходных материалов, топлива, футеровки печей и атмосферы.

Постоянные примеси – марганец и кремний – оказывают в какой-то степени положительное влияние на механические свойства стали, а фосфор и сера ухудшают их и являются очень вредными примесями.

При выплавке и разливке стали в нее из окружающей атмосферы попадают кислород, азот, водород и другие газы.

***Кислород*** в кристаллической решетке железа не растворяется, в стали присутствует в виде зерен оксидов FeO, $Fe_2O_3$ идругих элементов. Это снижает прочностные и пластические свойства стали.

***Азот*** частично растворяется в феррите, упрочняя и одновременно охрупчивая его. Образуются нитриды в виде включений, что также охрупчивает сталь.

***Водород*** охрупчивает сталь, образует флокены (микротрещины), снижает прочность и пластичность, исключает использование, как конструкционного металла.

Включение оксидов $MnO_2$, $SiO_2$, $Al_2O_2$ – ухудшают качество стали и снижают механические свойства.

### Влияние углерода (на свойства углеродистых сталей)

Увеличение содержания углерода соответственно увеличивает и количество цементита в стали, который отличается высокой твердостью и хруп-

костью. С повышением содержание углерода увеличиваются прочность и твердость, а пластичность и вязкость снижаются.

Кроме снижения ударной вязкости, углерод заметно повышает верхний порог хладноломкости, расширяя тем самым температурный интервал перехода стали в хрупкое состояние.

Особенно сильно сказывается влияние углерода при неравновесной структуре стали. После закалки на мартенсит временное сопротивление легированных сталей резко увеличивается с ростом углерода и достигает максимального значения при 0,4% С.

У углеродистых сталей очень небольшая прокаливаемость (до 12 мм), что резко сужает размер деталей, которые можно упрочнить термической обработкой.

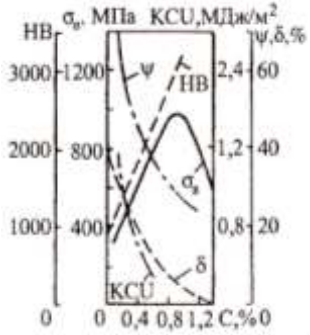



*Рис. 15. Влияние углерода на свойства горячекатаных сталей*

Стали обыкновенного качества ГОСТ 380-71 – в виде проката – прутки, балки, листы, уголки в нормализованном состоянии в зависимости от назначения и комплекса свойств подразделяют на группы А, Б, В.

Стали маркируются сочетанием букв Ст и цифрой (от 0 до 6), показывающей номер марки, а не среднее содержание углерода в ней, хотя с повышением номера содержание углерода в стали увеличивается.

Стали групп Б и В имеют перед маркой буквы Б и В, указывающие на их принадлежность к этим группам. Группа А в обозначении марки стали не указывается. Степень раскисления обозначается добавлением индексов: в спокойных сталях – «сп», полуспокойных – «пс», кипящих – «кп», а категория нормируемых свойств (кроме категории 1) указывается последующей цифрой. В их составе разное содержание кремния: спокойные – 0,12-0,30, полуспокойные – 0,05-0,17; кипящие – менее 0,07, например Ст3сп, БСт3пс или ВСт3сп5 (в конце 5-я категория). Спокойными и полуспокойными производят стали Ст1 – Ст6, кипящими – Ст1 – Ст4 всех трех групп. Сталь Ст0 по степени раскисления не разделяют. Стали группы А поставляются с гарантированными механическими свойствами (табл.1) без указания химического состава.

Таблица 1. Механические свойства углеродистых сталей обыкновенного качества группы А (образцы толщиной до 20 мм)

| Сталь | $\sigma_B$, МПа | $\sigma_T$, МПа | δ, % | Сталь | $\sigma_B$, МПа | $\sigma_T$, МПа | δ, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | не менее | | | | не менее | |
| Ст0 | >310 | - | 23 | Ст4 | 420-540 | 240-270 | 24 |
| Ст1 | 320-420 | - | 34 | Ст5 | 500-640 | 260-290 | 20 |
| Ст2 | 340-440 | 200-230 | 32 | Ст6 | 600 | 320 | 13 |
| Ст3 | 380-490 | 210-250 | 27 | | | | |

Механические свойства приведены для спокойных и полуспокойных сталей. В сталях Ст1 кп значение $\sigma_в$ на 10-20 МПа и $\sigma_T$ на 10МПа меньше, а значение δ на 1% больше, чем в спокойных и полуспокойных сталях того же номера.

Стали группы А поставляются с гарантированными механическими свойствами, без указания химического состава.

С увеличением номера марки прочность увеличивается, а пластичность уменьшается.

Стали группы А используют в состоянии поставки для изделий, изготовление которых идет без горячей обработки.

Стали группы Б поставляют с гарантированным химическим составом, но механические свойства не гарантируются. Используются для изделий с применением горячей обработки (ковка, сварка, иногда – термообработка), при которой исходная структура и механические свойства не сохраняются.

Для таких сталей важны сведения о химическом составе, необходимые для определения режима горячей обработки.

Таблица 2. Химический состав (%) углеродистой стали обыкновенного качества группы Б

| Сталь | C | Mn | Si в стали | | | S | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | кп | пс | сп | не более | |
| БСт0 | <0,23 | – | – | – | – | 0,06 | 0,07 |
| БСт1 | 0,06-0,12 | 0.25-0,5 | 0,05 | 0,05-0,17 | 0,12-0,3 | 0,05 | 0,04 |
| БСт2 | 0,09-0,15 | 0,25-0,5 | 0,05 | 0,05-0,17 | 0,12-0,3 | 0,05 | 0,04 |
| БСт3 | 0,14-0,22 | 0,30-0,65 | 0,07 | 0,05-0,17 | 0,12-0,3 | 0,05 | 0,04 |
| БСт4 | 0,18-0,27 | 0,40-0,70 | 0,07 | 0,05-0,17 | 0,12-0,3 | 0,05 | 0,04 |
| БСт5 | 0,28-0,37 | 0,50-0,80 | – | 0,05-0,17 | 0,15-0,35 | 0,05 | 0,04 |
| БСт6 | 0,38-0,49 | 0,50-0,80 | – | 0,05-0,17 | 0,15-0,35 | 0,05 | 0,04 |

1. В сталях БСт 1 – БСт 6 допускается не более 0,3% Cr; 0,3% Cu; 0,08% As; 0,08% N.

2. В сталях, выплавленных из керченских руд, допускается до 0,15% As и 0,05% P.

Стали группы В поставляются с гарантированными механическими свойствами и химическим составом. Они дороже сталей групп А и Б, и их применяют для ответственных деталей (сварных конструкций).

Углеродистые стали обыкновенного качества (всех трех групп) предназначены для изготовления различных металлоконструкций, а также слабонагруженных деталей машин и прборов. Эти стали используются, когда работоспособность деталей и конструкций обеспечивается жесткостью. Углеродистые стали обыкновенного качества широко используются в строительстве при изготовлении железобетонных конструкций. Способностью к свариваемости и холодной обработке давлением отвечают стали групп Б и В номеров 1-4, поэтому из них изготавливают сварные фермы, различные рамы и строительные металлоконструкции, кроме того, крепежне изделия, часть из которых подвергается цементации. Среднеуглеродистые стали номеров 5 и 6, обладающие большой прочностью, предназначены для производства рельсов, железнодорожных колес, а также валов, шкивов, шестерен и других деталей грузоподъемных и сельскохозяйственных машин. Детали из этих сталей групп Б и В можно подвергать термической обработке – закалке с последующим высоким отпуском.

### *Углеродистые качественные стали*

Эти стали используются для изготовления деталей неответственного назначения и являются достаточно дешевым материалом. Они имеют более низкое содержание вредных примесей и неметаллических включений, чем стали обыкновенного качества. Эти стали поставляются в виде проката, поковок, профилей различного назначения с гарантированным химическим составом и механическими свойствами (ГОСТ 1050-74).

Маркируются стали двузначными цифрами: 05, 08, 10, 15, 20 … 75, 80, 85, обозначающими среднее содержание углерода в сотых долях процента. Стали с повышенным содержанием марганца (0,7-1,0%) марок 15Г, 20Г, 25Г,…, 70Г имеют повышенную прокаливаемость – до 30 мм.

Данные, приведенные в табл. 3 служат для контроля металлургического качества отдельных плавок, а механические свойства изделий будут определяться соответствующими режимами термической обработки, зависящими от размера и сечения деталей. Спокойные стали маркируют без индекса, полуспокойные и кипящие – с индексом соответственно «пс» и «кп».

Таблица 3. Химический состав и механические свойства углеродистых качественных сталей

| Марка стали | Содержание углерода. % | Хром, не более | Механические свойства, не менее | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $\sigma_в$, МПа | $\sigma_т$, МПа | $\delta$, % | $\psi$, % | KCU$^{20}$, МДж/м$^2$ | НВ после отжига или высокого отпуска, не более |
| 08 | 0,05-0,01 | 0,10 | 330 | 200 | 33 | 60 | - | 131 |
| 10 | 0,07-0,14 | 0,15 | 340 | 210 | 31 | 55 | - | 143 |
| 15 | 0,12-0,19 | 0,25 | 380 | 230 | 27 | 55 | - | 149 |
| 20 | 0,17-0,24 | 0,25 | 420 | 250 | 25 | 55 | - | 163 |
| 30 | 0,27-0,35 | 0,25 | 500 | 300 | 21 | 50 | 0,8 | 179 |
| 40 | 0,37-0,45 | 0,25 | 580 | 340 | | 45 | 0,6 | 217 |
| 50 | 0,47-0,55 | 0,25 | 640 | 380 | 14 | 40 | 0,4 | 241 |
| 60 | 0,57-0,65 | 0,25 | 690 | 410 | 12 | 35 | | 255 |
| 70 | 0,67-0,75 | 0,25 | 730 | 430 | 9 | 30 | | 269 |

Качественные стали широко применяют в машиностроении и приборостроении, так как за счет разного содержания углерода в них, а соответственно и термической обработки можно получить широкий диапазон механичеких и технологических свойств. Для увеличения поверхностной прочности сталей их цементуют (насыщают поверхность углеродом) и применяют для деталей небольшого размера, например слабонагруженных зубчатых колес, кулачков и др. За счет твердого поверхностного слоя резко возрастает износостойкость изделий, а сердцевина при этом остается пластичной и вязкой. Поверхность деталей упрочняется закалкой в воде с последующим низким отпуском. Сердцевина же из-за низкой прокаливаемости этих сталей практически не упрочняется.

При одинаковом временном сопротивлении ($\sigma_B$) нормализованной и улучшенной стали такие свойства, как предел текучести и относительное удлинение, выше после закалки с высоким отпуском за счет более дисперсной

структуры (сорбит). Закалка с отпуском обеспечивает и более высокую ударную вязкость и хладостойкость, чем нормализация.

Высокоуглеродистые стали марок 60, 65 … 85, 60Г, 65Г, 70Г в основном используются для изготовления пружин, рессор и других изделий с высокой упругостью и износостойкостью. Их подвергают закалке и среднему отпуску на структуру троостит ($\sigma_в$ > 800 Мпа) в сочетании с удовлетворительной вязкостью и хорошим пределом выносливости.

### *Автоматные стали*

Обладают хорошей обрабатываемостью резанием за счет повышенного содержания серы и фосфора. Оба эти элемента повышают стойкость режущего инструмента. Обрабатываемость связана с интенсивностью изнашивания инструмента, скоростью резания, чистотой поверхности, формой стружки и др.

Также в состав стали вводят некоторое количество серы, селена, теллура, кальция, которые изменяют состав неметаллических включений, а также свинца, который образует собственные включения.

Стали маркируют буквой А (автоматная) и цифрами, показывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента. Если сталь легирована свинцом, то обозначение марки начинается с сочетания букв «АС»: А11, А12, А20, А30, А40Г, АС14, А35Е.

Сера образует большое количество сульфидов марганца, обладающих смазывающим действием.

Фосфор – повышает хрупкость феррита, облегчая отделение стружки.

Таблица 4. Химический состав автоматных сталей

| Марка стали | Содержание элементов, % | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | C | Мп | Si | S | P | Pb | Se |
| А11 | 0,07-0,15 | <0,1 | 0,8-1,20 | 0,15-0,25 | < 0,10 | | |
| А12 | 0,08- 0,16 | 0,7-1,0 | 0,15-0,35 | 0,08-0,20 | 0,08-0,15 | | |
| А20 | 0,17-0,24 | 0 7--1 0 | 0,15-0,35 | 0,08-0,15 | < 0,06 | | |
| А3О | 0,27-0,35 | 0,7-1,0 | 0,15-0,35 | 0,08-0,15 | <0,06 | | |
| А40Г | 0,37-0,45 | 1,2-1,55 | 0,15-0,35 | 0,18-0,30 | <0,05 | | |
| АС14 | 0,10-0,17 | 1,0-1,3 | < 0,12 | 0,15-0,20 | <0,1 | 0,15-0,3 | 0,04 |
| А35Е | 0,32-0,40 | 0,5-0,8 | 0,17 -0.37 | 0,06-0,12 | < 0,035 | | 0,10 |

### *Углеродистые инструментальные стали*

Предназначены для изготовления режущего, измерительного инструмента и штампов холодного и горячего деформирования (ГОСТ 1435-74).

Необходимые свойства – износостойкость и теплостойкость. Маркировка: У7 … У13 – для качественных сталей; У7А … У13А – для высококачественных сталей. Стали поставляют после отжига на зернистый перлит. (НВ 187 … 217). Обладают низкой прокаливаемостью (10-12 мм); хорошей обрабатываемостью резанием и деформированием. Стали У7, У8, У9 подвергают полной закалке и отпуску при 275°-350°С на троостит (HRC 48-51). Заэвтектоидные стали марок У10, У11 … У13 подвергают неполной закалке и низкому отпуску при 150°-180°С на мартенсит отпуска с включени-

ями цементита (HRC 62…64). При нагреве выше 200°С твердость резко снижается, в связи с чем инструмент из этих сталей пригоден для обработки сравнительно мягких материалов и при небольших скоростях резания.

## Чугуны

Являются более дешевым материалом, чем стали. Содержание углерода в них больше 2,14%.

Характеризуются пониженной температурой плавления и хорошими литейными свойствами. Значительная часть чугуна переплавляется в сталь по классической схеме: руда – чугун – сталь. В зависимости от того, в какой форме присутствует углерод в сплавах, различают: белые, серые, высокопрочные и ковкие чугуны.

***Белый чугун.*** Имеет излом матово-белого цвета. Весь углерод в чугуне находится в связанном состоянии – в виде цементита.

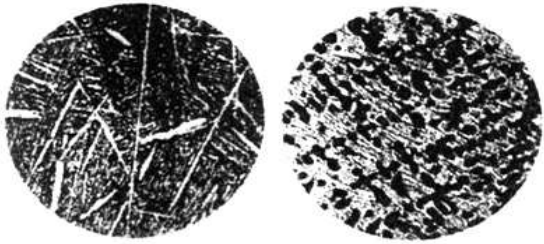



*Рис. 16. Микроструктура белого чугуна, х200:*
*а – белый заэвтектический чугун (С=5,5%); б – белый доэвтектический чугун (С=2,5%). Перлит темный и ледебурит пестрый*

В зависимости от содержания углерода различают: доэвтектические (перлит + ледебурит); эвтектические (ледебурит); заэвтектические (первичный цементит + ледебурит).

Эти чугуны имеют твердость НВ 450-550 из-за присутствия в них большого количества цементита, поэтому они очень хрупкие и для изготовления деталей машин не используются. Отливки из белого чугуна служат для получения деталей из ковкого чугуна с помощью графитизирующего отжига.

***Серый чугун.*** Имеет излом серого цвета. В структуре имеется графит. *Графит* по сравнению со сталью обладает низкими механическими свойствами и поэтому в некотором приближении можно считать, что места, которые он занимает – это, фактически, пустоты, трещины.

Серые чугуны – сплавы сложного состава, содержащие железо, углерод, кремний, марганец и неизбежные примеси: серу и фосфор.

Таблица 5. Механические свойства серых чугунов

| Чугун | $\sigma_B$, МПа | НВ | Структура металлической основы |
|---|---|---|---|
| Сч15 | 150 | 163-229 | Феррит |
| Сч25 | 250 | 180-250 | Феррит + перлит |
| Сч40 | 400 | 207-285 | Перлит |
| Сч45 | 450 | 229-289 | » |

*Рис. 17. Микроструктуры серых чугунов, х200:*
*а – серый чугун на перлитной основе; б – серый чугун на феррито- перлитной основе; в – серый чугун на ферритной основе*

Степень графитизации зависит от количества углерода (2,2-3,7%) и кремния (1-3%) в чугуне.

По структуре металлической основы серые чугуны разделяются на 3 вида:

1. Серый перлитный со структурой перлит + графит. Количество связанного углерода составляет ~ 0,8%.

2. Серый ферритно-перлитный (феррит + перлит + графит). Количество связанного углерода составляет < 0,8%.

3. Серый ферритный (феррит + графит). Весь углерод в виде графита. Марка серого чугуна состоит из букв Сч (серый чугун) и цифры, показывающей значение временного сопротивления ($\sigma_B$ ) при растяжении (кг/мм$^2$).

***Перлитные серые модифицированные чугуны*** получают при добавлении в жидкий чугун перед разливкой специальных добавок – ферросилиция (0,3-0,6% от массы шихты) или силикокальция (0,3-0,5%). Более высокие механические свойства чугуна получаются из-за измельчения формы графитных включений.

***Легированные серые чугуны*** – дополнительно содержат хром, никель, молибден и алюминий.

***Высокопрочный чугун.*** Графит имеет шаровидную форму. Получают данные чугуны путем модифицирования магнием. Из-за возгорания чистый магний заменяют лигатурами – сплавом магния и никеля и др.

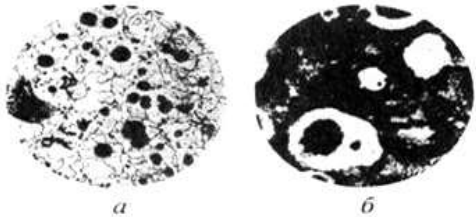


*Рис. 18. Микроструктуры высокопрочных чугунов, ×100:*
*а – высокопрочный чугун на ферритной основе; б – высокопрочный чугун на феррито-перлитной основе*

Состав после модифицирования: 3-3,6% C; 1,8-2,9% Si; 0,4-0,7% Mn; 0,02-0,08% Mg; ≤0,15% P; ≤0,03% S.

По структуре металлической основы высокопрочный чугун может быть: ферритный, феррито-перлитный или перлитный. Шаровидный графит являет-

ся менее сильным концентратором напряжений, чем пластинчатый графит, и следовательно, менее активно влияет на механический свойства металлической основы. Чугуны с шаровидным графитом имеют более высокую прочность и некоторую пластичность. Иногда для улучшения механических свойств применяют термообработку отливок: закалку и отпуск при 500°-600°С, для увеличения пластичности – отжиг для сфероидезации перлита. Маркируют высокопрочные чугуны по пределу прочности ($\sigma_B$) и относительному удлинению (δ), например, Вч45-5.

***Ковкий чугун.*** Графит имеет хлопьевидную форму. Чугуны получают в результате специального графитизирующего отжига (томление) доэвтетического белого чугуна. Графит в них – это углерод отжига. Ковкие чугуны обладают более высокой прочностью, чем серые чугуны. Необходимо, чтобы отливки белого чугуна, подвергаемые отжигу, были тонкостенными для того, так как в противном случае в сердцевине при кристаллизации будет выделяться пластинчатый графит и чугун станет непригодным для отжига

По структуре металлической основы ковкие чугуны бывают ферритными и перлитными.

Полное отсутствие литейных напряжений, которые снимаются за счет длительного отжига, и разобщенность графитных включений обусловливают высокие механические свойства ковких чугунов.

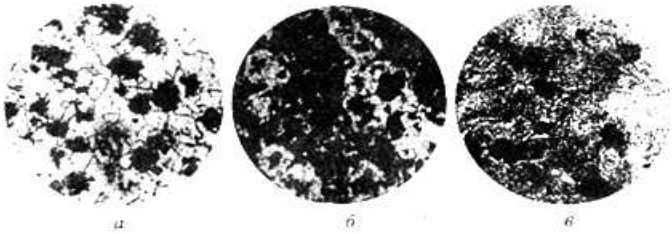



*Рис. 19. Микроструктуры ковких чугунов, ×200:*
*а – ферритный ковкий чугун; б – феррито – перлитный ковкий чугун; в – перлитный ковкий чугун*

Маркируются ковкие чугуны буквами Кч и цифрами как высокопрочные чугуны. Они широко применяются в сельскохозяйственном, автомобильном и текстильном машиностроении, в судостроении, при производстве вагонов и дизельных двигателей.

### *Легированные стали*

*Легированными* называют стали, в которые для получения требуемых свойств специально вводят легирующие элементы. В случае имеющегося количества элементов примерно 0,1% такое легирование называют микролегированием.

Легированные элементы оказывают влияние на электронную и дислокационную структуру металла. Создают барьеры ближнего действия на пути движущихся дислокаций. Легированные стали характеризуются лучшим комплексом физико-химических (в т.ч. и механических) свойств по сравне-

нию с углеродистыми: они отличаются повышенной жаростойкостью, сопротивлением коррозии, значительной ударной вязкостью, высокими значениями предела текучести и относительного сужения, большим электросопротивлением (рис. 20).

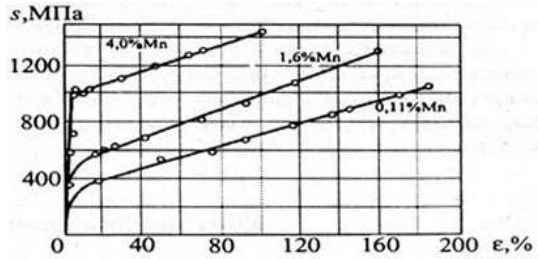



*Рис. 20. Влияние содержания марганца на прочность и пластичность закалённого и отпущенного (при $200^0$С) железа*

Оптимальные механические свойства обеспечиваются формированием в результате термической обработки дисперсных структур и более мелкого зерна. Легированные стали могут закаливаться в масле или на воздухе (т.к. обладают лучшей прокаливаемостью, чем углеродистые), что способствует уменьшению деформации изделий и вероятности образования трещин.

В конструкционных сталях основными легирующими элементами являются хром, никель, кремний и марганец.

Ni – увеличивает пластичность и вязкость стали, снижает температуру порога хладноломкости, уменьшает чувствительность к концентраторам напряжений, т.е. способствует повышению сопротивления стали хрупкому разрушению.

Cr – повышает жаростойкость и коррозионную стойкость стали, уменьшает коэффициент линейного расширения, существенно увеличивает прокаливаемость, замедляет процесс распада аустенита.

Si является раскислителелем при выплавке стали и увеличивает ее жаростойкость. Однако содержание кремния в стали ограничивают, поскольку он повышает склонность стали к тепловой хрупкости.

Mn – снижает критическую скорость охлаждения.

W, Mo, V, Ti, B служат для дополнительного улучшения свойств стали.

### *Классификация легированных сталей*

Четыре признака классификации:

1. По типу равновесной структуры;
2. По структуре после нормализации;
3. По химическому составу;
4. По назначению сталей.

(1). Доэвтектоидные, эвтектоидные, заэвтектоидные, ледебуритные (карбидные). С учетом фазового равновесия легированные стали относят к перлитному, карбидному, ферритному или аустенитному классам.

(2). По структуре после нормализации образуют три основных класса:

– перлитный (сорбит, троостит, бейнит в малолегированных сталях);

– мартенситный (легированные стали);

– аустенитный (высоколегированные стали).

3). По химическому составу: хромистые, марганцовистые, хромоникелевые, хромоникельмолибденовы е и т.п. Согласно этой же классификации стали подразделяют по общему количеству легирующих элементов в них на *низколегированные* (до 2,5%), *легированные* (2,5-10%), *высоколегированные* (>10%).

Разновидность – классификация по качеству: качественные, высококачественные, особовысококачественные. Качество стали – это комплекс свойств, обеспечиваемых металлургическим процессом, таки, как однородность химического состава, строения и свойств стали, ее технологичность. Эти свойства зависят от содержания газов (кислород, азот, водород) и вредных примесей – серы и фосфора.

4). Конструкционные, инструментальные, с особыми свойствами (автоматные, пружинные, шарикоподшипниковые, износостойкие, коррозионностойкие, жаропрочные и др.).

### *Маркировка легированных сталей*

Марка стали включает в себя цифры и буквы, указывающие на примерный состав стали. В начале марки приводятся двузначные цифры, указывающие на среднее содержание углерода в сотых долях процента. Буквы справа от цифры обозначают легирующие элементы: А – азот, Б – ниобий, В – вольфрам, Г – марганец, Д – медь, Е – селен, К - кобальт, Н – никель, М – молибден, П – фосфор, Р – бор, С – кремний, Т - титан, Ф – ванадий, Х – хром, Ц – цирконий. Ч – редкоземельные элементы, Ю – алюминий. Следующие после буквы цифры указывают примерное содержание (в целых процентах) соответствующего легирующего элемента (при содержании 1 – 1,5% и менее цифра отсутствует).

Высококачественные стали обозначаются буквой А, а особовысококачественные – буквой Ш, помещенной в конце марки. Если буква А расположена в середине марки, то это свидетельствует о том, что сталь легирована азотом. При обозначении автоматных сталей с повышенной обрабатываемостью резанием буква А ставится в начале марки (А20, А40Г и др.). Если автоматная сталь легирована свинцом, то обозначение марки начинается с сочетания букв АС (АС35Г2, где цифра 35 обозначает среднее содержание углерода в сотых долях процента).

Маркировка шарикоподшипниковой стали начинается с буквы Ш (ШХ15, где 15 – среднее содержание хрома в десятых долях процента). В начале обозначения марок быстрорежущих сталей ставится буква Р, за которой следует цифра, отражающая концентрацию вольфрама (Р18, Р6М5).

При маркировке сплавов на железоникелевой основе указывается количественное содержание никеля (в процентах) с перечислением лишь буквенных обозначений остальных легирующих элементов, например ХН38ВТ, ХН45МВТЮБР.

Таблица 6. Химический состав легированных сталей

| Марка стали (сплава) | Содержание элементов, масс. % (в пределах или не более) | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | C | Si | Мл | Сг | № | Mo | Ti | S | P | Прочие |
| I8X2H4MA | 0,14-0,20 | 0,17-0,37 | 0,25-0,55 | 1,35-1,65 | 4,0-4,40 | 0,30-0,40 | - | 0,025 | 0,025 | Си – 0,30 |
| ЗОХГСА | 0,28-0,34 | 0,90-1,20 | 0,80-1,10 | 0,80-1,10 | 0,30 | - | - | 0,025 | 0,025 | Си – 0,30 |
| ЗОХГСН2А | 0,27-0,34 | 0,90-1,20 | 1,00-1,30 | 0,90-1,20 | 1,40-1,80 | - | - | 0,025 | 0,025 | Си – 0,30 |
| О3Н18К9М5Т | 0,03 | 0,10 | 0,10 | - | 17,7-19,0 | 4,6-5,5 | 0,50-0,80 | 0,010 | 0,010 | Со – 8,5-9,5 Al – 0,15 |
| АС19ХГН | 0,16-0,21 | 0,17-0,37 | 0,7-1,1 | 0,8-1,1 | 0,8-1,1 | 0,10 | - | 0,035 | 0,035 | РЬ – 0,15-0,30 |
| ЛС40ХГНМ | 0,37-0,43 | 0,17-0,37 | 0,5-0,8 | 0,6-0,9 | 0,7-1,1 | 0,15-0,25 | - | 0,035 | 0,035 | РЪ – 0,15-0,30 |
| АЦ3ОХМ | 0,26-0,34 | - | 0,4-0,7 | 0,8-1,1 | - | 0,15-0,25 | - | 0,035-0,060 | 0,035 | Са – 0,03-0,09 Си –0,30 |
| 60С2ХФА | 0,56-0,64 | 1,4-1,8 | 0,4-0,7 | 0,9-1,2 | 0,25 | - | - | 0,025 | 0,025 | V – 0,1-0,2 |
| 95Х18 | 0,9-1,0 | 0,8 | 0,8 | 17-19 | 0,6 | - | 0,2 | 0,025 | 0,03 | Си – 0,30 |
| 08Х13 | 0,08 | 0,8 | 0,8 | 12-14 | 0,6 | - | 0,2 | 0,025 | 0,030 | Си – 0,30 |
| 12Х17 | 0,12 | 0,8 | 0,8 | 16-18 | 0,6 | - | 0,2 | 0,025 | 0,035 | Си – 0,30 |
| 40Х13 | 0,36-0,45 | 0,8 | 0,8 | 12-14 | 0,6 | - | 0,2 | 0,025 | 0,030 | Си – 0,30 |
| 40ХIОС2М | 0,35-0,45 | 1,9-2,6 | 0,8 | 9,0-10,5 | 0,6 | 0,7-0,9 | 0,2 | 0,025 | 0,030 | Си – 0,30 |
| 10Х13СЮ | 0,07-0,12 | 1,2-2,0 | 0,8 | 12,0-14,0 | - | - | - | 0,025 | 0,030 | Al – 1,0-1,8 |
| 12ХI8Н9 | 0,12 | 0,8 | 2,0 | 17-19 | 8,0-10,0 | - | 0,5 | 0,025 | 0,035 | Си – 0,30 |
| 12Х18Н9Т | 0,12 | 0,8 | 2,0 | 17-19 | 8,0-9,5 | | 0,8 | 0,020 | 0,035 | Си = 0,30 |
| 09Х15Н8Ю | 0,09 | 0,8 | 0,8 | 14-16 | 7,0-9,4 | | | 0,025 | 0,035 | М = 0,7-1.3 |
| 36Х18Н25С2 | 0,32-0,40 | 2,0-3,0 | 1,5 | 17,0-19,0 | 23,0-26,0 | | | 0,025 | 0,035 | |
| 12Х1МФ | 0,08-0,I5 | 0,17-0,37 | 0,40-0,70 | 0,90-1,20 | 0,30 | 0,25-0,35 | | 0,025 | 0,030 | V=0,15-0,30 Си = 0,20 |
| 15Х12ВНМФ | 0,12-0,18 | 0,4 | 0,5-0,9 | 11,0-13,0 | 0.4-0.8 | 0.5-0.7 | 0,2 | 0,025 | 0,030 | W-0,7-1,1; V=0.15-0.30 Си = 030 |
| 09Х14Н19-В2БР | 0,07-0,12 | 0,6 | 2,0 | 13,0-15,0 | 18,0-20,0 | | | 0,020 | 0,035 | W = 2,0-2,8, B = 0,005. Nb = 0.9-1,3 Ce = 0,02 |
| 45ХI4Н14-В2М | 0,40-0,50 | 0,8 | 0,7 | 13,0-15,0 | 13,0-15,0 | 0,25-0,40 | - | 0,020 | 0,035 | W = 2,0-2,8 Си = 0,30 |
| 40Х15Н7-Г7Ф2МС | 0,38-0,47 | 0,9-1,4 | 6,0-8,0 | 14,0-16,0 | 6,0-8,0 | 0,65-0,95 | - | 0,020 | 0,035 | V = 1,5-1,9 |
| IOXI1H23-T3MP | 0,10 | 0,6 | 0,6 | 10,0-12,5 | 21,0-25,0 | 1,0-1,6 | 2,6-3,2 | 0,020 | 0,030 | At =0,8; B = 0,02 |
| ХН35ВТ | 0,12 | 0,6 | 1,0-2,0 | 14,0-16,0 | 34,0-38,0 | - | 1,1-1,5 | 0,020 | 0,030 | W = 2,8-3,5 |

*Примечание:* А – азот, Б – ниобий, В – вольфрам, Г – марганец, Д – медь, Е – селен, К – кольбат, Н – никель, М – молибден, П – фосфор, Р – бор, С – кремний, Т – титан, Ф – ванадий, Х – хром, Ц – цирконий, Ч – редкоземелье элементы, Ю – алюминий.

***Цементуемые (нитроцементуемые) легированные стали.***

К таким относятся низко- и среднелегированные стали: 20Х, 15ХФ, 12ХН3А, 25ХГТ и др. с содержанием углерода 0,1-0,3% С, обеспечивающие после химико-термической обработки, закалки и низкого отпуска высокую поверхностную твердость (HRC 58-62), при вязкой, прочной сердцевине (HRC 35-45). Эти стали используют для изготовления деталей машин и приборов (кулачков, зубчатых колес и др.), испытывающих переменные и ударные нагрузки и одновременно подверженных износу.

Таблица 7. Механические свойства легированных сталей

| Марка стали (сплава) | Термическая обработка при Т, $^0$С; охлаждающая среда | | $\sigma_{0,2}$ | $\sigma_в$ | $\sigma_5$ | Ψ | KCU, МДж/м$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | закалка | отпуск (старение) | МПа, не менее | | % не менее | | |
| 18Х2Н4МА | 950(вз)860(вз) | 200(вз,м) | 835 | ИЗО | 12 | 50 | 0.98 |
| 3ОХГСА | 880(м) | 540(вм) | 830 | 1080 | 10 | 45 | 0.50 |
| 30ХГСН2А | 900(м) | 260(вз,м) | 1375 | 1620 | 9 | 45 | 0.59 |
| 03Н18К9М5Т | 1220(в)/940(в) | 530(вз) | 1810 | 1910 | - | 40 | 0.35 |
| АС19ХГН | 875(м,в) | 165(вз) | 835 | 1180 | 7 | - | 0.68 |
| АС40ХГНМ | 840(м) | 600(вз) | 835 | 980 | 12 | - | 0.88 |
| АЦ3ОХМ | 880(м) | 540(в,м) | 735 | 930 | 11 | 45 | 0.78 |
| 60С2ХФА | 870(м) | 470(вз) | 1470 | 1670 | 6 | 25 | - |
| 95Х18 | 1040(м,в) | обр. хол. -70°, отп. 155 (вз) | - | 2140 | - | - | 0.63 |
| 08Х13 | 1025(м) | 750(м) | 410 | 590 | 20 | 60 | 0.98 |
| 12Х17 | отжиг 770(вз,в) | - | 245 | 390 | 20 | 50 | - |
| 40Х13 | 1000(м) | 200(м) | 1620 | 1840 | 1 | 2 | 0.19 |
| 40Х10С2М | I030(вз,м) | 750(м) | 735 | 930 | 10 | 35 | 0,20 |
| 10Х13СЮ | отжиг 850(вз,м) | - | 345 | 490 | 15 | 60 | - |
| 12XI8H9 | 1080(вз) | - | 230 | 560 | 46 | 66 | 2.20 |
| 12Х18Н9Т | 1050(в) | - | 280 | 620 | 41 | 63 | 240 |
| 09Х15Н8Ю | 950(вз,в) | обр. хол. -70$^0$, стар. 380 | 900 | 1200 | 10 | 45 | 0,40 |
| 36Х18Н25С2 | I200(в) | 800(вз) | 550 | 855 | 17 | 18 | 0.50 |
| 12Х1МФ | норм. 970(вз) | 725(вз) | 255 | 470 | 21 | 55 | 0.98 |
| 15Х12ВНМФ | 1010(м) | 690(вз) | 590 | 740 | 15 | 45 | 0.59 |
| 09Х14Н19В2БР | 1150(вз) | - | 215 | 510 | 35 | 50 | - |
| 45Х14Н14В2М | - | 820(вз) | 315 | 710 | 20 | 35 | - |
| 40Х15Н7Г7Ф2МС | 1180 (в,вз) | 800(вз) | 590 | 886 | 16 | 15 | 0.29 |
| 10Х11Н23Т3МР | 1135(вз,м) | 775(в) | 590 | 880 | 8 | 10 | 0.29 |
| ХН35ВТ | 1000(в) | 870/730 печь | 440 | 800 | 18 | 30 | 0.80 |

*Примечание*: Охлаждающая среда: в – вода; м – масло; вз – воздух; печь – охлаждение в печи

### *Улучшаемые легированные стали*

Улучшаемыми называют такие стали, которые используются после закалки с высоким отпуском (улучшения) – стали 40Х, 40ХФА, 30ХГСА, 38ХН3МФА и др., содержат 0,3-0,5% углерода и 1 – 6% легирующих элементов. Стали закаливают с 820-880$^0$С в масле (крупные детали – в воде), высокий отпуск производят при 500-650$^0$С с последующим охлаждением в воде, масле или на воздухе (в зависимости от состава стали). Данные стали применяют для изготовления валов, шатунов, штоков и других деталей, подверженных воздействию циклических или ударных нагрузок. Улучшаемые стали должны обладать высоким пределом текучести, пластичностью, вязкостью, малой чувствительностью к надрезу.

Стали склонны к отпускной хрупкости – охрупчивании стали при некоторых условиях отпуска. Различают два рода отпускной хрупкости, что соответствует двум минимумам ударной вязкости на ее зависимости от от температуры отпуска: для отпуска при 300$^0$С и при ~550$^0$С.

Стали относят и мартенситному классу, слабо разупрочняются при нагреве до 300-400$^0$С. Из них изготавливают валы и роторы турбин, детали редукторов и др.

### *Высокопрочные стали*

Высокорочными называют стали, имеющие предел прочности 1500-2000 МПа и более. Этим сталям необходимо иметь достаточный запас пластичноти и вязкости. К высокопрочным сталям относятся:

а) *среднеуглеродистые комплексно-легированные стали,* используемые после закалки с низким отпуском или после ТМО: 30ХГСН2А, 40ХН2МА, 38НА3МА;

б) *мартенситно-стареющие* (03Н18К9М5Т, Н12К15М10 и др.)

в) *метастабильные аустенитные стали* (трип-стали).

Мартенситно-стареющие стали превосходят по конструктивной прочности и технологичности рассмотренные ранее среднеуглеродистые стали. Они обладают высокой конструктивной прочностью в интервале температур от криогенных до 500$^0$с и рекомендуются для изготовления корпусов ракетных двигателей, стволов оружия, корпусов подводных лодок, зубчатых колес, шпинделей, червяков и др.

### *Пружинные стали общего назначения*

Основные требования к пружинным сталям – обеспечение высоких значений пределов упругости, текучести, выносливости, пластичности и сопротивления хрупкому разрушению.

Стали для пружин и рессор содержат 0,5 – 0,7% С, Si – до 2,8%, Mn – до 1,2%, Cr – до 1,2 %, V до 0,25%, W – до 1,2%, Ni – до 1,7%.

Широкое применение на транспорте нашли стали 55С2, 60С2А, 70С3А; 60СХФА, 65С2ВА. Термическая обработка легированных пружинных сталей (закалка при 850 – 880$^0$С, отпуск при 380 – 550$^0$С) обеспечивает получение высоких пределов прочности и текучести при пластичности до 5-12%.

### *Шарикоподшипниковые стали*

Для обеспечения работоспособности изделий шарикоподшипниковая сталь должна обладать высокой твердостью, прочностью и контактной выносливостью. Это достигается повышением качества металла: его очисткой от неметаллических включений и уменьшением пористости посредством использования электрошлакового или вакуумно-дугового переплава.

Широко используют шарикоподшипниковые (Ш) хромистые (Х) стали ШХ15; ШХ15СГ (цифра 15 указывает содержание хрома в десятых долях процента - 1,5%). Стали содержат по 1% С. Детали подшипников качения, испытывающие большие динамические нагрузки, изготавливают из сталей 20Х2 Н4А и 18ХГТ с последующей их цементацией и термической обработкой.

### *Износостойкая высокомарганцевая аустенитная сталь*

Износостойкость деталей обычно в первую очередь обеспечивается повышенной твердостью поверхности. Однако высокомарганцевая аустенитная сталь 110Г13Л (1,25% С, 13% Mn, 1% Cr, 1% Ni) при низкой начальной твердости (180 – 220 НВ) успешно работает на износ в условиях абразивного трения, сопровождаемого воздействием высокого давления и больших динамических (ударных) нагрузок (такие условия работы характерны для траков гусеничных машин, щек камнедробилок и др.). Это объясняется повышенной способностью стали упрочняться в процессе холодной пластической деформации. Высокая износостойкость стали достигается не только деформационным упрочнением аустенита, но и образованием мартенсита с гексагональной или ромбоэдрической решеткой.

В условиях кавитационного износа детали изготавливают из сталей 30Х10Г10, ОХ14Г12М.

### *Коррозионностойкие (нержавеющие) стали и сплавы*

По механизму протекания различают химическую коррозию, возникающую под воздействием газов или неэлектролитов (нефть), и электрохимическую, развивающуюся в случае контакта металла с электролитами (кислоты, щелочи, соли, влажная атмосфера, почва, морская вода).

Устойчивые против электрохимической коррозии стали называются коррозионостойкими (нержавеющими).

Введение более 12-14% хрома резко изменяет электрохимический потенциал стали с отрицательного на положительный и делает ее коррозионостойкой. Различают две основных группы нержавеющих сталей: хромистые (13, 17 и 27% Cr) и хромоникелевые (аустенитные, аустенитно-мартенситные, аустенитно-ферритные).

Хромистые стали с низким содержанием углерода (08Х13, 12Х13) пластичны, хорошо свариваются и штампуются. Их подвергают закалке в масле ($1000 – 1050^0$С) с высоким отпуском при $600 – 800^0$С и применяют для изготовления деталей, испытывающих ударные нагрузки или работающих в слабоагрессивных средах.

Структура хромоникелевых сталей зависит от содержания углерода, хрома, никеля и других элементов.

Определить, к какому классу по структуре относится та или иная сложнолегированная хромоникелевая сталь, можно с помощью схематической диаграммы Шеффлера, в которой использованы в качестве критериев эквиваленты хрома и никеля.

***Диаграмма Шеффлера***

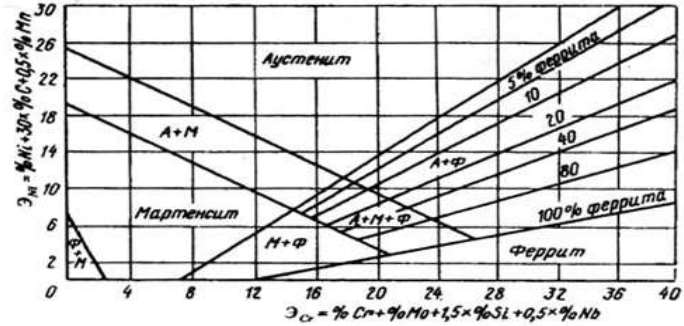



*Рис. 21. Структурная диаграмма хромоникелевых нержавеющих сталей*

***Жаростойкие и жаропрочные стали***

Жаростойкость (окалиностойкость) – сопротивление металла окислению в газовой среде при высоких температурах. (t°>550°C).

Для повышения окалиностойкости сталь легируют элементами (хромом, алюминиеми кремнием), имеющими большее сродство к кислороду, чем железо, и образующими на поверхности стали плотные оксидные пленки типа $(Cr, Fe)_2O_3$, $(Al,Fe)_2O_3$ и др.

*Сильхромы* – стали, легированные хромом и кремнием, *хромали* - стали, легированные хромом и алюминием, *сильхромали* – легированные хромом, алюминием и кремнием.

Жаропрочные стали используют при работе под нагрузкой при температуре выше 500°C. Легирование вносит существенный вклад в повышение жаропрочности сталей: во-первых, возрастает энергия межатомной связи в твердых растворах (а следовательно, затормаживаются диффузионные процессы); во-вторых, за счет легирования и термической обработки (закалка с последующим старением) формируется специальная гетерогенная структура, состоящая из твердого раствора и вкрапленных в него дисперсных карбидных или интерметаллидных фаз, когерентных с основой.

Жараопрочные стали перлитного класса – низколегированные стали 12Х1МФ; 25Х1М1Ф и др., содержащие 0,08-0,25% С и легирующие элементы – Cr, V, Mo, Nb.

Стали мартенситного и мартенситно-ферритного классов – 15Х11МФ, 11Х11Н2В2МФ и др., используются при температурах до 580-600$^0$C.

Аустенитные стали – обладают большей жаропрочностью, чем мартенситные, работают до 700-750°C. Пластичны, хорошо свариваются.

## Цветные металлы и сплавы

Широко применяются в различных областях производства, например, в авиационной промышленности, строительстве, транспортном машиностроении, приборостроении, судостроении и других отраслях.

### *Магний и его сплавы*

Характеризуются высокой удельной прочностью, хорошо поглощаются вибрации, не взаимодействуют с ураном. Хорошо обрабатываются резанием и удовлетворительно свариваются аргонодуговой и контактной сваркой. Основные легирующие элементы – Mn, Al, Zn.

По технологии изготовления – литейные (маркировка «МЛ») и деформируемые («МА»).

*Литейные сплавы***.** Широкое применение нашли марки сплавов МЛ5 и МЛ6, отличающиеся повышенными литейными и механическими свойствами. Они могут упрочняться как гомогенизацией и закалкой на воздухе (Т4), так и добавочным старением (Т6).

*Деформируемые сплавы (прессованные)*. Обладают более высоким комплексом механических свойств, чем литейные. Сплавы производят в виде поковок, штамповых заготовок, горячекатаных полос, прутков и профилей. Хорошей коррозионной стойкостью, свариваемостью и технологической пластичностью отличается сплав МА1, относящийся к группе сплавов низкой прочности. Сплав МА2-1 сочетает в себе оптимальный комплекс механических и технологических свойств (хорошо сваривается, штампуется), но подвержен коррозии под напряжением.

Температурные интервалы технологических процессов обработки давлением магниевых сплавов находятся в пределах: прессование при 300-480°С, прокатка при 440-225°С, штамповка в закрытых штампах при 480-280°С.

Применение магниевых сплавов: изготавливают корпуса ракет, насосов, приборов, рамы двигателей, кожухи и др.

Таблица 8. Химический состав и механические свойства магниевых сплавов

| Сплав | Содержание элементов (средние значения), % | | | | Режим термической обработки | σ, МПа | δ, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Al | Zn | Mn | другие элементы | | средние значения | |
| Литейные сплавы | | | | | | | |
| МЛ5 | 8,25 | 0,5 | 0,35 | — | Т4 | 226 | 5 |
| МЛ6 | 9,6 | 0,9 | 0,12 | — | Т6 | 216 | 1 |
| МЛ10 | — | 0,4 | — | 0,7 Zr; 2,5 Nd | Т6 | 230 | 3 |
| МЛ12 | — | 4,5 | — | 0,85 Zr | Т1 | 225 | 5 |
| Деформируемые сплавы | | | | | | | |
| МАI | — | — | 1,9 | — | — | 205 | 7,5 |
| МА2-1 | 4,4 | 1,15 | 0,5 | — | — | 300 | 14 |
| МА14 | — | 5,5 | — | 0,55 Zr | Т5 | 330 | 10 |

*Примечание*: Режимы термической обработки: Т1 – старение; Т4, Т5 и Т6 указаны в тексте.

### *Алюминий и его сплавы*

Основные легирующие элементы алюминиевых сплавов: Cu, Zn, Mg, Ni, Fe,Mn, Ti, Cr.

Маркируются алюминиевые сплавы в соответствии с одновременно «сосуществующими» старой буквенно-цифровой маркировкой (табл. 9) и новой цифровой (табл. 10).

Таблица 9. Принципы цифровой маркировки алюминиевых сплавов

Таблица 10. Буквенно-цифровая маркировка алюминиевых сплавов

| Принцип классификации | Сплав | |
|---|---|---|
| | название | обозначение |
| По химическому составу | — | АМг, АМц |
| По названию сплава | Дюралю мин | Д1.Д6 |
| По технологическому назначению | Ковочный | АК6. АК8 |
| По свойствам | Высокопрочный | В95, В96 |
| По методу получения полуфабрикатов и изделий | Спеченный литейный | САП, САС, АЛ2 |
| По виду полуфабрикатов | Проволочный | Амг5П |

Классифицируются алюминиевые сплавы в основном на деформируемые и литейные. Сплавы разделяют также по способности упрочняться термической обработкой на упрочняемые, естественного старения или искусственные и неупрочняемые.

Деформируемые: коррозионостойкие повышенной пластичности (две группы):

а) сплавы на основе систем Al-Mn (АМц) и Al-Mg (АМг6), не упрочняемые ТО.

б) Al-Mg-Si (АВ, АД31, АД33), упрочняемые закалкой (520-530°С) и искусственным старением (150-170°С в течение 10-12 часов). Удовлетворительно обрабатываются резанием в закаленном и состаренном состоянии, свариваются с помощью точечной, шовной и аргонодуговой сварки.

Дюралюмины Д1, Д16,Д18,ВД17 и др. упрочняются ТО, хорошо свариваются точечной сваркой, удовлетворительно обрабатываются резанием.

Высокопрочные сплавы Al-Zn-Mg-Cu (В93, В95). Лучшая коррозионностойкость, чем у дюралюминов.

Ковочные сплавы Ак6 и Ак8. Они удовлетворительно свариваются, хорошо обрабатываются резанием, но склонны к коррозии под напряжением. Обладают высокой пластичностью при горячей обработке.

***Литейные алюминиевые сплавы.*** Конструкционные герметичные сплавы Al-Si (АЛ2) и Al-Si-Mg (АЛ4, АЛ9, АЛ34) – силумины.

Высокопрочные и жаропрочные литейные сплавы Al-Cu-Mn (АЛ19), Al-Cu-Mn-Ni (АЛ33), Al-Si-Cu-Mg (АЛ3, АЛ5).

Таблица 11. Буквенно-цифровая маркировка технологической обработки деформируемых и литейных сплавов

| Обозначение | Вид обработки, характеристиха свойств материала | |
|---|---|---|
| | Деформируемые ставы | Литейные сплавы |
| М | Мягкий, отожженный | Модифицированный |
| Т | Закаленный и естественно состаренный | — |
| Т1 | Закаленный и искусственно состаренный на максимальную прочность | Состаренный |
| Т2 | Закаленный и искусственно состаренный по смягчающему режиму для повышения вязкости разрушения | Отожженный |
| Т3 | Закаленный и искусственно состаренный по смягчающему режиму для повышения сопротивления коррозии под напряжением | |
| Т4 | — | Закаленный |
| Т5 | | Закаленный и частично состаренный |
| Т6 | | Закаленный и полностью состаренный на максимальную твердость |
| Т7 | — | Закаленный с последующим стабилизирующим отпуском |
| Т8 | — | Закаленный с последующим смягчающим оттеком |
| Н | Нагартованный (5-7%) | — |
| П | Полунагартованный | — |
| НІ | Усиленно нагартованный{20%) | — |

Таблица 12. Примеры маркировок алюминиевых сплавов

| Легирующие элементы | Маркировка | | Легирующие элементы | Маркировка | |
|---|---|---|---|---|---|
| | буквенная | цифровая | | буквенная | цифровая |
| Al (чистый) | АДОО | 1010 | Си, Mg, Mn, Si | АК6 | 1360 |
| Мп | АМц | 1400 | | АК8 | 1380 |
| Mg—Мп | АМrl | 1510 | Си, Mg, Fe, Ni, Si | АК4 | 1140 |
| | АМг5 | 1550 | | АК4-1 | 1141 |
| Mg—Si | АВ | 1343 | Zn—Mg | — | 1911 |
| Си—Mg | Д1 | 1100 | Zn—Mg—Си | В95 | 1950 |
| | Д16 | 1160 | | В96Ц1 | 1960 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | ВАД1 | 1191 | Си—Mn | Д20 | 1200 |
| | Д18 | 1187 | | — | 1201 |

В настоящее время получили распространение гранулируемые алюминиевые сплавы, отличающиеся высоким содержанием легирующих элементов, нерастворимых или малорастворимых в алюминии. Из гранул изготавливают прессованные полуфабрикаты и листы любых алюминиевых сплавов.

### *Титан и его сплавы*

Обладают высокой коррозионной стойкостью (сопротивлением межкристаллитной, щелевой и другим видам коррозии), ударной прочностью. Недостатки: активное взаимодействие с атмосферными газами, склонность к водородной хрупкости. Титан плохо обрабатывается резанием, удовлетворительно – давлением, сваривается в защитной атмосфере, широко распространено вакуумное литье.

### *Классификация титановых сплавов:*

В зависимости от стабильной структуры сплавов после отжига при нормальной температуре подразделяют на три основные группы:

– α-сплавы; (α+β)-сплавы (двухфазные), β-сплавы.

– по технологии производства (деформируемые, литейные, порошковые).

– по физико-химическим, в том числе механическим свойствам (высокопрочные, обычной прочности, высокопластичные, жаропрочные, коррозионностойкие).

### *ТО титановых сплавов*

*Рекристаллизационный (простой) отжиг* – для холоднодеформированных сплавов (650-850$^0$С).

*Изотермический отжиг* (нагрев до 780-980°С с последующим охлаждением в печи до 530-680°С, выдержка при этой температуре и охлаждение на воздухе.

*Двойной ступенчатый отжиг.* Переход от первой ступени ко второй осуществляется охлаждением сплава на воздухе с последующим повторным нагревом до температуры второй ступени, что приводит к упрочнению сплава и некоторому снижению пластичности.

*Неполный отжиг* при t°500-680°С с целью снятия возникающих при механической обработке остаточных напряжений.

*Упрочняющая термическая обработка* (закалка с последующим искусственным старением или отпуском) (рис. 22).

Титановые сплавы подвергают химико-термической обработке, например азотированию, для повышения износостойкости.

*Деформируемые титановые сплавы*: ВТ5-1, ОТ4, ВТ6, ВТ8, ВТ14, ВТ15.

Большинство титановых сплавов легировано алюминием, повышающим жесткость, прочность, жаропрочность и жаростойкость материала, а также снижающим его плотность (табл. 13).

*Литейные титановые сплавы.* По сравнению с деформируемыми литейные сплавы имеют меньшую прочность, пластичность и выносливость, более дешевы.

*Порошковые титановые сплавы.* Применение методов порошковой металлургии позволяет при тех же эксплуатационных свойствах, что и у литого или деформируемого материала, добиться снижения до 50% стоимости и времени изготовления изделий.

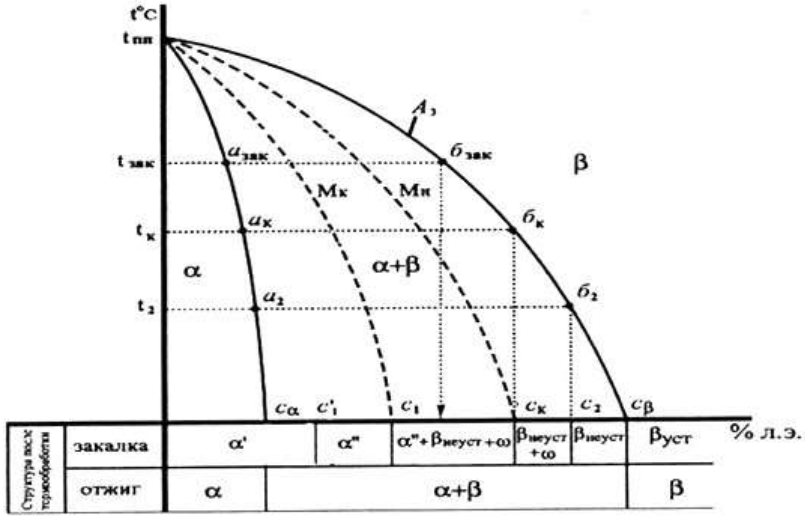



*Рис.22. Влияние скорости охлаждения (из β-области) и концентрации β-стабилизатора на структуру титановых сплавов:*
*$t_{пп}$ – температура полиморфного превращения 882,5 °С; закалка – быстрое охлаждение в воде; отжиг – медленное охлаждение (с печью или на воздухе)*

Таблица 13. Усреднённый химический состав (%) и механические свойства деформируемых титановых сплавов

| Сплав | Al | Mn | V | Mo | Si | Cr | Sn | σ, МПа | 5,% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ВТ5-1 | 5 | – | – | – | – | – | 2,5 | 800-1000 | 10-15 |
| 0Т4 | 3 | 1,5 | – | – | – | – | – | 700-900 | 10-12 |
| ВТ6 | 6 | – | 4,4 | – | – | – | – | 1100-1250 | 6 |
| ВТ8 | 6,5 | – | – | 3,5 | 0,3 | – | – | 1000-1250 | 9-11 |
| ВТ14 | 5,5 | – | 1 | 3,0 | – | – | – | 1150-1400 | 6-10 |
| ВТ15 | 3 | – | – | 8 | – | 11 | – | 1300-1500 | 6 |

*Примечание*. Свойства сплавов ВТ5-1, ОТ4 и ВТ8 приведены в отожжённом состоянии, ВТ6 и ВТ14 – после закалки и старения, ВТ15 – после старения.

### *Медь и ее сплавы*

Сплавы и меди с цинком называют латунями, томпаками (до10% Zn) или полутомпаками (10-20%Zn), все другие сплавы называются бронзами.

Медь и ее сплавы находят широкое применение в электротехнике, электронике, приборостроении, литейном производстве, двигателестроении. Медь и ее сплавы обладают ценными техническими и технологическими свойствами: высокими электро- и теплопроводностью, коррозионной стой-

костью, хорошо обрабатываются давлением, свариваются всеми видами сварки (табл. 14).

Таблица 14. Свойства сплавов на основе меди

| Марка сплава | γ Мг/м' | λ, Вт/(мК) | Е, МПА | σ, МПа | δ, % | НВ. кгс/мм$^1$ | Способ получения и обработки |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Медь Ml | 8,94 | 386,2 | 132 | 400(240) | 6(58) | 110(45) | Н(0) |
| Л 96 | 8,83 | | 114 | 400(240) | 2(52) | 145 (53) | Н(0) |
| Л90 | 8,8 | 188,3 | 110 | 660(260) | 4(44) | 130(53) | Н(0) |
| Л70 | W3 | 121,3 | 112 | 680(330) | 3(55) | | Н(0) |
| ЛС59-1 | 8,5 | 104,6 | 105 | 650(400) | 6(45) | 170(75) | Н(0) |
| ЛЖМц59-1-1 | 8,5 | 75,3 | 106 | 700(420) | 10(50) | 170(75) | Н(0) |
| ЛЦ16К4 | | | | 294(343) | 15(15) | 100(110) | П(К) |
| ЛЦ40С | | | | 215(215) | 12(20) | 70(80) | П(К) |
| БрОФб ,5-0,4 | 8,8 | 73,2 | 112 | 750(400) | 10(65) | 180(80) | Н(0) |
| БрОЦ4-3 | 8,8 | 83,7 | 100 | 680(400) | 4(40) | 160(60) | Н(0) |
| БрОЦС4-4-2,5 | 9,02 | 83,7 | 75 | 600(350) | 2(40) | 160(60) | Н(0) |
| БрОЗЦ12С5 | | | | 176(206) | 8(5) | 60(60) | П(К) |
| Бр05Ц5С5 | | | | 147(176) | 6(4) | 60(60) | П(К) |
| Бр05С25 | 9,1 | 58,6 | 70 | 147(137) | 5(6) | 45(60) | П(К) |
| БрО10Ф1 | | | | 216(245) | 3(3) | 80(90) | П(К) |
| БрА5 | 8,2 | 104,6 | 105 | 780(380) | 4(55) | 190(60) | Н(0) |
| БрАЖ9-4 | 7,5 | 58,6 | из | 980(600) | 5(33) | 180(110) | Н+(0) |
| БрАЖН 10-4-4 | 7,5 | 75,3 | 119 | 1080(700) | 5(25) | 225(150) | Н+(0) |
| БрА9ЖЗЛ | | | | 392(490) | 10(12) | 100(100) | П(Ю |
| БрА11Ж6Н6 | | | | 587(587) | 2(2) | 250(250) | П(К) |
| БрБ2,5 | 8,2 | 83,7 | 133 | 560(1300) | 30(2) | 130(440) | З(З+С) |
| БрКМцЗ-1 | 8,4 | 37,7 | 105 | 750(400) | 13(60) | 200(90) | Н(0) |
| БрХ0,5 | 8,9 | 167,4 | 112 | 240(410) | 50(22) | 65(130) | З(З+С) |
| БрЦр0,4 | 8,85 | 334,7 | 137 | 270(480) | 35(17) | 65(135) | З(З+Н+С) |

*Примечание.* Н – сплав нагартованный, упрочнённый со степенью пластической деформации 50% (Н), О – отожжённый при 600°С после соответствующей степени деформации; З – закалённый, (З+С) – после закалки и старения, (З+Н+С) – закалённый, нагартованный и состаренный; П – литьё в песчанные формы, К – литьё в кокиль.

### *Латуни*

*Деформируемые латуни* обозначают по ГОСТ 15527-70 буквой Л и цифрой, указывающей массовое содержание меди в сплаве в процентах, например, Л96, Л63. Если латунь легирована наряду с цинком другими элементами, то после буквы Л ставят условное обозначение этих элементов. С – свинец, О – олово, Ж – железо, А – алюминий, К – кремний, Н – никель, Мц - марганец. Числа после букв показывают массовое содержание меди и последущих (госласно буквам) легирующих элементов, кроме цинка. Например, ЛАН59-3-2 содержит около 59% Cu, 3% Al, 2% Ni, Zn - остальное.

Маркировка литейных латуней по ГОСТ 17711-93 начинается также с буквы Л. После буквенного обозначения основного легирущего элемента (цинк) и каждого последующего (как в сталях) ставится цифра, указываю-

щая его усредненное содержание в сплаве. Например, латунь ЛЦ23А6Ж3Мц2 содержит 23% Zn, 6% Al, 3% Fe, 2% Mn.

По сравнению с медью латуни обладают большей прочностью, твердостью, коррозионной стойкостью и жидкотекучестью. Деформируемые латуни используются при производстве изделий и полуфабрикатов различными способами обработки металлов давлением. Специальные латуни, легированные железом, (ЛЖМц59-1-1) или особенно оловом (ЛО70-1), отличаются высокой коррозионной стойкостью в условиях воздействия атмосферных явлений, а также в пресной и морской воде. «Автоматная» латунь ЛС59-1, обладающая сыпучей стружкой, используется для изготовления деталей. В том числе метизов (винтов, гаек, болтов и др.), на станках-автоматах.

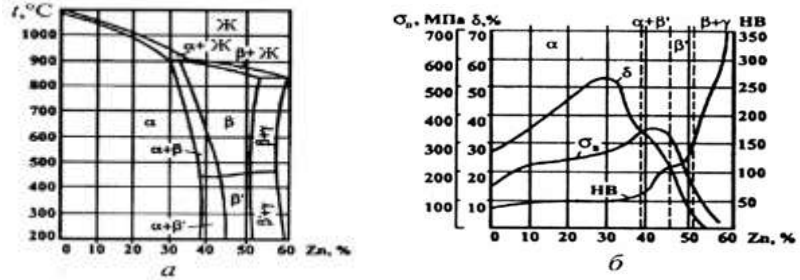



*Рис. 23. Влияние содержания цинка на фазовый состав (а) и механические свойства (б) сплавов меди*

Литейные латуни используют для фасонного литья. Для литья арматуры часто используют кремнистую латунь ЛЦ16К4, а втулки и сепараторы шариковых и роликовых подшипников льют из свинцовой латуни ЛЦ40С.

### *Бронзы*

Маркируют бронзы буквами Бр; затем буквами последовательно указывают легирущие элементы и в конце их содержание в сплаве. Так обозначают деформируемые бронзы по ГОСТ 5017-74, 18175-78. Напрмер, БрОФ6,5-0,4 содержит 6,5% Sn и 0,4% P, Cu – остальное. Обозначение элементов в бронзах то же, что и при маркировке латуней. Кроме того, фосфор обозначают буквой Ф, цинк – Ц, хром – Х, бериллий – Б, цирконий – Цр. Маркировка литейных бронз по ГОСТ 613-79, 493-79 начинается также с букв Бр, а дальше производится аналогично обозначению литейных латуней. Например, БрО3Ц12С5 содержит 3% Sn, 12% Zn, и 5%Pb.

*Оловянные бронзы* по структуре бывают однофазными (α-твердый раствор олова в меди) и двухфазными: α и δ ($Cu_{31}Si_8$) – фазы. Повышение содержания олова приводит к возрастанию прочности литейных бронз, а с появлением большого количества хрупкой δ-фазы она резко падает (рис. 24). При этом также заметно снижается пластичность.

*Деформируемые* оловянные бронзы: Бр ОФ 4,5-0,4; Бр ОЦС4 -4 -2,5. Их дополнительно легируют фосфором (до 0,4%), цинком (до 4%), и свинцом (до 2,5%).По сравнению с литейными деформируемые бронзы характе-

ризуются более высокой прочностью, вязкостью, пластичностью, и сопротивлением усталости.

*Литейные оловянные бронзы*: БрОЗЦ12С5; БрОЗЦ7С5Н1 и др. имеют двухфазную структуру. Для них характерна невысокая жидкотекучесть, но в то же время малая линейная усадка. Они коррозионностойки и обладают высокими антифрикционными свойствами.

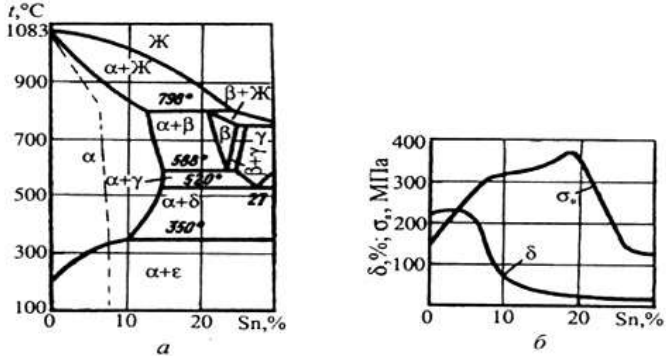



*Рис.24. Влияние содержания на фазовый состав (а) и механические свойства (б) сплавов меди (пунктиром показан неравновесный солидус диаграммы состояния)*

*Алюминиевые бронзы* могут быть как двойными (например, БрА5), так и дополнительно легированными никелем, марганцем, железом и др. Они хорошо пластически деформируются как в холодном (сплавы, содержащие менее 7-8% Al), так и в горячем состоянии, коррозионностойки, обладают высокими механическими свойствами. Алюминиевые бронзы бывают деформируемыми и литейными.

*Кремнистые бронзы* (БрКМц3-1) характеризуются хорошей прочностью и пластичностью. Они немагнитны, морозостойки. Никель и марганец повышают механические и коррозионные свойства бронз. Сплавы свариваются, подвергаются пайке.

*Бериллиевые бронзы* обладают высокими механическими свойствами, стойкостью против коррозии, хорошей свариваемостью (БрБ2, БНТ – 1,7). Цифры в маркировке указывают содержание бериллия в масс. %.

*Хромовые бронзы* (БрХ0,5) обладают высокими механическими свойствами, хорошей электро- и теплопроводностью. Бронзы содержат 0,4-1% Cr, 0,2% Ag. Серебро повышает механические свойства и температуру рекристаллизации бронз.

*Циркониевые бронзы*. Сочетают высокую тепло- и электропроводность, близкую к меди, жаропрочность. БрЦр0,2- БрЦр0,7.

### *Применение сплавов на основе меди*

Высокотехнологичные латуни используют для получения изделий глубокой вытяжки (радиаторные и конденсаторные трубки, сильфоны. гибкие шланги). Латуни, содержащие свинец, используют при работе в условиях трения (в часовом производстве, в типографских машинах).

Оловянные бронзы применяют для литья художественных изделий. При дополнительном легировании фосфором их используют для изготовления деталей, работающих на трение в коррозионной среде: подпятники, подшипники, уплотняющие втулки, пояски поршневых колец, клапаны. Высокопрочные алюминиевые бронзы идут на изготовление шестерен, втулок, подшипников, пружин, деталей электрооборудования. Хромовые и циркониевые бронзы применяют в двигателестроении (внутренний кожух, держатели форсунки и др.).

*Лекция 3*

# ОСНОВЫ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

## 1. Основные понятия и определения

***Шихта*** – совокупность исходных материалов для плавки, взятых в рассчитанном массовом соотношении. Руды или исходные металлы, топливо (при сжигании топлива в печах), легирующие добавки, модификаторы, флюсы, раскислители, шлаки предыдущих плавок.

***Руда*** – природное минеральное сырье, содержит металлы или их соединения в концентрациях и формах, приемлемых для промышленной переработки.

***Минералы:*** рудные (содержат нужный металл) и пустая порода.

***Топливо*** – источник теплоты, и реагент, восстанавливающий металл из его оксидов и других соединений.

Разновидности:

а) естественное – уголь, нефть, природный газ;

б) искусственное – мазут, генераторный, коксовый газ и другие, перерабатываемое из естественного топлива химическим или тепловым способом.

***Легирующие добавки*** – специально вводимые в сплав для придания ему особых свойств (прочности, пластичности, коррозионной стойкости и др.).

***Модификаторы*** – небольшие добавки (0,01-0,1%) веществ в расплав, оптимально изменяющие форму и размеры структурных составляющих.

***Флюсы*** – обеспечивают сплавление пустой породы руды, вредных примесей и золы топлива в относительно легкоплавкие шлаки. Шлаки затем необходимо удалять из печного пространства.

***Раскислители*** – элементы или соединения, вводимые в расплав для удаления растворенного в нем кислорода и восстановления оксидов данного металла. Восстановителями оксидов железа в доменной печи служат углерод, оксид углерода и водород:

$$MeO + Co = Me + CO_2$$
$$CO_2 + C = 2CO$$

***Шлаки*** – продукт взаимодействия флюсов с пустой породой, золой топлива, огнеупорной футеровкой печи и вредными примесями при выплавке металлов:

– кислые (кварциты, $SiO_2$);

– основные (CaO, MgO, MnO, FeO);

– нейтральные ($Al_2O_3$, щелочные и щелочноземельные хлориды и фториды).

***Огнеупорные материалы*** – служат для защитной внутренней облицовки (футеровки) металлургических печей, разливочных ковшей и т.д.:

– кислые – динас: 93-96% $SiO_2$, связка - 2-3%CaO; используются до $1730^0$C;

– основные – магнезит: 91-94% MgO, связка – 1-2%CaO, остальное – $Fe_2O_3$, $SiO_2$, $Al_2O_3$, используются до $2000^0$C и выше;

– нейтральные – шамотные, высокоглиноземные и хромитовые: $Al_2O_3$, $SiO_2$, $Cr_2O_3$. Шамотные работают при температуре до $1200^0$C под нагрузкой и до $1730^0$C без нагрузки, высокоглиноземные – до $1920^0$C, хромитовые – до $1800^0$C.

### *Природа кристаллизации металлов*

*Кристаллизация* (первичная) – процесс перехода металла из жидкого состояние в твердое. Кристаллизация чистого металла происходит при по-

стоянной температуре, причем чем выше скорость охлаждения, тем больше степень переохлаждения (рис. 25).

*Элементарные процессы кристаллизации*:

а) *зарождение центров кристаллизации* (образование зародышей, вырастающих затем в кристаллиты (зерна).

б) *рост кристаллов* – характеризуется скоростью роста линейных размеров кристалла (м/с).

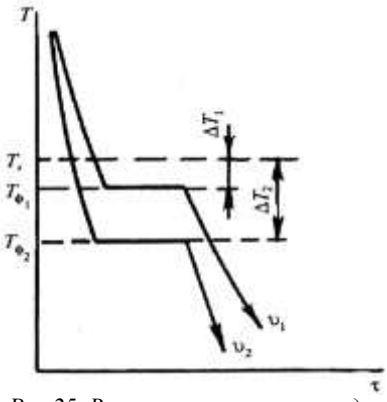



*Рис.25. Влияние скорости охлаждения на характер термических кривых ($v_2>v_1$)*

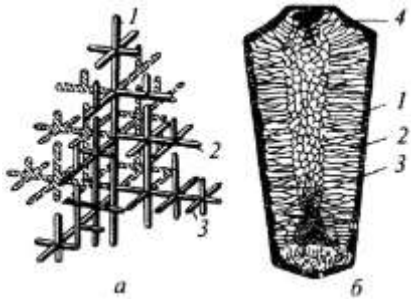



*Рис. 26. Строение слитка: а – дендрит Чернова: 1, 2, 3 – оси первого, второго и третьего порядков соответственно; б – зонная структура слитка: 1 – мелкие равноосные кристаллы, 2 – столбчатые кристаллы; 3 – равноосные кристаллы больших размеров; 4 – усадочная раковина*

Продолжительность затвердевания отливок в песчаных формах определяется перепадом температур и тепло – аккумулирующей способностью формы.

На форму кристаллов, образующихся при кристаллизации из жидкого состояния, оказывает влияние ряд факторов: скорость и направление отвода теплоты, характер и количество примесей. Образовавшиеся при затвердевании кристаллы в большинстве случаев не имеют правильной кристаллографической огранки, поскольку реализуется дендритный (древовидный) характер их роста: кристаллы имеют разветвленную форму (рис. 26).

## 2. Литейные свойства сплавов

### *Жидкотекучесть, усадка и ликвация*

*Жидкотекучесть* – способность металлов и сплавов в расплавленном состоянии заполнять полость стандартной формы (пробы) и точно воспроизводить очертания отливки. Зависит от:

а) состава и физико-химических свойств сплава;

б) теплофизических свойств формы;

в) технологических условий литья.

Увеличение теплоемкости и удельной теплоты кристаллизации металла способствует повышению жидкотекучести.

Жидкотекучесть зависит от склонности металла к окислению, сплошности и прочности оксидной пленки, теплофизических свойств материала

формы. Оксидные пленки оказывают сопротивление течению расплава и замедляют заполнение им формы (рис. 27).

*Усадка* – свойство сплавов уменьшать объем и линейные размеры при затвердевании и охлаждении. Линейная и объемная усадка.

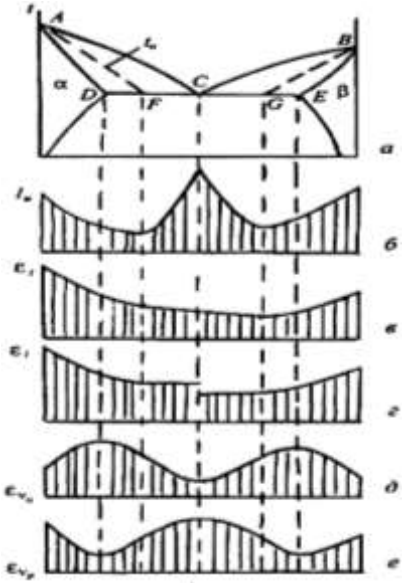



*Рис. 27. Взаимосвязь литейных свойств сплавов с диаграммой состояния: а – диаграмма состояния; б – жидкотекучесть; в – линейная усадка сплавов, компоненты которых близки по свойствам; г – линейная усадка сплавов с сильно отличающимися по свойствам компонентами; д – доля объемной усадки сплавов, проявляющаяся в образовании пористости; е – доля объемной усадки сплавов, проявляющаяся в образовании усадочных раковин*

В связи с неравномерностью и неодновременностью усадки различных частей отливки в ней возникают остаточные напряжения трех видов:

а) механические – из-за торможения усадки элементами формы;

б) термические – из-за различных скоростей охлаждения отдельных частей отливки;

в) фазовые – обусловленные неодновременным протеканием фазовых превращений в различных зонах отливки.

Если в отливке возникают большие остаточные напряжения, то это вызывает ее коробление и возникновение в ней трещин.

Различают горячие трещины усадочного происхождения, образующиеся в интервале температур затвердевания сплава, и холодные трещины, возникающие в отливке при ее охлаждении из-за воздействия высоких внутренних напряжений. На процесс возникновения и развития трещин оказывают влияние свойства формы (в частности, ее податливость), конструкция отливки, физико-химические и литейные свойства сплава, а также технологические условия затвердевания отливки.

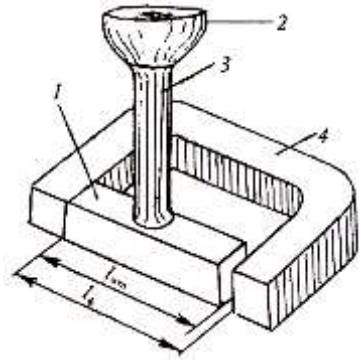



*Рис.28. Проба на линейную усадку сплавов с помощью скобы: 1 – отливка (проба); 2 – литниковая чаша; 3 – стояк; 4 – скоба*

Сущность метода определения линейной усадки в твердом состоянии заключается в измерении размеров образца (пробы) при его охлаждении в форме от температуры заливки до нормальной. На рис. 28 показан способ измерения линейной усадки с помощью стальной «скобы», заформованной в песчаную форму для фиксации кон-

трольного размера внутренней полости формы $l_ф$ = 200 мм.

*Ликвация* – неоднородность химического состава сплава в различных частях отливки.

Внутрикристаллическая (дендритная) ликвация и зональная (по отдельны зонам – макрообъемам слитка) ликвация.

Дендритную ликвацию устраняют гомогенизацией высокотемпературным диффузионным отжигом, приводящим к выравниванию химического состава в пределах микрозерна. Гравитационную ликвацию подавляют перемешиванием расплава, его быстрым охлаждением, а также применением легирующих добавок, образующих с основой разветвленные кристаллы (дендриты), мешающие перемещению в расплаве твердой фазы.

## 3. Литье в песчаные формы

### *Технологические основы литейного производства*

*Основные понятия и определения*

*Литейная форма* – конструкция, состоящая из элементов, образующих рабочую полость, заполнение которой расплавом обеспечивает получение отливки заданных размеров и конфигурации:

– разовые и многократные;

– песчаные, песчано-цементные, гипсовые, металлические, из высокоогнеупорных материалов и др.

Металлические формы из чугуна и стали являются многократными (постоянными), поскольку выдерживают сотни и тысячи заливок металла.

Песчаные, оболочковые формы со смоляным связующим и формы, изготовленные по выплавляемым моделям, являются разовыми. Разовые литейные формы получают с помощью специальных приспособлений – *моделей* (рис. 29).

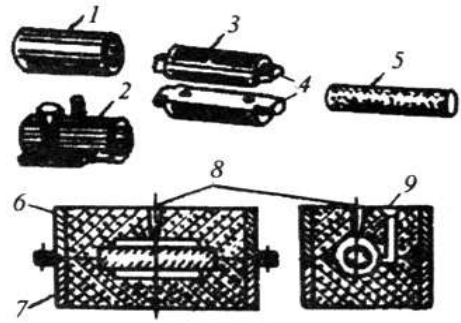



*Рис.29. Деталь, отливка, элементы формовочного комплекта и песчаная форма:*
*1 – готовая деталь, 2 – отливка, 3 – разъемная модель; 4 – стержневые знаки, 5 – стержень; 6, 7 – верхняя и нижняя опоки, 8 – выпор; 9 – литниковая система*

*Формовка* – процесс изготовления литейных форм из формовочных смесей.

*Литейная оснастка* – комплект приспособлений, используемых для изготовления отливок.

*Модельный комплект* – часть оснастки, включающая все приспособления, необходимые для образования рабочей полости литейной формы при ее формовки: модели отливки и элементов литниковой системы, модельные и сушильные плиты, стержневые ящики, формующие, контрольные и сборочные шаблоны для отливки.

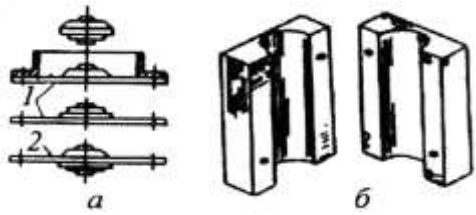



*Рис. 30. Элементы модельного комплекта: а – разновидности модельных плит; 1 – односторонняя; 2 – двусторонняя; б – разъёмный стержневой ящик*

*Формовочный комплект* – полный комплект оснастки, используемый для получения разовой формы.

*Модели* – специальные приспособления, служащие для получения разовых литейных форм. Модель – часть модельного комплекта, предназначенная для образования отпечатка в литейной форме, соответствующего конфигурации и размерам отливки.

Размеры модели увеличивают по сравнению с соответствующими размерами отливки с учетом линейной усадки сплава (0,8-2%) и припусков на механическую обработку. Существуют разовые и многократные модели. По сравнению с деталью модель имеет выступающие части (так называемые стержневые знаки), посредством которых *стержень*, оформляющий внутреннюю полость, крепится в форме. Стержень, являясь элементом литейной формы, служит для образования отверстия, полости или иного сложного контура в отливке.

*Стержневые знаки* – выступающие части моделей, посредством которых стержень модели крепится в форме.

*Модельная плита* – обеспечивает формирование поверхности разъема литейной формы и несет на себе различные части модели, включая литниковую систему: односторонние и двусторонние.

*Опоки* – сварные, литые или сборные жесткие металлические рамы различной конфигурации, служащие для удержания формовочной смеси при изготовлении литейной формы, ее транспортировки и заливки жидким металлом.

*Литниковая система* – система каналов и элементов литейной формы, обеспечивающих подвод расплавленного металла в полость формы и ее заполнение, а также питание отливки при затвердевании: горизонтальные, вертикальные, верхние, дождевые, сифонные (нижние), ярусные, «по разъему» (рис. 31, 32).

*Выпор* – предназначен для вывода газов и всплывающих шлаков из полости формы; он же сигнализирует о конце заливки появлением избытка металла.

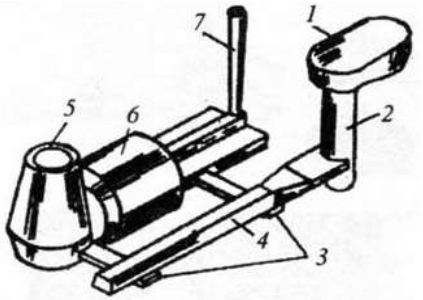



*Рис. 31. Отливка с литниковой системой: 1 – литниковая чаша; 2 – стояк; 3 – питатели; 4 – шлакоуловитель; 5 – прибыль; 6 – отливка; 7 – выпор*

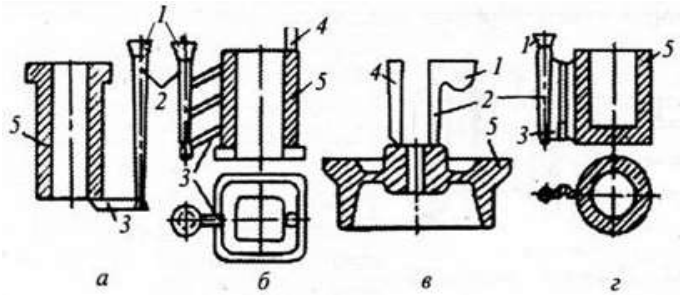



*Рис. 32. Виды литниковых систем:*
*а – сифонная; б – ярусная; в – верхняя; г – вертикально-щелевая; 1 – литниковая чаша; 2 – стояк; 3 – питатель; 4 – выпор; 5 – отливка*

*Прибыль* – компенсирует усадку отливки, их располагают над массивными частями отливки. (Процесс кристаллизации отливки завершается именно в прибылях) (рис.33).

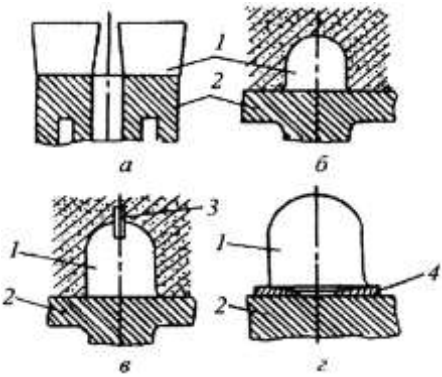



*Рис.33. Разновидности прибылей:*
*а – коническая открытая; б – полушаровая закрытая; в – находящаяся под газовым давлением; г – легко отделяемая; 1 – прибыль; 2 – отливка, 3 – заряд газотворного вещества, 4 – разделительные пластины*

### 4. Технологические особенности литья в песчаные формы

При литье в песчаные (песчано-глинистые) формы отливки получают посредством свободной заливки форм расплавленным металлом. Песчаные формы изготавливают ручной или машинной формовкой смесей.

*Формовочные и стержневые смеси***.** Классификация:

– по назначению (для отливок из чугуна, стали, цветных сплавов);

– по составу (песчано-глинистые, с быстротвердеющими крепителями, специальные);

– по применению при формовке (единые, облицовочные, наполнительные);

– по состоянию форм перед заливкой в них сплава (сырые, сухие, подсушиваемые химически твердеющие).

1) Песчано-глинистые смеси. Основным компонентом формовочных смесей является кварцевый или цирконовый песок, вторым является глина.

2) Стержневые смеси. К стержневым смесям предъявляют более жесткие требования по огнеупорности, поверхностной твердости, податливости, высокой газопроницаемости, лучшей выбиваемости, чем к формовочным смесям.

3) Припылы и краски. Противопригарные материалы наносят тонким слоем на поверхность форм и стержней для предотвращения пригара металла к формовочной смеси и повышения чистоты поверхности отливок. В ка-

честве припылов применяют порошкообразную смесь оксида магния, древесного угля и бентонита; порошкообразный графит, пылевидный кварц, циркон. Противопригарные краски представляют собой суспензии этих материалов с добавками связующих. В красках используются те же связующие добавки, что и в смесях.

Изготовление песчаных форм производится с помощью ручной и машинной формовки.

Процесс формовки состоит из нескольких стадий (рис. 34):

1. Изготовление нижней полуформы: установка нижней половины модели 2 внутри нижней опоки 3 на подмодельной плите 1; заполнение опоки (с покрытием в первую очередь модели) последовательно облицовочной и наполнительной смесями с одновременным их уплотнением трамбовкой; формирование газоотводных вентиляционных каналов (наколов) 4 посредством накалывания иглой уплотненной смеси.

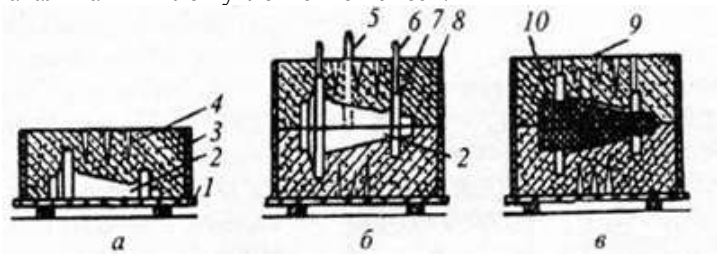



*Рис. 34. Ручная формовка по разъемной модели: последовательное изготовление нижней (а) и верхней (б) полуформ, собранная форма (со стержнем); 1 – подмодельная плита, 2 – нижняя половина модели; 3 – нижняя опока; 4 – вентиляционные каналы (наколы); 5 – модель стояка; 6 – модель выпора; 7 – верхняя половина модели; 8 – верхняя опока; 9 – литниковая чаша; 10 – стержень*

2. Изготовление верхней полуформы. Поворот нижней опоки с полуформой на $180^0$ и ее установка на подмодельной плите 1; фиксирование на нижней половине модели 2 верхней половины модели 7; установка моделей стояка 5; выпора 6 и других элементов литниковой системы; фиксирование верхней опоки 8 на нижней опоке 3; нанесение на поверхность нижней полуформы слоя разделительного песка; засыпка верхней опоки с моделями наполнительной смесью, уплотнение ее и формирование в ней вентиляционных наколов; выравнивание наружной поверхности верхней полуформы; создание вокруг верхней части модели стояка 5 литниковой чаши 9 (эта операция не нужна при установке на поверхности формы – над стояком – отдельной литниковой чаши – нарощалки); удаление моделей стояка и выпора из верхней полуформы.

3. Подготовка полуформ к сборке. Съем верхней полуформы с нижней; удаление из обеих полуформ двух половин модели отливки и моделей элементов литниковой системы; прорезание (если не были установлены модели питателя, шлакоуловителя др.) в нижней полуформе канала - питателя, соединяющего стояк с внутренней полостью формы, т.е. с будущим телом отливки; нанесение на рабочие поверхности полуформ тонкого слоя припыла или краски.

4. Сборка формы. Размещение в нижней полуформе стержня 10; установка (с фиксацией штырями) верхней полуформы на нижнюю полуформу; скрепление верхней и нижней опок.

Машинная формовка позволяет многократно повысить производительность труда, увеличить выход годных изделий и качество литейных форм. Она имеет следующие разновидности:

– уплотнение прессованием;

– уплотнение встряхиванием;

– вакуумная (пленочно-вакуумная) формовка.

*Заливка форм, охлаждение, выбивка и очистка отливок.* Заливку сплава в форму осуществляют посредством ковщей; при этом заливка производится без прерывания струи до полного наполнения литниковой чаши. Продолжительность процесса охлаждения отливок может колебаться от минут до суток в зависимости от их массы, состава сплава и свойств формовочных материалов. По достижении определенной для каждого сплава температуры литейную форму разрушают, извлекая из нее отливку. Стержни из крупных отливок удаляют сильной струей воды (под давлением до 10 МПа). Обрубка (удаление литников, прибылей и дефектов) осуществляется с помощью дисковых и ленточных пил, пневматических зубил, а также электродуговой или газовой резкой.

Очистка отливок производится следующими способами:

– во вращающихся барабанах за счет трения друг о друга деталей и чугунных «звездочек», загруженных в барабаны вместе с отливками;

– в гидропескоструйных установках струей воды с песком под давлением до 3 МПа;

– в дробеметных (дробеструйных) барабанах и камерах струей чугунной или стальной дроби.

## 5. Специальные способы литья

***Литье в специальные формы.*** Способ получения отливок свободной заливкой расплава в оболочковые формы из термореактивных смесей. По сравнению с отливками, полученными в песчаных формах, детали, в оболочковые формы, имеют в 1,5 раза меньший припуск на механическую обработку. Оболочковые формы изготавливают из формовочных песчано-смоляных смесей с термопластичными или термореактивными связующими смолами.

Технология изготовления оболочек включает в себя следующие операции:

1. Нагрев модельной оснастки до 200-250$^0$С.

2. Нанесение на рабочую поверхность модельной оснастки (пульверизатором) разделительного состава – быстро затвердевающей силиконовой жидкости, образующей при этом разделительную пленку, которая предотвращает прилипание к оснастке формовочной смеси и тем самым упрощает последующее отделение оболочки от модели.

3. Нанесение песчано-смоляной смеси на модельную оснастку одним из способов: путем свободной засыпки из поворотного или стационарного бункера, пескодувным методом, путем свободной засыпки с допрессовкой.

4. Формирование и отверждение оболочки необходимой толщины. Широко применяется насыпной (бункерный) способ формообразования

оболочки, основанный на использовании поворотного бункера, для свободной засыпки формовочной смесью модели вместе с модельной плитой (рис. 35). Бункер наполняют песчано-смоляной смесью. Нагретая и обработанная разделительным составом модельная плита с моделью закрепляется на приемной рамке поворотного бункера. Засыпка модели и модельной плиты смесью осуществляется поворотом бункера на $180^0$. Для формирования оболочки толщиной 5-15 мм плиту выдерживают под смесью в течение 15-20с. При этом смола быстро плавится и твердеет, образуя полутвердую оболочку. Далее бункер возвращают в исходное положение. С него снимают модельную плиту с налипшей оболочкой и помещают в печь для отверждения оболочки (300-$350^0$С в течение 1-3 мин).

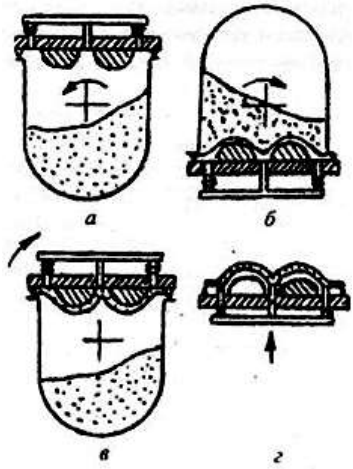



*Рис. 35. Схема изготовления оболочковой формы с помощью поворотного бункера*

5. Съем оболочковой полуформы после ее изготовления с модели осуществляется с помощью толкателей.

Способом литья в оболочковые формы получают отливки массой от 0,2 до 200 кг практически из любых литейных сплавов. Этим способом изготавливают ребристые мотоциклетные цилиндры, коленчатые валы автомобильных двигателей.

*Преимущества* способа литья в оболочковые формы: возможность получения тонкостенных отливок сложной формы; гладкая и чистая поверхность отливок; небольшой расход смеси; качественная структура металла за счет повышенной газопроницаемости форм; широкая возможность автоматизации; небольшие допуски на обработку резанием.

*Недостатки*: ограниченный размер отливок (до 1500 мм); высокая стоимость смесей; выделение вредных паров и газов при изготовлении форм.

***Литье по выплавляемым моделям*** (ЛВМ) – процесс получения отливок в неразъемных огнеупорных формах, изготавливаемых с использованием моделей из легкоплавящихся, выжигаемых или растворяемых составов. Используют как оболочковые (керамические), так и монолитные (гипсовые) формы. Рабочая полость формы образуется выплавлением, растворением или выжиганием модели. Можно получать сложные тонкостенные детали: лопатки газотурбинных двигателей, художественные и ювелирные изделия. Метод осуществляется различными способами заливки: свободной, центробежной, под низким давлением, с использованием направленной кристаллизации.

Модельные составы:

– воскообразные;
– водорастворимые;
– выжигаемые;
– выплавляемые с твердыми наполнителями;
– эмульсионные.

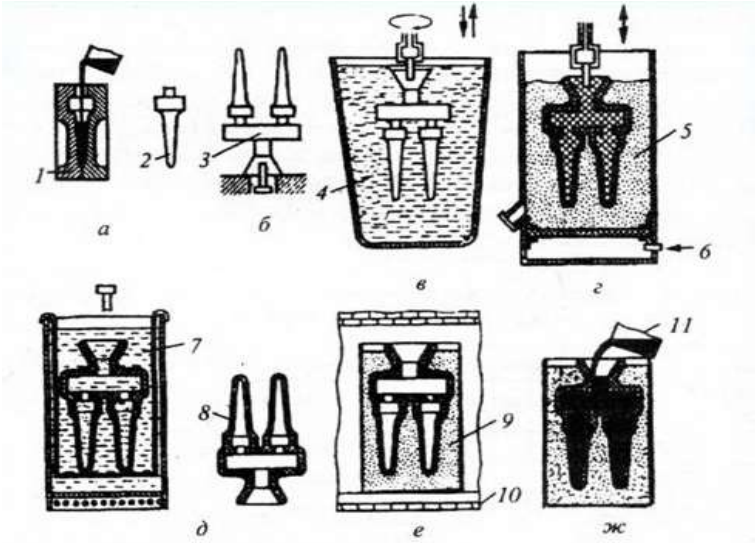



*Рис. 36. Литье по выплавляемым моделям:*
*1 – пресс-форма; 2 – модель; 3 – модельно-литниковый блок; 4 – суспензия, 5 – псевдоожиженный слой зернистого огнеупорного материала; 6 – подача сжатого воздуха, 7 – расплав модельной массы (или горячая вода); 8 – керамическая оболочковая форма; 9 – опорный наполнитель (кварцевый песок); 10 – печь; 11 – ковш*

Модельные составы должны обладать минимальными значениями усадки и коэффициента термического расширения, иметь высокую жидкотекучесть в вязкопластичном состоянии, хорошо смачиваться керамической или гипсовой суспензией, наносимой на модель, но химически с ней не взаимодействовать, обладать температурой размягчения, превышающей $40^0$С.

Технология литья ЛВМ:

– изготовление моделей – посредством заливки или запрессовки модельного состава в подогретом состоянии в специальные пресс-формы;

– монтаж модельных блоков с единой литниковой системой;

– формирование на модельных блоках керамической оболочки обычно из 3-8 последовательно наносимых слоев;

– выплавление моделей из керамических форм в ваннах с горячей водой или горячим воздухом, перегретым паром под высоким давлением при температуре до $120^0$С и более, в расплаве модельной массы, высокочастотным нагревом;

– формовка оболочек, которая заключается в их размещении в опрном наполнителе с целью упрочнения, защиты от резких изменений температуры при прокаливании и заливке металлом;

– прокаливание оболочковых форм при их нагреве в печи с целью удаления остатков модельных составов и газотворных веществ из материала оболочки, а также завершения процессов ее твердения;

– заливка, выбивка и очистка отливок.

Преимущества данного способа литья: возможность получения отливок сложной конфигурации; использование практически любых сплавов; высокое качество поверхности и точность размеров отливок; минимальные припуски на механическую обработку; обеспечение качественной равноосной, столбчатой, монокристаллической структуры с высокими эксплуатационными свойствами.

Недостатки: многооперационность, трудоемкость, длительность процесса, многообразие материалов для изготовления формы.

***Литье в кокиль.*** Процесс получения отливок посредством свободной заливки расплава в многократно используемые металлические формы – кокили.

Классификация кокилей (рис. 37):

– по соотношению габаритных размеров (плоские и цилиндрические);

– по наличию разъемных частей и расположению в пространстве поверхности разъема (неразъемные – вытряхные и разъемные с горизонтальной, вертикальной и комбинированной поверхностью разъема).

– по числу рабочих гнезд (одноместные и многоместные);

– по конструкции рабочих стенок кокиля (цельные и составные);

– по способу охлаждения;

– по типу конструкции рабочей стенки и способу подвода к ней охлаждающей среды; (однослойные и двухслойные);

– по долговечности защитного покрытия (с постоянным и периодическим покрытием);

– по составу материала рабочей стенки кокиля.

Преимущества кокильного литья:

– возможность многократного использования форм;

– автоматизация процесса;

– хорошие механические свойства отливок (мелкозернистая структура, точность и качество поверхности);

– снижение припусков на механическую обработку;

– высокий процент выхода годного литья.

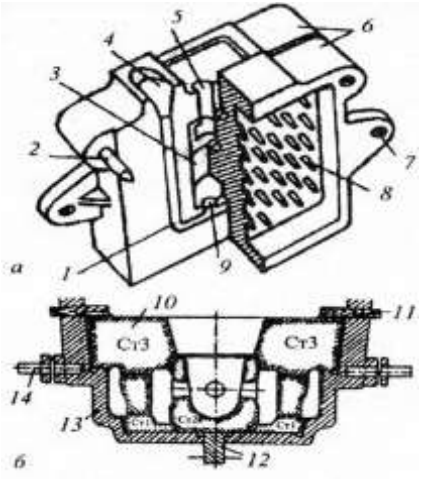



*Рис.37. Разновидности кокилей:*
*а – разъемный (с вертикальной плоскостью разъема); б – неразъемный (вытряхной) кокиль; 1 – литниковый ход; 2 – штырь; 3 – внутренняя полость кокиля; 4 – воронка для заливки расплава; 5 – выпор; 6 – две половины разъемного кокиля; 7 – отверстия для крепления одной половины разъемного кокиля к плите машины; 8 – пальцы для улучшения охлаждения кокиля; 9 – питатель; 10 – песчаные стержни (Сm1-Сm3); 11 – клин для крепления стержня; 12 – выталкиватель; 13 – корпус неразъемного кокиля, 14 – цапфы, обеспечивающие поворот кокиля относительно горизонтальной оси*

Недостатки:

– высокая трудоемкость изготовления кокилей;

– высокая стоимость;

– отсутствие податливости (особенно при получении сложных фасонных отливок из легированных сталей и тугоплавких металлов).

### *Литье с применением внешних воздействий на жидкий металл*

*Литье под давлением.* На расплав давит поршень, в результате чего жидкий металл подается в полость формы с быстрым ее заполнением и образованием отливки с высокой точностью размеров. Затем происходит раскрытие пресс-формы и удаление отливки с помощью толкателей. Короткий цикл и малое число операций.

Литейные машины классифицируются по конструкционным и функциональным особенностям узла прессования:

– с холодной горизонтальной камерой прессования;

– с холодной вертикальной;

– с горячей вертикальной.

Для уменьшения газовой и усадочной пористости используют:

– вакуумирование расплава и полости формы;

– заполнение полости формы (для алюминиевых сплавов) кислородом, полностью расходуемым на окисление расплава, исключение взаимодействия с азотом воздуха – источником образования газовой пористости;

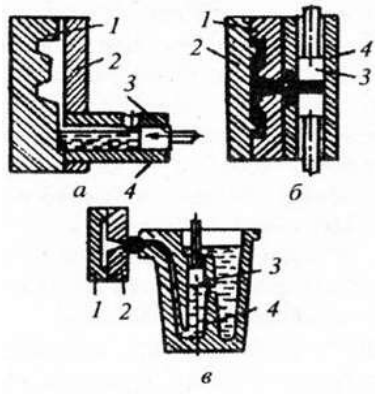



*Рис. 38. Литье под давлением: 1 – неподвижная часть пресс-формы; 2 – подвижная часть пресс-формы; 3 – поршень, 4 – металлоприемник*

– использование толстостенных питателей (для полноценного заполнения полости формы под давлением).

Преимущества способа литья под давлением:

– высокая производительность;

– точность размеров;

– хорошее качество поверхности;

– автоматизация процессов литья;

– снижение на порядок трудоемкости изготовления отливок (в сравнении с литьем в песчаные формы).

Недостатки:

– пониженные плотность и пластичность металла;

- возникновение в отливках газоусадочной пористости;

– ограничение массы отливок (до 50 кг);

– высокая стоимость пресс-форм.

Изготавливают изделия, почти не требующие последующей механической обработки, в том числе с резьбой.

*Литье под низким давлением (ЛНД).* Процесс получения отливок при заполнении форм расплавом и его кристаллизации под избыточным давлением до 0,1 МПа (рис. 39). Способ литья используют для изготовления деталей из алюминиевых, магниевых и медных сплавов, реже – из стали и чугуна. Погружение металлопровода в тигель с расплавом на определенную глубину (расстояние между нижним концом металлопровода и дном тигля составляет обычно 30-50 мм) исключает возможность захвата шлака и флюса в нем с поверхности жидкого металла.

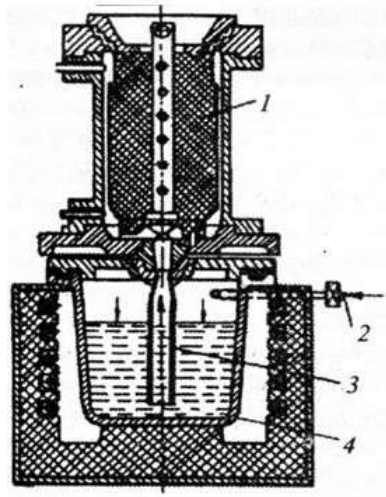



*Рис. 39. Установка для литья под низким давлением: 1 – форма; 2 – газопровод; 3 – металлопровод; 4 – тигель*

Получение мелкозернистой плотной структуры металла обеспечивает существенный рост его механических и эксплуатационных характеристик – износостойкости, коррозионной стойкости, циклической прочности.

Используются кокили, оболочковые, песчаные, керамические и гипсовые формы.

Преимущества способа:

– автоматизация заливки формы;

– пониженный расход металла;

– возможность регулирования скорости потока металла (с целью обеспечения оптимального процесса заполнения металлом формы);

– повышенные плотность и качество структуры металла;

– возможность получения тонкостенных отливок с толщиной стенок 1,5-2 мм;

– высокий уровень механический и эксплуатационных свойств отливок.

Недостаток – ограниченное применение при литье деталей из чугуна и стали (из-за малого ресурса работы металлопровода).

*Вакуумное литье (ВЛ).* Заключается в заполнении формы металла за счет создаваемого в ней вакуума (рис. 40).

Полость формы заполняется за счет перепада давлений от атмосферного (над зеркалом расплава) до пониженного – 10-80 кПа (в полости формы).

Две схемы литья:

а) размещение литейной формы в герметичной камере и соединение ее с металлопроводом, погруженным в тигель с расплавом;

б) герметизация полости формы, сообщающейся посредством металлопровода с расплавом.

Часто получают втулки, вкладыши, подшипники скольжения из цветных металлов (латуней, бронз), чугуна и стали.

Уменьшается газонасыщение и окисление заполняющего форму расплава.

Использование ВЛ взамен кокильного приводит к существенному повышению качества поверхности тонкостенных отливок, снижению расхода металла на литниковую систему, росту в 1,2 раза производительности труда за счет сокращения продолжительности технологического цикла литья.

Преимущества способа – высокая плотность отливок;

– отсутствие газовых и усадочных пор, а также литниковой системы и прибылей;

– хорошее качество поверхности;

– повышенные механические свойства отливок;

– высокая производительность.

Недостатки:

– применимость лишь для получения отливок простой формы;

– волнистость внутренних поверхностей отливок.

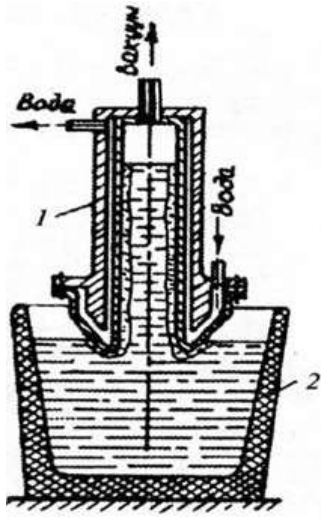



*Рис.40. Установка для литья вакуумным всасыванием: 1 – кристаллизатор; 2 – раздаточная печь*

*Литье с кристаллизацией под давлением.* Обеспечивается получение плотных заготовок с высоким уровнем физически-механических и эксплуатационных свойств с небольшими припусками на обработку.

Сущность способа литья – заливка металла в пресс-форму с последующим его уплотнением пуансоном гидропресса в процессе затвердевания расплава (рис. 41).

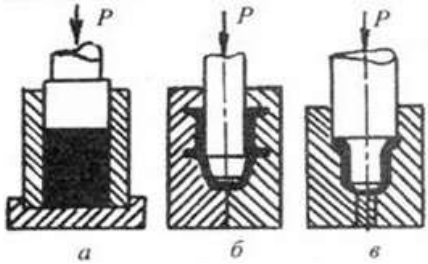



*Рис. 41. Штамповка жидких сплавов в разъёмных (а, б) и неразъёмных (в) формах*

За счет пластической деформации происходит «залечивание» межкристаллических и сжатие газовоздушных пор, обеспечивается получение более плотной отливки. Заливку осуществляют при температуре, превышающей ликвидус сплава на 20-100$^0$С. В процессе литья кристаллизующийся металл может дополнительно подвергаться воздействию вибрации и ультразвука.

Различные схемы способа литья (рис. 42):

– поршневое прессование;

– пуансонное прессование;

– пуансонно-поршневое прессование;

– прессование через питатели.

Могут использоваться как литейные, так и деформируемые сплавы.

Преимущества метода:

– получение плотных отливок с мелкозернистой структурой, отсутствием газовой и усадочной пористости;

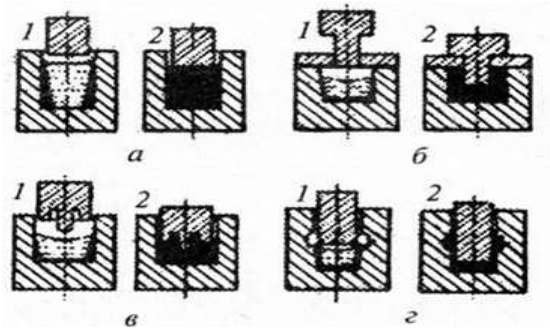



*Рис. 42. Схемы прессования при литье с кристаллизацией под давлением: а – поршневое прессование; б – пуансонное прессование; в – пуансонно-поршневое прессование; г – прессование через литники-питатели; 1 – исходное положение пуансона; 2 – конечное положение пуансона*

– обеспечение небольших припусков на обработку резанием;
– высокая производительность;
– отсутствие (в большинстве случаев) литниковой системы;
– высокий процент выхода годных изделий (95%).

Недостатки:
– большая трудоемкость изготовления пресс-форм;
– высокая их стоимость.

*Центробежное литье.* Процесс формирования отливок под действием центробежных сил при свободной заливке металла во вращающиеся формы (рис. 43). Получают отливки из чугуна, стали, сплавов на основе меди, алюминия, цинка, магния, титана и др.

Литейные центробежные машины исполняются в трех вариантах:
– с горизонтальной;
– с вертикальной;
– с наклонной осью вращения.

Существенно повышается качество отливок введением флюса непосредственно в форму в процессе получения отливки.

Флюс рафинирует расплав, защищает его от окисления, тормозит теплоотвод от внутренней поверхности отливки. Использование флюсов снижает в 4-6 раз процент брака.

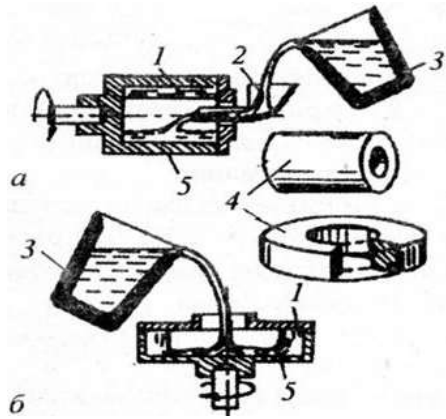



*Рис. 43. Центробежное литьё (в изложницах) с горизонтальной (а) и вертикальной (б) осями вращения: 1 – расплав; 2 – заливная воронка; 3 – разливочный ковш; 4 – отливка; 5 – изложница*

Расплав заполняет полость формы под действием центробежной силы $F_ц$, значительно превышающей силу тяжести:

$$F_ц = KF_т,$$

где $K$ – гравитационный коэффициент, $K$ = 3…300).

Оптимальная частота вращения формы:

$$n_{опт} = \frac{17460}{\sqrt{\rho \cdot R}}, \text{ об/мин,}$$

где $\rho$ – плотность сплава, кг/м$^3$;

$R$ – радиус формы, м.

Центробежное литье применяют также для получения пустотелых отливок типа тел вращения (втулки, роторы). Для фасонных изделий используют песчаные, металлические, керамические и графитовые формы.

Преимущества:

– большая производительность способа и возможность автоматизации;

– высокий выход годных отливок (90-95%);

– высокая плотность отливок и мелкозернистое строение (за счет больших скоростей охлаждения);

– направленное затвердевание отливок;

– возможность получения тонкостенных отливок из сплавов с низкой жидкотекучестью.

Недостатки способа:

– химическая неоднородность (ликвация) в толстостенных отливках;

– высокие внутренние напряжения в поверхностном слое, приводящие к появлению трещин;

– возможность деформации формы под давлением жидкого металла;

– разностенность по высоте отливок с вертикальной осью вращения.

Изготавливают: водонапорные и канализационные трубы, гильзы двигателей, поршневые кольца, цилиндры компрессоров, подшипники качения, втулки, диски и др.

*Литье выжиманием.* Получение тонкостенных крупногабаритных отливок посредством свободной заливки расплава через металлоприемник в раскрытую форму с последующим заполнением металлом всей ее рабочей полости за счет сближения полуформ (рис. 44). Избыток металла выжимается в приемный ковш.

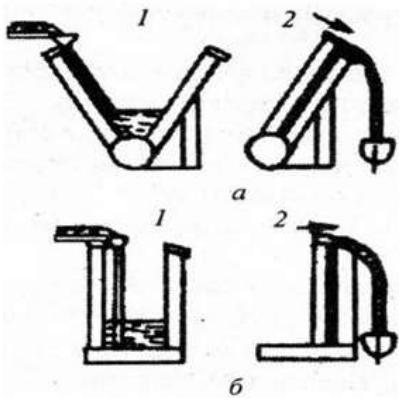



*Рис. 44. Разновидности процесса литья выжиманием:*
*а – выжимание расплава поворотом подвижной полуформы; б – выжимание расплава плоскопараллельным перемещением подвижной полуформы; 1 – заливка сплава; 2 – сближение полуформ с выжиманием излишка металла*

Методы реализации процесса получения отливки:

– поворот подвижной полуформы вокруг жестко фиксированной оси;

– плоскопараллельное сближение одной или обеих полуформ.

Дефекты отливки: раковины, рыхлоты, трещины, волнистость поверхности, коробление отливки, неточность размеров.

Преимущества:

– возможность получения крупногабаритных тонкостенных отливок:

– отсутствие литниковой системы;

– возможность выжимания металла в форму в вязком виде (при температурах между солидусом и ликвидусом).

Недостатки:

– пониженная точность размеров отливок по сравнению с литьем в металлические формы из-за неточной стыковки полуформ;

– низкий выход годного литья (25-50%).

*Литье с непрерывным процессом формирования отливки.* Непрерывное и полунепрерывное литье.

Процесс получения протяженных отливок посредством свободной непрерывной заливки расплава в водоохлаждаемую форму (кристаллизатор) и вытягивание из нее сформированной части отливки (рис. 45). Данный способ называют полунепрерывным литьем, если накладывается ограничение на подачу металла (по времени или по массе).

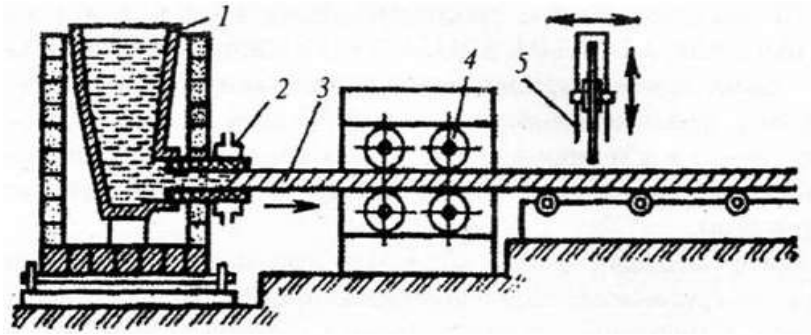



*Рис.45. Схема установки непрерывного горизонтального литья:*
*1 – раздаточная печь; 2 – литейная форма (кристаллизатор); 3 – затвердевшая часть отливки, 4 – ролики для вытяжки отливки; 5 – пила (резак)*

По расположению кристаллизатора и технологической оси процесса (направления вытяжки заготовки), литье подразделяют на *горизонтальное и вертикальное.*

*Кристаллизаторы* в зависимости от материала рабочей полости литейной формы подразделяют на металлические или графитовые. Внутренняя полость кристаллизатора, непосредственно контактирующая с расплавом, охлаждается водой. Она формирует в соответствии с конфигурацией своего поперечного сечения профиль будущей отливки. В процессе непрерывного литья чугуна скорость вытяжки (при ее продолжительности 1-10 с) колеблется в пределах 3,3-33 м/с.

Преимущества способа непрерывного литья:
– неограниченность длины отливки;
– однородность свойств отливки по длине;
– повышенная плотность металла;
– реализация направленного затвердевания;
– отсутствие литниковый системы;
– большой процент выхода годного металла;
– повышенные точность и чистота поверхности отливки;
– отсутствие операций выбивки форм, обрубки и очистки отливок;
– невысокая стоимость литейных форм;
– высокая производительность труда.

Недостатки:
– изготовление отливок только несложной конфигурации;
– ограниченность номенклатуры изделий.

Изготовляют трубы диаметром до 1000 мм, втулки, заготовки гаек, шестерен, прокатных валков и др.

*Электрошлаковое литье.* Процесс постепенного электрошлакового переплава расходуемого электрода в водоохлаждаемой металлической форме и последующей кристаллизации расплавленного металла в ней (рис. 46). При прохождении электрического тока через расплав шлака в нем вследствие высокого электрического сопротивления выделяется большое количество теплоты, в результате чего шлак нагревается на 150-300$^0$С выше температуры плавления материала сплава расходуемого электрода, при этом происходит оплавление конца электрода, жидкий металл в виде капель пронизывает шлак, одновременно очищаясь в нем, и скапливается под шлаком, образуя металлическую ванну расплава. Слой расплава, расположенный вблизи кристаллизатора, затвердевает в первую очередь. Расход электрода компенсируется его перемещением вниз в вертикальном направлении. Вследствие затекания жидкого шлака в зазор между формой и отливкой сводится до минимума взаимодействие расплавленного металла с материалом формы. При этом поверхность отливки получается чистой, гладкой, и часто не нуждается в последующей механической обработке.

Отливки приобретают повышенную химическую и структурную однородность; отсутствует ликвация, возрастает плотность и уменьшается количество вредных примесей и металлических включений: высокие механические свойства отливок.

Получаются как мелкие отливки, так и крупные – до 300т.

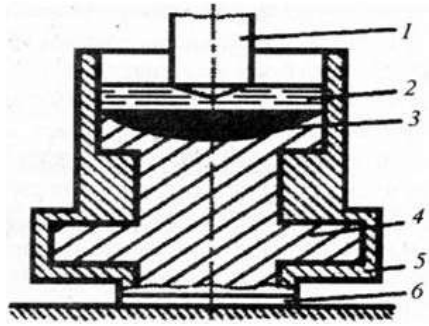



*Рис. 46. Схема получения отливок способом электрошлакового литья:*
*1 – расходуемый электрод; 2 – шлаковая ванна; 3 – металлическая ванна; 4 – отливка; 5 – литейная форма; 6 – поддон*

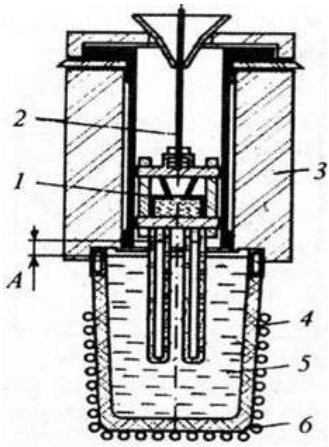



*Рис. 47. Установка направленной кристаллизации в жидкометаллическом охладителе:*
*1 – керамическая форма; 2 – шток; 3 – печь для нагрева формы; 4 – тигель; 5 – жидкометаллический теплоноситель; 6 – нагреватель*

*Литье методом направленной кристаллизации.* Позволяет получать изделия (лопатки газовых турбин и другие) со столбчатой, монокристаллической и композиционной структурами (рис. 47).

Получают:

1) отливки из жаропрочных сплавов со структурой дендритного строения, столбчатых зерен, ориентированных вдоль определенных кристаллографических направлений;

2) монокристаллические отливки;

3) эвтектические композиты с нитевидными или пластинчатыми волокнами упрочняющей фазы (карбидов).

Монокристаллические отливки характеризуются более высокими значениями кратковременной и длительной прочности, пластичности по сравнению с отливками, полученными из того же сплава с равноосной и столбчатой структурами.

Обеспечение процесса направленной кристаллизации происходит при создании максимального градиента температуры в заданном направлении роста зерна и минимального – в других направлениях. Отвод теплоты производится с одного конца отливки.

*Способы выращивания монокристаллов.*

1. Метод монокристаллического литья, основан на конкурентном росте столбчатых зерен.

Для получения отливки используют керамическую оболочковую форму, изготовленную по выплавляемой модели.

Требуемая ориентация кристаллической решетки отливки вдоль и поперек направления затвердевания. Можно добиться использованием затравочных кристаллов, установленных в форме; созданием необходимой конструкции затравочной части формы, обеспечивающей оптимальное ориентирование монокристалла в двух направлениях (рис. 48).

2. Использование затравок при монокристаллическом литье (рис. 49).

***Методы обеспечения технологичности литых деталей.***

Требования к отливкам:

– общие (размерная и массовая точность, шероховатость поверхности, механические свойства, качество литого металла);

– специальные (герметичность, коррозионная стойкость, износостойкость и др.).

Точность отливки оценивается: классами размерной точности (КРТ), точности массы (КТМ), степенями коробления (СК), точностью поверхности (СТП).

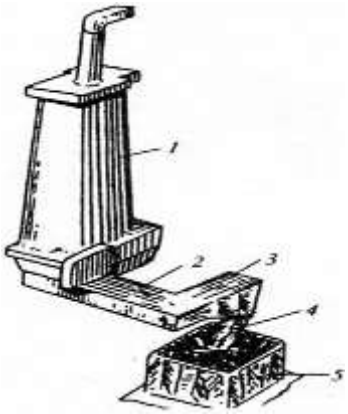



*Рис.48. Монокристаллическая лопатка с литниковой системой (дается схематическое изображение структуры всех участков): 1 – лопатка; 2-4 – литники; 5 – стартер*

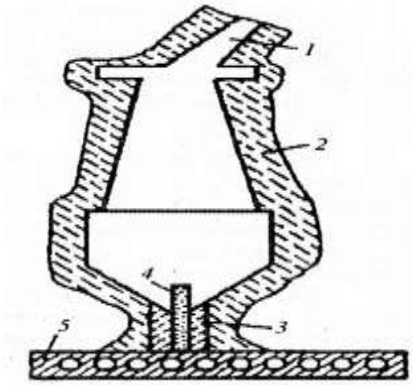



*Рис.49. Схема керамической формы для монокристаллического лигья лопатки от затравки: 1 – питатель; 2 – форма; 3 – основание, в котором крепится затравка; 4 – затравка; 5 – поддон (кристаллизатор)*

Размерная точность отливки – степень соответствия фактических и указанных в чертеже (или ТУ) размеров (табл. 16).

Таблица 16. Допуски линейных размеров отливок на сторону (мм, не более) по ГОСТ 26645-85

| Интервалы номинальных размеров (свыше... до), мм | Классы размерной точности отливок | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3т | 3 | 4 | 5т | 5 | 6 | 7т | 7 | 8 |
| До 4 | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,16 | 0,20 | 0,24 | 0,32 | 0,40 | 0,50 | 0,64 |
| 10-16 | 0,09 | 0,11 | 0,14 | 0,18 | 0,22 | 0,28 | 0,36 | 0,44 | 0,56 | 0,70 | 0,90 |
| 25-40 | 0,11 | 0,14 | 0,18 | 0,22 | 0,28 | 0,36 | 0,44 | 0,56 | 0,70 | 0,90 | 1.10 |
| 63-100 | 0,14 | 0,18 | 0,22 | 0,28 | 0,36 | 0,44 | 0,56 | 0,70 | 0,90 | 1,10 | 1,40 |

ГОСТ 26645-85 предусмотрены 22 класса размерной точности – с 1 по 16.

Точность размеров отливки зависит от ее габаритных размеров, сложности конфигурации, способа литья, химического состава сплава.

КРТ и СТП определяют по наибольшему габаритному размеру, а КТМ – по номинальной массе отливки. Простые отливки массового автоматизированного производства имеют меньшие значения КРТ, СТП, КТМ, а сложные отливки единичного и мелкосерийного производства – большие значения.

Количественный критерий сложности конструкции отливки – ее группа сложности. Отливки наибольшей сложности причисляют к первой группе.

Группу сложности конкретной отливки определяют путем сопоставления ее параметров с характеристиками отливок каждой группы сложности. По числу признаков, не менее четырех, отливку относят к той или иной группе.

*Степень коробления* – отклонения в относительном расположении поверхностей: отклонение от плоскостности; параллельности, перпендикулярности, от заданной формы. Коробление происходит в результате неравномерного охлаждения и усадки металла отливки. ГОСТ 26645-85 предусмат-

ривает 11 степеней коробления, при этом большему значению степени коробления соответствует и большее искажение формы отливки (табл. 18).

Таблица 17. Влияние способа литья, состава сплава и массы детали на выбор классов размерной точности и точности массы, а также степень точности поверхности

| Способ литья | Номинальная масса отливки, кг | КРТ | | КТМ | | СТП | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Сплавы на основе* | | | | | |
| | | Al, Mg | Ti, Fe, Cu | Al, Mg | Ti, Fe, Cu | Al, Mg | Ti, Fe, Cu |
| Литье под давлением | До 1 | 3т-6 | 3-7т | 1-7 | 2-8 | 2-6 | 3-7 |
| | 1-10 | 3-7т | 4-7 | 2-8 | 3т-9т | 3-7 | 4-8 |
| Литье по выплавляемым моделям | До 1 | 4-8 | 5т-9т | 3т-9 | 3-10 | 3-8 | 4-9 |
| | 1-10 | 5т-9т | 5-9 | 3-10 | 4-11т | 4-9 | 5-10 |
| Литье под низким давлением и в кокиль | До 1 | 5т-9г | 5-9 | 3-10 | 4-11т | 4-9 | 5-10 |
| | 1-10 | 5-9 | 6-10 | 4-11т | 5т-11 | 5-10 | 6-11 |
| Литье в оболочковые формы | До 1 | 7т-11 | 7-12 | 5т-12 | 5-13т | 6-12 | 7-13 |
| | 1-10 | 7-12 | 8-13т | 5-13т | 6-13 | 7-13 | 8-14 |
| Литье в песчаные формы | До 1 | 7-12 | 8-13т | 6-13 | 7т-14 | 10-17 | 11-18 |
| | 1-10 | 8-13т | 9т-13 | 7т-14 | 7-15 | 11-18 | 12-19 |

*Рассматриваются сплавы, не упрочняемые термической обработкой.
**Наибольший габаритный размер отливки до 100 мм
***Наибольший габаритный размер отливки от 100 до 250 мм

Таблица 18. Влияние соотношения размеров элементов отливки, типа форм и свойств сплавов на степень коробления элемента отливки

| Тип литейной формы | | Отношение наименьшего размера элемента отливки к наибольшему | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | свыше 0,200 | от 0,100 до 0,200 | от 0,050 до 0,100 | от 0,025 до 0,050 | до 0,025 |
| | | Степень коробления элемента отливки | | | | |
| Многократные формы | НТ | 1-4 | 2-5 | 3-6 | 4-7 | 5-8 |
| | Т | 2-5 | 3-6 | 4-7 | 5-8 | 6-9 |
| Разовые формы | НТ | 3-6 | 4-7 | 5-8 | 6-9 | 7-10 |
| | Т | 4-7 | 5-8 | 6-9 | 7-10 | 8-11 |

*Примечание.* Сплавы, не упрочняемые (НТ) и упрочняемые (Т) термической обработкой.

Допуски на от клонения от формы и расположения элементов отливки для некоторых размеров приведены в табл. 19.

Таблица 19. Влияние нормального размера элемента отливки и степени коробления на величину предельных отклонений

| Номинальный размер нормируемого участка, мм | Степень коробления элемента отливки | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| | Допуски формы и расположения элементов отливок, мм | | | | | | | | | | |
| До 125 | 0,12 | 0,16 | 0,20 | 0,24 | 0,32 | 0,40 | 0,50 | 0,64 | 0,80 | 1,00 | 1,20 |
| Свыше 125 до 160 | 0,16 | 0,20 | 0,24 | 0,32 | 0,40 | 0,50 | 0,64 | 0,80 | 1,00 | 1,20 | 1,60 |
| Свыше 160 до 200 | 0,20 | 0,24 | 0,32 | 0,40 | 0,50 | 0.64 | 0,80 | 1,00 | 1,20 | 1,60 | 2,00 |
| Свыше 250 до 315 | 0,32 | 0,40 | 0,50 | 0,64 | 0.S0 | 1,00 | 1,20 | 1,60 | 2,00 | 2,40 | 3,20 |

*Качество поверхности отливок* – оценивается по ГОСТ 266645-85 степенью точности поверхности (СТП) и зависит как от их шероховатости, так и наличие поверхностных дефектов (пригара, наростов, оксидов, волнистости).

На шероховатость поверхности оказывают влияние размер и конфигурация (сложность формы) отливки, состав сплава и способ литья.

СТП согласно ГОСТ 26643-85 имеет 22 градации. В табл. 20 приведены соотношения мжду шероховатостью и степенью точности поверхности отливки, из которых следует, что с увеличением порядкового номера СТП возрастают значения критериев шероховатости.

Таблица 20. Взаимосвязь между степенью точности (СТП) и шероховатостью ($R_a$, $R_z$) поверхности

| СТП | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $R_a$, мкм<br>$R_z$, мкм | 2,0<br>– | 2,5<br>– | 3,2<br>– | 4,0<br>– | 5,0<br>– | 6,3<br>– | 8,0<br>– | 10,0<br>– | 12,5<br>– | 16,0<br>– | 20,0<br>– |
| СТП | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |
| $R_a$, мкм<br>$R_z$, мкм | 25,0<br>– | 32,0<br>– | 40,0<br>– | 50,0<br>– | 63,0<br>– | 80,0<br>– | 100,0<br>– | –<br>500 | –<br>630 | –<br>800 | –<br>1000 |

*Припуск на обработку резанием* обеспечивает получение заданных размеров, шероховатости поверхности отливкии качества поверхностного слоя металла и зависит от КРТ отливки, ее габаритных размеров, формы, расположения обрабатываемых поверхностей, способа литься и состава сплава. Для обеспечения требуемого качества поверхности готовой детали вводят при обработке резанием ряды припусков, которые коррелируются со степенью точности поверхности (табл. 21).

Таблица 21

| СТП | 1-2 | 3-4 | 5-6 | 7-8 | 9-10 | 11-12 | 13-14 | 15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ряды припусков | 1-2 | 1-3 | 1-4 | 2-5 | 3-6 | 4-7 | 5-8 | 6-9 |
| СТП | 16 | 17 | 1 8 | 19 | 20 | 21 | 22 | |
| Ряды припусков | 7-10 | 8-11 | 9-12 | 10-13 | 11-14 | 12-15 | 13-16 | |

Для устранения неровностей и дефектов литой поверхности, а также уменьшения ее шероховатости предназначен минимальный припуск на обработку поверхности отливки, выбираемый с учетом СТП и рядов припусков.

Таблица 22

| Ряды припусков отливки | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Минимальный припуск на сторону, мм | 0,1 | 0,2 | 0.3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1.2 |
| Ряды припусков отливки | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| Минимальный припуск на сторону, мм | 1,6 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 6,0 | 8,0 | 10,0 |

*Отклонения массы отливок.* Точность массы оценивается *классом точности массы,* число и нумерация которых совпадают с таковыми для классов размерной точности. Допуск на массу отливки устанавливается согласно ГОСТ 26645-85, с учетом номинальной массы отливки и класса точности мас-

сы. На чертеже отливки приводятся рассмотренные характеристики точности в технических требованиях, например, «Точность отливки 6-4-6-7 См 0,4 ГОСТ 266645-85», где 6 – класс размерной точности; 4 – степень коробления; 6 – степень точности поверхностей; 7 – класс точности массы; См 0,4 – допуск (в мм) смещения отливки по плоскости разъема. Если в обозначении точности отливки ряд цифровых значений показателей заменен нулями или данные о смещении отсутствуют, значит эти характеристики являются ненормируемыми, например, «Точность отливки 6-0-0-7 ГОСТ 266645-85.

*Специальные требования к отливкам:* обеспечение герметичности в условиях низкого и сверхвысокого вакуума, в среде повышенного давления, коррозионной стойкости в агрессивных средах, термостойкости, износостойкости, стабильности размеров, декоративности.

Специальные требования реализуются:

– выбором необходимого состава литейного сплава;

– оптимального метода литья;

– механической и термической обработок;

– формированием защитных и декоративных покрытий.

### *Технологичность конструкции отливок*

*Технологичной* называют конструкцию отливки, которая обеспечивает заданные эксплуатационные свойства изделия и позволяет изготавливать ее с наименьшими затратами.

Показатели технологичности:

– коэффициент использование металла (КИМ) – отношение масс готовой детали и отливки;

– коэффициент необработанной поверхности (КНП) – отношение площади необработанной резанием поверхности к площади всей поверхности отливки;

– точность отливки и др. (табл. 23).

Большое значение имеет также учет экономических показателей, таких, как удельная трудоемкость и себестоимость детали в изготовлении.

*Коэффициент габаритности*:

$$K_{\upsilon} = V / m,$$

где $V$ – объем литой детали, определяемый ее габаритами, дм$^3$;

$m$ – масса отливки, кг.

Конструкция отливки тем технологически рациональнее, чем меньше коэффициент ее габаритности.

*Оптимальная толщина стенок отливки*. При конструировании литых деталей оптимальная толщина стенок вычисляется на основе прочностных расчетов. Минимальная толщина $\delta$ стенки при литье в песчаные формы, определяется по диаграммам, как функция приведенного габаритного размера:

$$K = (2l + b + h)/3;$$

где $l$, $b$ и $h$ – соответственно длина, ширина и высота отливки, м; при $K > 3$ $\delta \geq 20$мм.

Таблица 23. Показатели технологичности конструкции литой детали

| Объект оценки | Критерий оценки | Показатель технологичности |
|---|---|---|
| Конструкция отливки | Компактность и оптимальная геометрия отливки | Наличие простых геометрических форм.<br>Минимально возможные габариты.<br>Минимально допустимая толщина стенок.<br>Проектирование открытых внутренних полостей или соединение смежных полостей окнами.<br>Конструирование отливок с учетом правила вписанных окружностей |
| Сплав | Свойства сплава | Физико-химические: температуры плавления и полиморфного превращения, модуль упругости, химический и фазовый состав и др.<br>Технологические: литейные (жидкоте куч есть, усадка, ликвация), свариваемость, обрабатываемость резанием и др.<br>Специальные (эксплуатационные): износостойкость, жаропрочность, коррозионная стойкость и др. |
| | Термическая обработка | Возможность проведения упрочняющей термической обработки |
| Способ литья | Характеристика способа литья | Габаритные размеры отливки<br>Сложность формы отливки<br>Применимость для различных сплавов<br>Длительность технологического цикла<br>Коэффициент использования металла (КИМ)<br>Стоимость оснастки<br>Возможные дефекты литья<br>Производительность<br>Преобладающие типы серийности производства |
| | Обеспечение качества отливки | Точность размеров и массы отливок<br>Качество (шероховатость) поверхности отливок<br>Минимальная толщина стенки отливки<br>Величина припуска на механическую обработку отливок<br>Гарантированные плотность, структура и механические свойства отливок |
| Обработка резанием | Состав сплава | Взаимодействие обрабатываемого сплава с инструментом (налипание) и окружающей средой (окисление)<br>Режим резания |
| | Форма отливки | Расположение отверстий, приливов н баз для механической обработки<br>Допустимая последовательность обработки<br>Коэффициент необработанной поверхности (КНП) |

### *Сопряжения и переходы*

По возможности отливка должна иметь плавно изменяющуюся толщину стенки, так как в местах резкого перехода (утолщения) могут возникать

дефекты усадочного характера (пористость, трещины, усадочные раковины). Сопряжения стенок различной толщины выполняются плавными переходами, при этом толщины стенок не должны отличаться более чем в 4 раза. Если сопрягаемые стенки отличаются по толщине менее, чем в 2 раза, то переход между ними выполняют в виде галтели с радиусом *r*. При разнице толщин более 2 раз, сопряжения выполняют в виде клина с галтелями.

*Пересечение ребер жесткости и стенок отливок*. Разгрузка узлов скопления металла в данном случае выполняется применением различного типа сопряжений, в том числе шахматного и кольцевого пересечения ребер.

*Выполнение пазов, полостей, отверстий.* Направленное затвердевание отливок исключает возможность образования усадочных раковин и пористости. Этот процесс реализуется, если отливки конструируют с учетом правила вписанных окружностей. Допускаемые размеры отверстий. получаемых в отливке, определяются типом отверстий (сквозное или глухое), составом сплава и способом литья. Минимальный диаметр литого отверстия возрастает с увеличением его глубины.

*Выполнение надписей на отливках.* Надписи на наружных и внутренних поверхностях отливок получают в процессе литья. Наиболее оптимальными (с точки зрения экономичности технологического процесса и обеспечения долговечности надписей) является способ получения обозначений на отливке с выпуклым выступающим шрифтом.

*Буртики, перемычки, выступы, бобышки* выполняются по краям окон и отверстий для их усиления и исключения появления в отливках трещин. Ширина перемычек между окнами зависит от размера отливок.

*Уклоны, (конусность) отливок* необходимы для облегчения съема полуформ. Их выполняют путем увеличения, уменьшения или одновременного уменьшения и увеличения толщины стенки отливки.

Выводы по достижению технологичности:

– оптимальная геометрия и компактность отливки достигаются уменьшением габаритов отливки;

– простая конфигурация (геометрическая форма) отливки способствует повышению ее точности;

– конструирование отливок с учетом правила вписанных окружностей способствует направленному затвердеванию отливки и уменьшению образования усадочных и шлаковых раковин;

– выравнивание толщин стенок, плавные переходы, галтели – способствует уменьшению внутренних напряжений, коробления и др.;

– правильный выбор состава литейного сплава, режимов и метода литья приводит к увеличению точности отливки, повышению ее механических и специальных свойств.

Разработка процесса изготовления отливки начинается с анализа технологичности конструкции детали с учетом факторов и требований, изложенных ранее. При выборе способа изготовления отливки определяющими факторами являются как технические требования, предъявляемые к изделию, так и технико-экономические показатели, а также серийность произ-

водства. В табл. 24 приводятся данные для выбора способа литья в зависимости от требований к отливкам (габариты отливок, точность размеров, чистота поверхности), а также возможностей спосба литья (серийность производства, коэффициент использования металла, процент выхода годных изделий, себестоимость процесса литья).

Таблица 24. Технические возможности и сравнительные показатели различных способов литья

| Показатель | Способ литья[1] | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | П | Д | К | В | О | ц |
| Максимальная масса отливок, кг | 250000 | 50 | 2000 | 100 | 200 | 50000 |
| Максимальный размер отливки, м | 20 | 1.2 | 2 | 1 | 1,5 | 10 |
| Минимальная толщина стенки отливки, мм | 3 | 0,5 | 2,2 | 0,5 | 1,5 | 4 |
| Класс размерной точности отливок | 5-16 | 3т-9 | 5т-13 | 3т-11 | 7т-15 | 6-15 |
| Квалитет по ГОСТ 25346-89[3] | 13 | 11 | 12-13 | 11 | 14 | 13-14 |
| Степень точности поверхности отливки[2] | 7-22 | 2-11 | 4-14 | 3-13 | 6-17 | 4-14 |
| Шероховатость поверхности[2] (До), мкм | 8-100[4] | 2.5-20 | 4-40 | 3,2-32 | 6,3-80 | 4-40 |
| Минимальный припуск на обработку (на сторону)[2], мм | 0,3-6 | 0,2-0,5 | 0,3-1 | 0,1-0,6 | 0,4-2 | 0,3-1 |
| Литейные уклоны, град | 0,5-3 | 0,5-1 | 0,5-1,2 | 1-2 | 1-2 | 3-6 |
| Коэффициент использования металла, % | 60-70 | 90-95 | 75-80 | 90-95 | 80-95 | 70-90 |
| Выход годного, % | 30-50 | 50-65 | 40-60 | 30-60 | 50-60 | 90-100 |
| Относительная себестоимость 1 т отливок | 1,0 | 1,8-2 | 1,2-1,5 | 2,5-3 | 1,5-2.0 | 0,6-0,7 |
| Экономически оправданная серийность, шт. | Без огр. | 1000 | 400-800 | 1000 | 200-500 | 100-1000 |
| Преобладающие типы серийности производства | Ед, Мс. С, Кс | Кс, Мае | С, Кс, Мае | Ед, Мс, С | С, Кс, Мае | С, Кс, Мае |
| Преобладающие разновидности (группы) отливок по массе[6] | М, Ср, Кр, Окр | М | М, Ср | М | М, Ср | М, Ср, Кр, Окр |

Примечание:

1. Способы литъя: П – в песчаные формы, Д – под давлением, К – в кокиль, В – по выплавляемым моделям, О – в оболочковые формы, Ц – центробежное литье
2. Согласно ГОСТ 26645-85 с изменением №1, 1989 г.
3. Номер квалитета (ГОСТ 25346-89) определялся по классу наибольшей размерной точности отливки (ГОСТ 26645-85) для каждого способа литья путем сопоставления значений допусков
4. Более 100 мкм
5. Ед-единичное, Мс – мелкосерийное. С – серийное, Кс – крупносерийное. Мае – массовое

6. М – мелкие, Ср – средние, Кр – крупные, Окр – очень крупные.

*Лекция 4*

# ОСНОВЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ СПЛАВОВ

Основные предпосылки для получения необходимого комплекса механических и других свойств конструкционных сплавов закладываются при их разработке и выплавке.

Реализация требуемых свойств осуществляется напоследующих этапах обработки, преследующих цель придать сплаву не только предусмотренные чертежом форму и размеры, но и рациональное внутреннее строение, под которым следует понимать структурно-фазовый состав и дислокационную структуру, от которых непосредственно зависит комплекс требуемых свойств. Важнейшими этапами обработки сплавов являются термическая обработка и поверхностное упрочнение. Термической обработкой обеспечивается заданный уровень свойств во всем объеме детали, а поверхностным упрочнением – только в определенных наиболее нагруженных и сильно изнашиваемых местах на поверхности детали.

*Термическая обработка* – комплекс операций нагрева и охлаждения сплава, осуществляемых по определенному режиму с целью изменения его строения и получения заданных свойств. Основу термической обработки составляет изменение структурно-фазового состава и дислокационной структуры сплава, которое может быть достигнуто путем использования таких ключевых факторов, как наличие в нем аллотропических превращений или зависящей от температуры ограниченной взаимной растворимости компонентов.

*Режим термической обработки* – температура нагрева, скорость нагрева до заданной температуры, время выдержки при этой температуре и скорость охлаждения.

Элементы режима термической обработки зависят от химического состава обрабатываемого сплава, размера детали и целевого назначения термической обработки.

*Превращение в стали при равновесном нагреве и охлаждении.* Первое фазовое превращение происходит при температуре около 727°С – изотерма PSK на диаграмме состояний железо – углерод. Оно состоит в превращении феррито-цементитной смеси (перлит) в аустенит, являющийся твердым раствором внедрения углерода в γ-Fe, содержащий при этой температуре 0,8% С независимо от количества последнего в обрабатываемой стали.

Температура превращения перлит – аустенит (П→А) является первой критической точкой (обозначают $A_{c1}$). При этой температуре, вследствие аллотропического превращения α-Fe в γ-Fe, образуется более равновесная, чем перлит, фаза аустенита, обладающая меньшим запасом свободной энергии, в которой растворяется весь находившийся в перлите углерод.

При нагреве стали до точки $A_{c1}$ после определенной выдержки, необходимой для протекания приводящих к равновесию диффузионных процессов, сталь приобретает равновесный двухфазный состав: $Ф_{0,02} + П_{0,8} \rightarrow Ф_{0,02} + А_{0,8}$ (доэвтектоидная сталь) и $П_{0,8} + Ц_{6,67} \rightarrow А_{0,8} + Ц_{6,67}$ (заэвтектоидная сталь).

При этом в феррите содержится около 0,02%С (точка Р), в аустените 0,8%С (точка S), в цементите 6,67%С.

В дальнейшем с увеличением температуры поддержание равновесия между образовавшимися фазами обеспечивается диффузионными изменениями их химического состава. Так, в доэвтектоидных сталях составы феррита и аустенита изменяются соответственно по линиям *PG* и *SG* (в них фактически происходит растворение Ф в А).

На линиях *SG* и *SE* находятся критические температуры, при которых сталь приобретает равновесную однофазную структуру аустенита. Точки, лежащие на линии *SE*, принято обозначать $A_{c3}$, а на линии *SG* – $A_{cm}$.

Достигаемая при охлаждении критическая температура, соответствующая началу выпадения феррита из аустенита – $A_{r3}$ (зависит от содержания углерода в стали). Данный процесс протекает равновесно, если их химический состав изменяется соответственно по линиям *PG* и *SG*.

При температуре, обозначаемой критической точкой $A_{r1}$, аустенит превращается в перлит.

Сплав с равновесной структурой имеет такую плотность дислокаций, которая обеспечивает ему минимальный предел текучести ($\rho \sim 10^7 см^{-2}$).

Термообработка в большинстве случаев производится с целью получения у стали более высоких показателей прочности. Кроме того, режим термической обработки должен строиться и с учетом возможности управления прочностью за счет регулирования размера зерен структурных составляющих стали.

### *Диаграмма изотермических превращений аустенита*

*Мартенситное превращение*

Получающаяся в результате термообработки дислокационная структура стали и ее структурно-фазовый состав зависят в основном от скорости охлаждения аустенита и предопределяются содержанием углерода и легирующих элементов в стали.

Диаграмма изотермических превращений аустенита эвтектоидной стали имеет простой вид (рис. 50).

Собственно диаграмма заключена между двумя критическими изотермами, из которых изотерма $A_1$ соответствует равновесному превращению аустенит-перлит, а изотерма $M_н$ – началу мартенситного превращения.

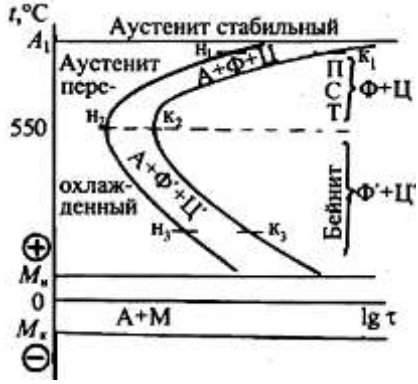



*Рис. 50. Диаграмма изотермических превращений аустенита (0,8%С)*

Важнейшим условием А – М превращения является непрерывное охлаждение аустенита в интервале от $M_н$ до $M_к$. При остановках фиксируется нераспавшийся аустенит с неприятными последствиями (снижение твердости, изменение со временем размеров и т.д.). Образующийся таким образом продукт – мартенсит – представляет собой пересыщенный, а потому неравновесный твердый раствор внедрения углерода в α-Fe. Он имеет игольчатую микроструктуру.

*Превращение аустенита при непрерывном охлаждении*

От скорости охлаждения зависят температурный интервал превращения аустенита, продолжительность превращения, характер и свойства полученного продукта.

При увеличении скорости охлаждения снижаются температуры распада аустенита на феррито-цементитная смесь и уменьшается время распада (рис. 51).

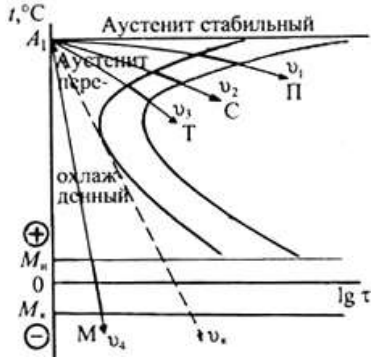



*Рис. 51. Влияние скорости непрерывного охлаждения аустенита на характер образующихся продуктов ($v_1 < v_2 < v_3 < v_4$ , 0,8%C)*

На рис. 52 и 53 можно видеть, как изменяется степень дисперсности пластин феррита и цементита по мере возрастания скорости охлаждения аустенита и связанного с этим снижения температуры и уменьшения времени формирования пластин. В металлографии принято эти структуры (П, С, Т) относить к семейству перлитов, а соответствующие превращения аустенита обычно называют перлитными превращениями.

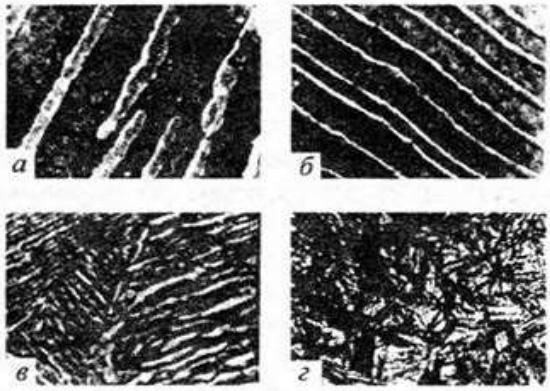



*Рис. 52. Фото микроструктур:*
*а – перлита, х7500; б – сорбита, х7500; в – тростита, х1500; г – мартенсита, х250.*

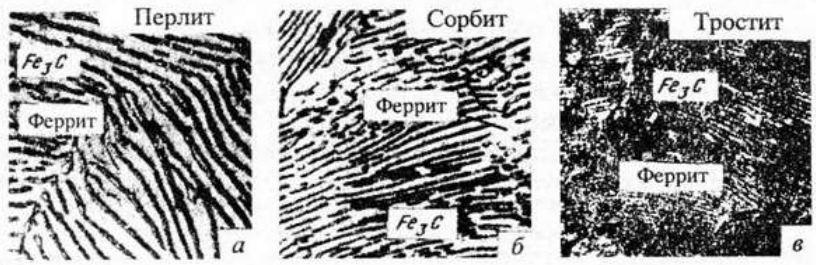



*Рис. 53. Фото строения перлита (а), сорбита (б), тростита (в), х1500*

При ускорении охлаждения образующиеся зерна продуктов должны уменьшаться, составляющие их пластинки феррита и цементита должны становиться короче и тоньше. Это должно приводить к повышению прочностных свойств продуктов распада.

Прочностные и другие механические свойства продуктов распада аустенита зависят не только от размеров зерен фаз, образующихся при распаде. Определяющее влияние на них оказывают плотность генерируемых при охлаждении дислокаций и уровень остаточных внутренних напряжений.

*Термические напряжения* возникают при всяких изменениях температуры сплава. Они обусловлены разницей удельных объемов (плотностей) сосуществующих в едином монолите слоев металла. Эти напряжения тем выше, чем больше скорость изменения температуры.

*Фазовые напряжения* возникают в процессе превращения аустенита в другие структуры (фазы0 вследствие того, что при этом в едином монолите одновременно сосуществуют различные по удельному объему фазы, (т.е. аустенит и продукты его распада). Уровень этих напряжений зависит главным образом от фактической разницы удельных объемов аустенита и образующихся при его распаде продуктов, а также и от скорости превращения, определяемой в основном скоростью охлаждения.

*Аустенит* занимает минимальный объем, далее в порядке увеличения удельного объема следуют П, С, Т, Б и М.

С увеличением скорости охлаждения аустенита температура его распада снижается, а термические и фазовые напряжения возрастают. Это приводит к росту плотности дислокаций, повышению твердости и снижению пластичности.

Относительно мартенсита можно сказать, что он является пересыщенным твердым раствором внедрения углерода в α-Fe с высокой плотностью дислокаций и наличием в его кристаллической решетке металлической и ковалентной связей, обусловливающих высокую твердость и нулевую пластичность (рис. 54).

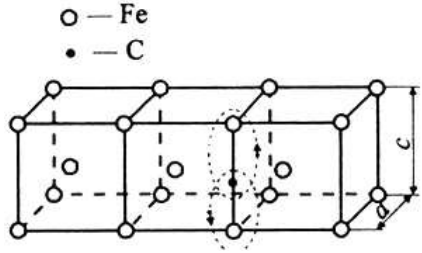



*Рис. 54. Схема трехцентровой ковалентной связи Fe – C – Fe в кристаллической решётке мартенсита*

### *Основные виды термической обработки стали*

Изменяя режим охлаждения нагретой до аустенитного состояния стали, можно в широком диапазоне изменять ее дислокационно-фазовое строение и, таким образом, получать различные комплексы механических и других свойств. Наиболее часто применяемые виды термообработки - отжиг, нормализация, закалка и отпуск.

***Отжиг*** – включает несколько отличающихся друг от друга по режиму операций термообработки, проводимых с целью приведения стали в термодинамически равновесное состояние с минимальной плотностью дислокаций, по возможности невысокой твердостью и высокой пластичностью. Наиболее распространенной разновидностью отжига является обыкновенный отжиг, который производится с целью снижения твердости стали перед механической обработкой и подготовки ее структуры к окончательной обработке, состоящей из закалки и отпуска. Сталь нагревается до температуры на 30-50$^0$С выше линии *GSK*, выдерживается при этой температуре до полного завершения структурно-фазовых превращений и охлаждается с очень малой скоростью (менее 100$^0$С) в камере печи с отключенными источниками теплоты (рис. 55).

Заэвтектическую сталь нельзя нагревать выше $A_{cm}$ (линия SE) из-за образующейся цементитной сетки, затрудняющей механическую обработку резанием.

***Диффузионный отжиг (гомогенизация)*** – производят с целью устранения дендритной ликвации. Нагрев до 1000-1100°С и длительная выдержка 18-20 часов. После гомогенизации для устранения крупнозернистости производится обыкновенный отжиг, или нормализация.

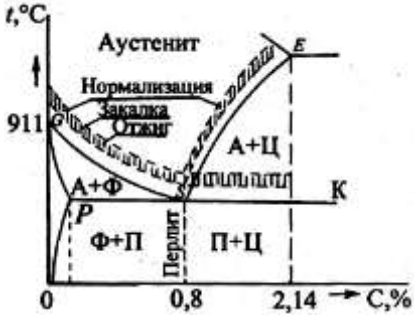



*Рис. 55. Температура нагрева стали при основных видах термообработки в зависимости от содержания углерода*

***Рекристаллизационный отжиг*** – производится с целью устранения наклепа холоднодеформированного металла. Температура нагрева при этом виде отжига выбирается на 150-250$^0$С выше температуры рекристаллизации ($T_p$) обрабатываемого сплава. Укрупнение рекристаллизованных зерен за счет поглощения более крупными зернами соседних мелких (собирательная рекристаллизация) происходит по окончании процесса формирования новых зерен из материала разрушенных старых. Рекристаллизованный металл имеет низкие прочностные характеристики и высокую пластичность. Температура рекристаллизации зависит от состава сплава и связана с температурой его плавления уравнением $T_p = = \alpha T_{пл}$., α – коэффициент, зависящий от природы сплава. Для углеродистых сталей α=0,4, для легированных сталей и сложных сплавов α=0,6-0,8.

Для углеродистой стали температура нагрева составляет 600-700°С.

***Нормализация.*** Температура нагрева производится выше на 30-50°С линии GSE с охлаждением на спокойном воздухе. Нормализацией можно получить более благоприятную мелкозернистую структуру стали, обладающую повышенными прочностными свойствами. В ряде случаев, когда от материала изделия не требуется повышенных прочностных свойств, нормализация заменяет закалку.

Для низкоуглеродистой стали нормализация заменяет закалку из-за очень высокой критической скорости закалки.

Для заэвтектоидных сталей одной из целей нормализации является разрушение цементитной сетки вокруг перлитных зерен.

***Закалка.*** После закалки сталь приобретает неравновесную структуру, что выражается в повышении твердости стали.

Закалку на мартенсит принято считать истинной закалкой. Преимущества ее – возможность получения из мартенсита за счет последующего отпуска продуктов с такими ценными комплексами свойств, которые другими видами термической обработки получить невозможно.

Режим истинной закалки включает нагрев на 30-50°С выше линии *GSK* и охлаждение со скоростью не ниже критической. Критическая скорость закалки имеет очень важное значение, от которого зависит такое технологической свойство стали, как прокаливаемость, т.е. способность закаливаться на определенную глубину.

Введением в сталь углерода и легирующих добавок можно повысить прокаливаемость.

Т.к. изменение скорости охлаждения от поверхности в глубь детали зависит от температуры и рода охлаждающей среды, то при оценке прокаливаемости следует учитывать и эти факторы.

***Закалка режущего инструмента*** производится в двух средах с целью уменьшения внутренних напряжений (кратковременная в течение нескольких секунд в воде с дальнейшим охлаждением в мягкой среде - минеральном масле, и называется прерывистой, или закалкой в двух средах.

***Обработка холодом.*** Для устранения остаточного аустенита после обычной закалки изделие помещают в холодильную камеру с температурой, равной или близкой к точке *Мк* обрабатываемой стали (около -80°С). При этом продолжается мартенситное превращение и сталь приобретает структуру мартенсита с минимальным количеством остаточного аустенита.

Повышается твердость и стабилизируется размеры изделия, что важно для режущего и мерительного инструмента.

***Отпуск стали.*** Операция нагрева закаленной стали для уменьшения имеющихся в ней остаточных напряжений и придания ей комплекса свойств для нормальной долголетней эксплуатации изделия. Для исключения аллотропических превращений отпуск проводят ниже точки $A_{c1}$.

В зависимости от температуры нагрева существует три вида отпуска-*низкий, средний и высокий отпуск.*

Отпуск преследует цель не просто устранить внутренние напряжения в закаленной стали, но и придания стали требуемого комплекса свойств.

*Низкий* (*низкотемпературный)* – производится при 150-180°С (для легированных сталей до 250°С). Образующийся отпущенный мартенсит Мо обладает более благоприятным комплексом свойств: высоким уровнем твердости с небольшим запасом вязкости и пластичности (низкому отпуску подвергают режущий и мерительный инструмент, штампы для холодной штамповки и цементированные детали – для обеспечения высокой износостойкости цементированного слоя).

*Средний* (*среднетемпературный)* отпуск производится при температуре 350-450°С (иногда до 470°С). Завершается распад мартенсита с образованием нормальных по составу и внутреннему строению феррита и цементита. Обра-

зующийся при среднем отпуске продукт называется троосititом отпуска $T_o$.

Обеспечивается высокий предел упругости, с удовлетворительной вязкостью металла.

*Высокотемпературный (высокий) отпуск* производится при 500-650$^0$С. Происходит образование более крупных, чем у $T_o$, зерен феррита и цементита, дальнейшим снижением плотности дислокаций и почти полным устранением остаточных напряжений. Получающийся при высоком отпуске продукт распада мартенсита, называемый сорбитом отпуска, обладает максимальной для стали вязкостью вместе с удовлетворительными показателями прочности. Термическую обработку, сочетающую закалку и высокий отпуск, называют улучшением.

***Термомеханическая обработка стали (ТМО).*** Заключается в пластической деформации аустенита с проводимой сразу после нее закалкой и последующим низким отпуском. ТМО позволяет получать у стали более высокие прочностные и вязкостно-пластические свойства, чем после обычной закалки и низкого отпуска.

Дополнительный положительный эффект – предварительный наклеп аустенита при пластической деформации. Образуется более плотная - до $10^{13}$ см$^{-2}$ дислокационная структура.

Происходит повышение $\sigma_в$ до 3000 МПа при $\delta$ = 6-8%, в то время как при обычной закалке и низком отпуске эти показатели составляют соответственно 2000 МПа и 3-4%.

Существуют две разновидности ТМО: низкотемпературная (*НТМО) и* высокотемпературная (*ВТМО).* При ВТМО аустенит деформируют при температуре выше $A_{c3}$ до степени деформации 20-30%. При НТМО производится деформация переохлажденного до 400-600°С аустенита при степени деформации 75-90%.

ВТМО предпочтительней, так как сталь дополнительно приобретает более высокие значения вязкости разрушения $K_{1c}$, (трещиностойкость), работы распространение трещины КСТ и сопротивление усталости при пониженной критической температуре хрупкости $t_{50}$ и меньшей чувствительности к концентраторам напряжений.

## Поверхностное упрочнение металлов и сплавов

*Химико-термическая обработка. Общие закономерности.*

Химико-термической обработкой (ХТО) называют обработку, заключающуюся в сочетании термического и химического воздействия с целью изменения состава, структуры и свойств поверхностного слоя металла в необходимом направлении. Происходит повышенное насыщение металлического материала элементами: C, N, B, Al, Cr, Si, Ti и другими путем диффузии в атомарном состоянии из внешней среды (твердой, газовой, паровой, жидкой) при высокой температуре.

Процесс диффузии приводит к образованию диффузионного слоя, под которым понимают слой материала детали у поверхности насыщения, отличающийся от исходного по химическому составу, а значит, структуре и свойствам (рис. 56).

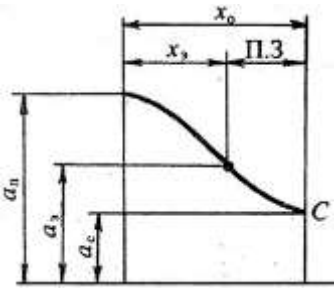



*Рис. 56. Схема диффузионного слоя: П.З – переходная зона; С – сердцевина; $x_0$ – общая толщина диффузионного слоя; $x_з$ – эффективная толщина диффузионного слоя; $a_п$ – значение базового параметра у поверхности; $a_з$ – предельное значение базового параметра, установленное для эффективной толщины; $a_c$ – значение базового параметра для сердцевины*

***Диффузионное насыщение стали углеродом и азотом***

*Цементация стали.* Цементацией (науглероживанием) называется ХТО, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали углеродом при нагревании в соответствующей среде – карбюризаторе. Процесс проводят при температуре выше точки $A_{c3}$ (930-950°С), когда устойчив аустенит, растворяющий углерод в больших количествах. Для цементации используют низкоуглеродистые (0,1-0,18% С), и легированные стали. Цементируют детали после механической обработки с припуском под шлифование (50-100 мкм).

Часть детали, не подлежащие упрочнению, защищают тонким слоем меди (0,02-0,05мм), или изолируют специальными обмазками. Цементованный слой имеет переменную концентрацию углерода по толщине, убывающую от поверхности к сердцевине детали (рис. 57).

*Твердая и газовая цементация***.** Газовая цементация является более совершенным технологическим процессом, чем твердая. Она имеет ряд преимуществ по сравнению с цементацией в твердом карбюризаторе. В случае газовой цементации можно получить заданную концентрацию углерода в слое; сокращается длительность процесса; обеспечивается возможность полной механизации и автоматизации процесса; значительно упрощается последующая термическая обработка деталей, так закалку можно проводить непосредственно из цементационной печи.

Основная реакция науглероживания:

$$2CO \rightarrow CO_2 + C_{ат};\ C_{ат} \rightarrow \gamma Fe(C).$$

Процесс ведут при 910-930$^0$С в течение 6-12 ч. Далее проводится термообработка после цементации, необходимая для того, чтобы исправить структуру и измельчить зерно сердцевины и цементованного слоя, неизбежно увеличивающееся во время длительной выдержки при высокой температуре цементации, получить высокую твердость цементованном слое и хорошие механические свойства сердцевины.

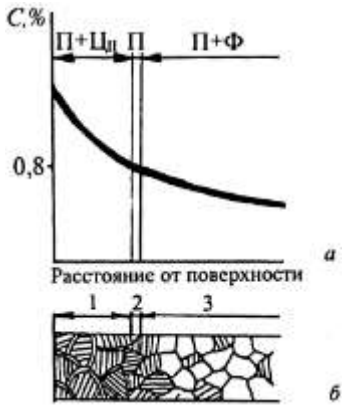



*Рис. 57. Изменение концентрации углерода по глубине цементованного слоя (а) и схема микроструктуры незакаленного науглероженного слоя (б): 1 – эаэвтектоидная; 2 – эвтектоидная; 3 – доэвтектоидная зоны*

Заключительная операция термической обработки – низкий отпуск при 160-180°С, переводящий мартенсит закалки в поверхностном слое в отпущенный мартенсит, снимающий напряжения и улучшающий механические свойства. Твердость поверхности цементованного слоя находится в пределах HRC 58-62, в сердцевине 30-45.

***Азотирование стали.*** Называется ХТО, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали азотом при нагревании в соответствующей среде. Твердость азотированного слоя сохраняется при нагреве до 450-500°С, в отличие от твердости цементованного слоя, сохраняющейся до 200-225°С.

Процесс проводят при 500-600°С (низкотемпературное азотирование).

Высокотемпературное азотирование проводят при 600-1200°С для сталей ферритного и аустенитного классов. Для газового азотирования используют аммиак, диссоциирующий по реакции:

$$NH_3 \leftrightarrow N + 3/2\ H_2$$

В легированных сталях образуются нитриды MN,$M_2N$ (VN, TiN, $Cr_2N$ и др.), способствующие повышению твердости азотированного слоя.

*Ионное азотирование и цементация.* Ионное азотирование применяется для активизации процессов в газовой среде и на насыщаемой поверхности. При напряжении ~ 1000В, давлении 13,3-26,3 Па происходит ионная бомбардировка детали (катода), нагрев поверхности до 200°С с очисткой поверхности, далее устанавливается рабочий режим: напряжение 300-800В, давление 133,3-1333 МПа, нагрев поверхности до 450-500°С. Ионы азота поглощаются поверхностью катода (детали), а затем диффундируют вглубь.

*Ионная цементация* производится при нагреве поверхности до 900-1050°С. При ионной цементации и ионном азотировании наблюдается ускорение диффузионных процессов, особенно в начальной стадии, и сокращается общая длительность насыщения по сравнению с традиционными способами.

***Нитроцементация.*** Одновременное насыщение стали азотом и углеродом, имеющее ряд преимуществ. Азот способствует диффузии углерода, поэтому можно снизить температуру диффузионного насыщения до $850^0$С. Далее производится закалка из печи, и отпуск при 160-180°С.

Структура нитроцементованного слоя состоит из мелкоигольчатого мартенсита, небольшого количества карбонитридов и 20-30% остаточного аустенита.

Твердость слоя после закалки и низкого отпуска HRC ~ 58-60, толщина 0,2-0,8 мм.

### *Диффузионное насыщение сплавов металлами и неметаллами*

*Борирование* насыщение поверхности деталей бором с целью повышения твердости, износостойкости и коррозионной стойкости применяют для сталей перлитного, форритного и аустенитного классов, тугоплавких металлов, никелевых сплавов.

При борировании железа слой состоит из боридов FeB и $Fe_2B$, образующих столбчатые кристаллы. Переходный слой представляет твердый раствор бора в α-Fe. Бориды устойчивы до температур: FeB – до 800°С, $Fe_2B$ – до 1000 °С.

Микротвердость борида FeB, обладающего и наибольшей хрупкостью, составляет 2000 $H_{50}$, $Fe_2B$ имеет микротвердость 1450 $H_{50}$. Высокая микротвердость боридного слоя сохраняется до 700°С и позволяет применять борирование для повышения износостойкости деталей, работающих при повышенных температурах.

Борированные слои обладают высокой коррозионной стойкостью в водных растворах соляной, серной и фосфорной кислот.

*Силицирование.* Насыщение поверхности кремнием, в результате чего повышаются коррозионная стойкость, твердость и износостойкость металлов и сплавов. Образуется α – фаза (твердый раствор кремния в α - Fe ).

*Хромирование.* Насыщение поверхностей изделий хромом. Дифузионному хромированию подвергаются чугун, стали разных классов, сплавы на основе никеля, молибдена, вольфрама, ниобиля, кобольта и металлокерамических материалов.

Проводят в вакумных камерах при давлении $10^{-1}$ Па при $1420^0$ С 18-24 часа с получением хромированного слоя толщиной 2,0-2,5 мм с концентрацией на поверхности хрома до 70%.

Процесс обеспечивает повышенную устойчивость стали против газовой коррозии (окалиностойкость) до $800^0$С. Твердость слоя, полученного при хромировании железа, достигает HV 250-300, при хромировании стали HV 1200-1300.

*Алитирование* – насыщение поверхности алюминием с целью повышения жаростойкости, коррозионной и эрозионной стойкости. В результате алитирования сталь приобретает высокую окалиностойкость, доходящую до $850\text{-}900^0$С, хорошее сопротивление коррозии в атмосфере и морской воде. Толщина алитированного слоя 0,2-1,0 мм, твердость до HV500, износостойкость низкая.

*Поверхностная закалка стали ТВЧ*. Назначение данного метода обработки – повышение твердости, износостойкости, предела выносливости поверхности обрабатываемых деталей. Сердцевина детали остается вязкой и изделие хорошо воспринимает ударные нагрузки. Толщина закаленного слоя определяется по формуле:

$$h = 4{,}46 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}},$$

где $\rho$ – удельное электросопротивление, Ом·м; $f$ – частота, Гц; $\mu$ – магнитная проницаемость, Гн/м;

Скорость нагрева ТВЧ в зависимости от параметров обработки составляет 50-500 $^0$С/с; глубина слоя 2-5 мм.

После закалки с индукционным нагревом детали подвергают низкому отпуску при $160\text{-}180^0$С.

Используют для сталей с содержанием 0,4-0,5 % углерода (40, 45, 40Х, 40ХН и др.).

Структура поверхности – мартенсит отпуска, в сердцевине – феррито–перлитная структура.

*Лазерная термическая обработка (ЛТО).* Механизм ЛТО – фазовое превращение материала после его скоростного нагрева до температуры выше температуры фазовой перекристаллизации (до температуры плавления) с очень быстрым последующим охлаждением за счет теплопроводности материала изделия.

Скорость охлаждения составляет $(5\text{-}10)\cdot 10^3$ °С/с, при кристаллизации из расплава – $10^6$ $^0$С/с – в $10^3$ раз выше скорости обычной закалки. ЛТО позволяет повысить твердость и износостойкость упрочняемых материалов. Методом ЛТО хорошо упрочняют средне- и высоколегированные углеродистые и иснтрументальные стали. ЛТО практически не влияет на предел прочности и предел текучести сталей.

*Лазерная химико-термическая обработка (ЛХТО).* Насыщение легирующими элементами происходит путем диффузии и массопереноса в твердой фазе, из расплава, плазмы, при этом возможно конвективное и чисто механическое перемешивание расплава в зоне воздействия лазерного импульса. При ЛХТО на поверхность детали предварительно наносят различными способами легирующие элементы. Для нанесения используют электролитическое или химическое осаждение, напыление, электроискровое легирование, электрофоретическое осаждение порошков, шликерное нанесение порошковых смесей и другие методы. ЛХТО обычно производится в режиме расплавления предварительно нанесенного слоя легирующих элементов и подплавления поверхности детали.

*Лекция 5*

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

## Физико-механические основы обработки металлов давлением

Обработкой давлением могут быть получены заготовки или детали из материалов, обладающих пластичностью, т.е. способностью необратимо деформироваться без разрушения под действием внешних сил. При обработке давлением возникающий механизм пластического деформирования скольжением можно представить как лавинообразный процесс движения дислокаций вдоль плоскостей скольжения под влиянием сдвиговых напряжений.

Обработка давлением основана на явлении пластичности – способности необратимо деформироваться без разрушения под действием внешних сил.

В монокристаллах пластическая деформация происходит под действием касательных напряжений, вызывающих скольжение атомарных плоскостей друг относительного друга – явление сдвига. Плоскости скольжения определяются по наличию в них дислокаций.

Механизм пластического деформирования скольжением при обработке давлением представляется как лавинообразный процесс движения дислокаций вдоль плоскостей скольжения под влиянием сдвиговых напряжений.

Механизм пластического деформирования двойникованием, или двойниковым сдвигом встречается в металлах и сплавах, имеющих гексагональную или объемно-центрированную кубическую решетку – вместе с ним появляются дополнительные очаги сдвиговой деформации по механизму обычного скольжения (рис. 58).

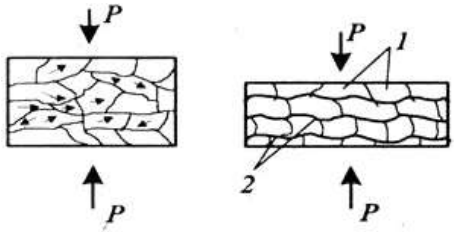



*Рис. 58. Схема развития пластической деформации и переориентировки зерен: 1 – строчки; 2 – волокна*

Процессы при деформации поликристаллических тел более сложны, чем в монокристаллах, так как любое перемещение атомов в результате скольжения или двойникования обязательно вызовет соответствующие групповые перемещения по границам зерен или в самих соседних зернах.

Структура металла после деформирования характеризуется вытянутыми зернами, ориентированными в направлении интенсивного течения металла.

При пластическом деформировании нужная форма заготовки достигается в условиях постоянства объема – объем, взятый для обработки, считается неизменным.

$$\frac{H}{h} = \frac{B_2}{B_1} = \frac{L_2}{L_1},$$

$$HB_1L_1 = hB_2L_2,$$

где $H\backslash h$ – уковка или высотная деформация; $B_2 /B_1$ – поперечная деформация; $LL$ – вытяжка.

Напряженное состояние характеризуется схемой главных напряжений в малом объеме твердого тела: объемное, плоское, линейное (рис. 59).

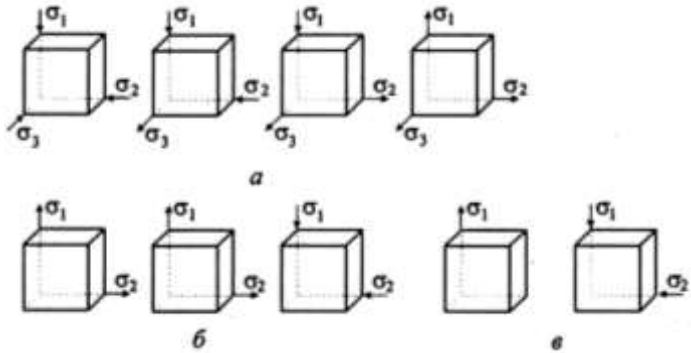



*Рис. 59. Схема напряжённого состояния: а – объёмное; б – плоское; в – линейное*

Прессование, прокатка, горячая объемная штамповка, ковка – характеризуются всесторонним (объемным) неравномерным сжатием.

Листовая штамповка и волочение – характеризуются схемой двустороннего сжатия с растяжением.

*Деформированное состояние* – совокупность деформаций, возникающих по различным направлениям в пространстве.

После обработки давлением металл приобретает выраженную анизотропию свойств. Прочностные характеристики – временное сопротивление, предел текучести меняются меньше, чем пластические – относительное удлинение, ударная вязкость.

Все характеристики имеют значительно большую величину в направлении волокон, чем поперек их.

Влияние химического и фазового состава на пластичность:

– чистые металлы более пластичны, чем их твердые растворы;

– однофазные структуры более пластичны, чем двухфазные;

– химическая неоднородность, ликвации, растворенные газы снижают пластичность, особенно в области высоких температур для железоуглеродистых сплавов из-за вредного влияния серы и фосфора.

Влияние температуры: с повышением температур пластичность возрастает, а сопротивление деформированию уменьшается. В области температур, близких к солидусу, происходит резкое падение пластических свойств – температурный интервал хрупкости (ТИХ) (рис. 60).

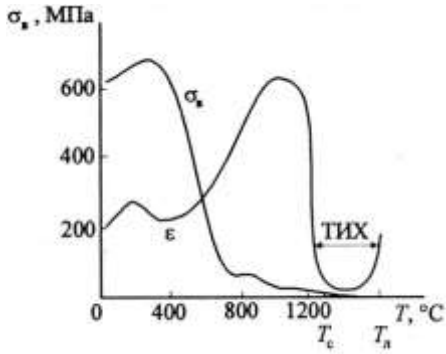



*Рис. 60. Влияние температуры нагрева стали на её пластические свойства (ε) и сопротивление пластическому деформированию ($\sigma_в$)*

### Влияние скорости деформирования

Неоднозначно – в горячем состоянии увеличение скорости деформирования понижает пластичность металла (табл. 26).

В холодном – выше некоторых значений увеличение скорости деформирования приводит к повышению температуры обрабатываемого металла, что приводит к разупрочнению и повышению пластичности.

Таблица 26. Средние скорости деформации для различных видов оборудования обработки давлением

| Вид оборудования | Скорость деформации, $с^{-1}$ |
|---|---|
| Прессы: | |
| гидравлические | 0,03-0,06 |
| кривошипные | 1,2-5,0 |
| Паровоздушные молоты | 10-250 |
| Станы: | |
| прокатные крупносортные | 5-25 |
| толстолистовые | 3,5-45 |
| тонколистовые | 25-200 |

*Наклеп (упрочнение)* – изменение свойств металла в результате холодной деформации.

Поликристаллы упрочняются сильнее, чем монокристаллы, металлы с мелкозернистой структурой, твердые растворы – больше, чем крупнозернистые или чистые металлы.

В 2-3 раза можно повысить предел прочности, предел текучести.

Понижение пластических свойств, например, у наклепанной низкоуглеродистой стали – почти в 6 раз.

Деформирование заготовки при температуре выше температуры рекристаллизации сопровождается образованием вытянутых упрочненных зерен и немедленным снятием наклепа в процессе рекристаллизации. *Горячая деформация* – процесс обработки давлением, при котором скорость рекристаллизации достаточна для полного протекания разупрочнения, а конечная структура металла оказывается равноосной без следов упрочнения. Сопротивление металла деформированию уменьшается в 8-10 раз.

### Дефекты обработки

*Пережог* – интенсивное окисление границ зерен, охрупчивание металла (не может быть исправлен).

*Перегрев* – значительный рост зерна, снижение пластических свойств заготовки, может быть исправлен дополнительной термической обработкой.

Заготовку необходимо равномерно нагревать по всему сечению. Необходимо учитывать теплопроводность металла, его физико-химическое состояние, величину сечения.

Слой окалины (для углеродистой стали) может составлять 1-2% от массы заготовки, обезуглероженный слой – до 1,5-2 мм.

Рекомендации по нагреву: медленный нагрев до 600-700 °С, затем – быстро до конечной температуры. Для уменьшения окисления нагрев рекомендуется проводить в нейтральной или восстановительной атмосфере.

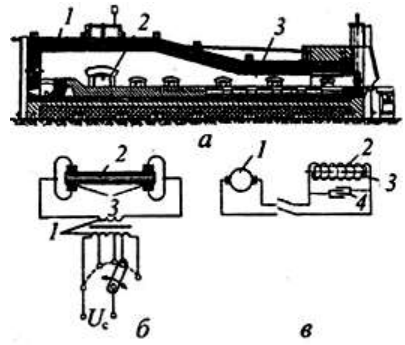



*Рис. 61. Нагревательные устройства: а – методическая печь: 1 – наиболее нагретая часть; 2 – выгрузочные и наблюдательные окна; 3 – менее нагретая часть; б – нагрев проходящим током: 1 – понижающий трансформатор; 2 – нагреваемая заготовка; 3 – токоподводы; в – установка индукционного нагрева: 1 – генератор высокой частоты. 2 – индуктор; 3 – заготовка; 4 – батарея конденсатора*

*Оборудование* – нагревательные печи и электронагревательные устройства. Печи – камерные и методические (рис. 61).

В электронагревательных устройствах теплота выделяется непосредственно в самой заготовке в виде теплоты сопротивления при пропускании через нее большой силы тока, либо при возбуждении в ней вихревых токов в специальных индукционных печах.

Преимущества нагревательных устройств: высокая скорость нагрева (в 15-10 раз выше, чем в печах), почти полное отсутствие окалины (в 4-5 раз меньше), удобство в работе, легкая автоматизация, экологичность.

Недостатки: ограничения по габаритам заготовок; требования к постоянному сечению; необходимость отдельного индуктора под каждый вид заготовок. КПД индукторов невелик.

## Получение заготовок прокатом

Прокатка - вид обработки давлением, при котором исходная заготовка – слиток или отливка под действием сил трения непрерывно втягивается между вращающимися валками и пластически деформируется с уменьшением толщины и увеличением длины, а иногда ширины (рис. 62).

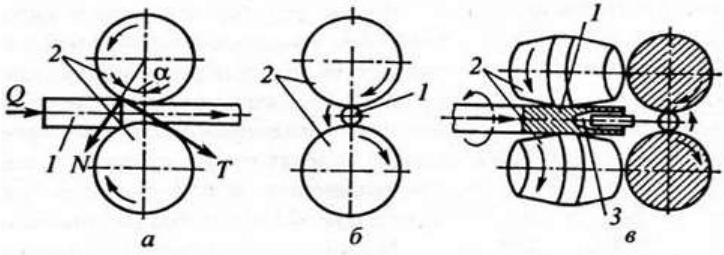



*Рис. 62. Схема основных видов прокатки: а – продольная; б – поперечная; в – поперечно-винтовая*

## Продольная, поперечная и поперечно-винтовая прокатка

*Продольная* – заготовка деформируется между двумя валками, вращающимися в разные стороны, перемещается в направлении, перпендикулярном осям валков.

*Поперечная* – валки вращаются в одном направлении, заготовка (тело вращения) перемещается параллельно осям валков и обжимается с увеличением длины и уменьшением площади поперечного сечения.

*Поперечно-винтовая* – валки расположены под углом друг к другу, вращаются в одну сторону и при обжатии заготовки сообщают ей вращательное и поступательное движения.

Для обеспечения захвата заготовки валками необходимо, чтобы tgα был меньше коэффициента трения. При горячей обработке α 15-24°; холодной – 5-8°. Угол α называется *углом захвата.* Для обеспечения захвата заготовки валками необходимо, чтобы тангенс угла захвата был меньше коэффициента трения: *f>tgα.*

При горячей прокатке стали гладкими валками угол захвата равен $15\text{-}24^0$, при холодной $5\text{-}8^0$.

Валки (инструменты прокатки) – гладкие, или с фигурными вырезами – ручьями (рис. 63).

Совокупность вырезов в верхнем и нижнем валках образует *калибр* (открытый или закрытый).

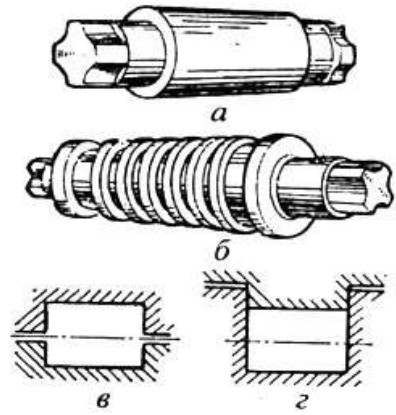



*Рис. 63. Прокатные валки и калибры: а – гладкий; б – с фигурными вырезами; в – калибр открытый; г – калибр закрытый*

*Рабочая клеть* – комплект прокатных валков со станиной. Прокатные станы подразделяют по числу и расположению валков в клетях – на дуо, трио, кварто, многовалковые и универсальные.

Дуо-клеть – могут быть реверсивными и нереверсивными.

Многовалковые клети имеют 6-20 валков и более. Их применяют для прокаткишироких листов большой точности, а также для тонких лент и фольги толщиной менее 0,2 мм (рис. 64).

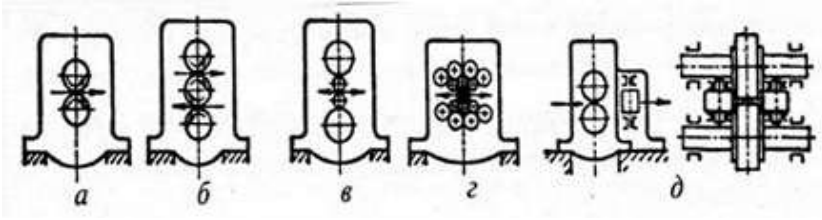



*Рис. 64. Рабочие клети прокатных станов:*
*а – дуо; б – трио; в – кварто; г – многовалковый; д – универсальные*

Форму поперечного сечения продукции, получаемой при прокатке, называют *профилем*.

*Сортамент* – совокупность форм и размеров профилей, получаемых при прокатке: сортамент подразделяется на группы – сортовой прокат, листовой, трубы, профили специального назначения (рис. 65).

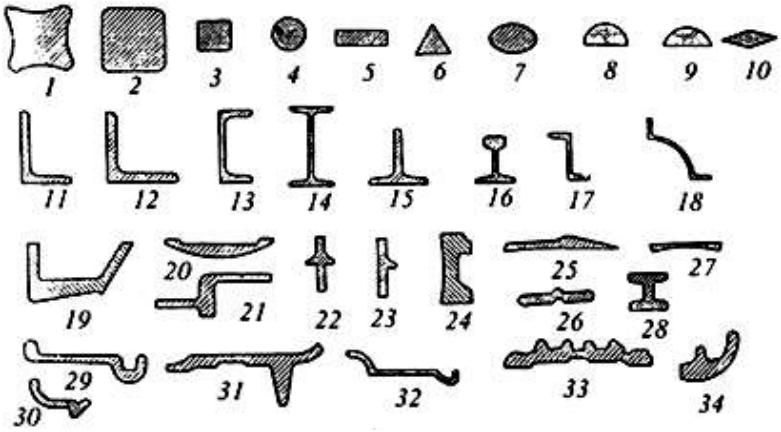



*Рис. 65. Разновидности профилей проката:*
*1-10 – простые; 11-17 – фасонные; 18-34 – сложные специальные*

*Сортовой прокат* – подразделяют по форме сечения: простой (геометрической формы) – круг, квадрат, шестигранник; фасонный – уголки, тавр, двутавр, рельсы, швеллеры.

*Листовой* – толстолистовой (>4 мм), тонколистовой (< 4 мм).

*Листовая сталь* – автотракторная, трансформаторная, кровельное железо, жесть, листовая сталь с покрытиями, биметаллический лист.

*Слитки* – исходные заготовки при производстве сортового проката или листов.

*Блюмы* – заготовки квадратного сечения от 450×450 мм до 150×150 мм – получают из слитков на блюминге (при температуре нагрева перед прокаткой до 1300°С).

*Слябы* – заготовки прямоугольного сечения максимальной толщиной до 350 мм и шириной до 2300 мм. Слябы – исходный материал для прокатки на толстый лист.

На сортовых станах заготовка после нагрева в печах последовательно проходит прокатку в 7-15 калибрах, после резки на мерную длину полученный профиль охлаждают, правят в холодном состоянии, производят термообработку.

Листы для холодной листовой штамповки после отжига дополнительно обрабатывают на дрессировочных станах. Дрессировка производится на станах холодной прокатки с обжатиями в пределах до 3% с целью получения наклепа. Полученные после дрессировки, отжига и травления листы называются *декапированными.*

### Получение труб (бесшовных и сварных)

Бесшовные трубы прокатывают ∅30-650 мм с толщиной стенки от 2 до 160 мм, сварные – диаметром от 5 до 2500 мм.

Основной операцией при получении бесшовных труб является операция прошивки заготовки (получение сквозного отверстия). Заготовку нагре-

вают в методической печи до температуры горячей обработки давлением и направляют на прошивочный стан с двумя бочкообразными валками, оси которых расположены под углом 10-15° друг к другу, т.е. используется принцип поперечно-винтовой прокатки. В результате вращательно-поступательного движения заготовки при достаточно большой степени обжатия в центре заготовки возникают весьма значительные радиальные растягивающие напряжения, вызывающие течение металла от центра к периферии. Металл в центре доводится до состояния разрыхления, и заготовка легко прошивается неподвижным прошивнем, надвигаясь на него в результате поступательного движения заготовки.

Величина вытяжки в результате прошивки составляет 200-300%. Получаются трубы ∅57-426 мм, с толщиной стенки 3-30 мм. На непрерывном трубопрокатном стане получают трубы ∅29-108 мм, со стенкой 8-12 мм.

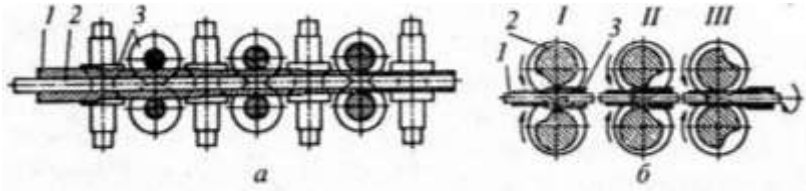



*Рис. 67. Прокат труб на оправке с целью уменьшения толщины (а) и гильз на пилигримном стане (б)*

Производительность одной установки составляет до 300 тыс. изделий в год.

Сварные трубы получают из низкоуглеродистых и низколегированных сталей – из прокатанных полос, называемых штрипсами, или листов шириной в Ø или ½ Ø трубы.

Процесс включает: формовку плоской заготовки в трубу, сварку (печную, электрическую, газовую, высокочастотную и др.), правку, калибровку.

Трубы изготавливают с прямыми и спиральными швами. Прочность и надежность труб со спиральным швом выше, чем с прямым.

### Специальные виды проката

*Периодический и специальный прокат.* Во многих случаях рациональным является применение гнутых профилей, изготавливаемых в холодном состоянии на роликовых листогибочных станах. Изготавливают закрытые и открытые гнутые профили (рис. 68). Процесс профилирования прокаткой легко совмещается со сваркой, пробивкой отверстий и др.

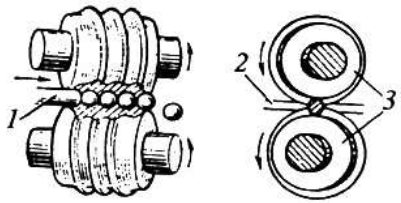



*Рис. 67. Прокат шаров: 1 – заготовка; 2 – ограничители; 3 – прокатные валки*

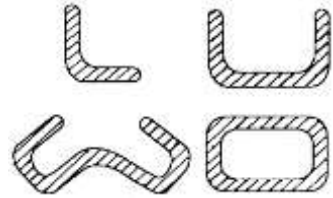


*Рис. 68. Виды гнутых профилей*

*Волочение.* Процесс протягивания прутка через отверстие, размеры которого меньше, чем исходные размеры прутка. Длина прутка увеличивается, а поперечное сечение приобретает форму отверстия с одновременным уменьшением поперечного сечения. Волочение производят в холодном состоянии. Исходным материалом могут быть горячекатаный пруток, сортовой прокат, проволока, трубы.

Получают проволоку (до 0,002 мм), прутки простой и сложной конфигурации сечения, тонкостенные трубы, фасонные шпонки и др.

Инструмент при волочении сплошных профилей:

– волоки (для сплошных профилей);

– волоки и оправки (для полых профилей) (рис. 69).

Осуществляют на волочильных станах, состоящих из тянущего устройства и волочильного инструмента (рис. 70).

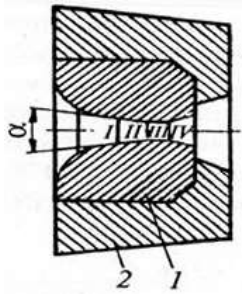



*Рис. 69. Сферическая входная часть волоки: I – смазывающий конус; II – деформирующий конус; III – калибрующий поясок; IV – выходной конус*

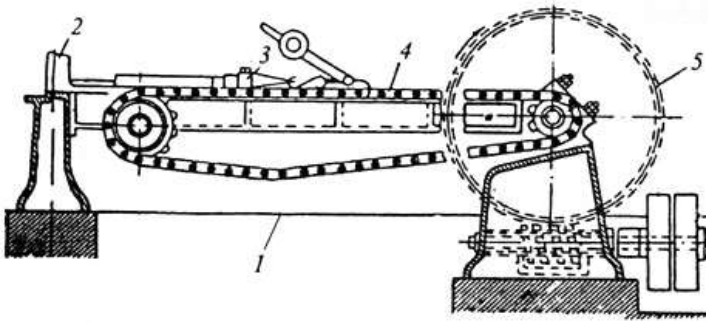



*Рис. 70. Схема волочильного стана цепного типа: 1 – станина; 2 – волока; 3 – волочильная тележка; 4 – цепь; 5 – привод волочильной тележки*

Существуют станы с прямолинейным движением протягиваемого материала, и барабанные станы (рис. 71).

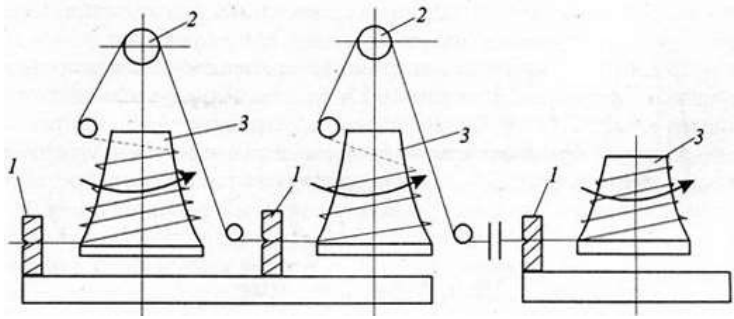



*Рис. 71. Схема стана барабанного типа: 1 – волочильная доска; 2 – натягивающее устройство; 3 – барабан*

Волочение обеспечивает высокую точность размеров, малую шероховатость поверхности, большую степень упрочнения (рис. 72).

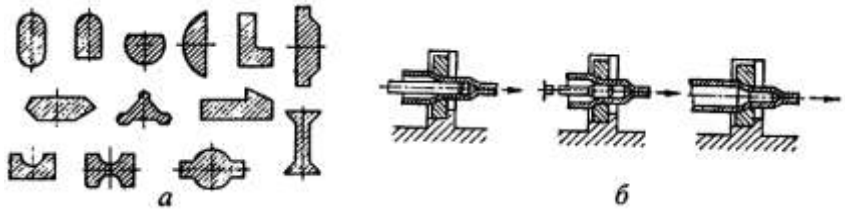



*Рис. 72. Разновидности сложных (а) и пустых (б) профилей, полученных волочением*

*Прессование* – процесс выдавливания металла из контейнера через одно или несколько отверстий в матрице с площадью меньшей, чем поперечное сечение исходной заготовки. Реализуется одна из самых благоприятных схем нагружения, обеспечивающая максимальную пластичность – всестороннее неравномерное сжатие, что позволяет обрабатывать даже малопластичные материалы.

Существуют два метода прессования – прямой и обратный (рис. 73).

При прямом прессовании требуется прикладывать значительно большее усилие, т.к. часть его затрачивается на преодоление трения при перемещении металла заготовки внутри матрицы. Пресс-остаток составляет до 30-40% от массы исходной заготовки. Усилие при обратном прессовании примерно на 25% меньше, пресс-остаток вдвое меньше.

Достоинства процесса:

– возможность получения профилей, в том числе и пустотелых, и из малопластичных сплавов:

– универсальность применяемого оборудования, с легким переходом на производство профилей различных конфигураций;

– высокая точность размеров и малая шероховатость поверхности;

Используются гидропрессы с усилием прессования 1000-5000 т.

Допускаемые вытяжки: для меди – 280, латуни – 700, алюминия – 1000.

Подготовка исходной заготовки: зачистка поверхности и удаление обнаруженных дефектов, прошивка отверстий при производстве полых профилей, нанесение технологической смазки на поверхность.

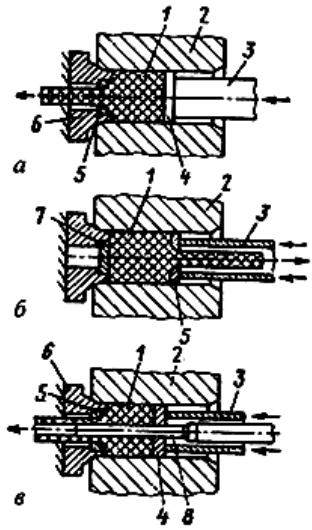



*Рис. 73. Схемы прессования прямого (а), обратного (б) и пустотелого (в) профилей на примере трубы: 1 – заготовка; 2 – контейнер; 3 – пуансон; 4 – пресс-шайба; 5 – матрица; 6 – матрица-держатель; 7 – заглушка; 8 – игла*

Смазка снижает усилие деформирования, уменьшает неравномерность течения металла при прессовании, увеличивает срок службы инструмента, повышает качество поверхности (графит с минеральным маслом, добавки канифоли, для стали, никеля, титана – стекло).

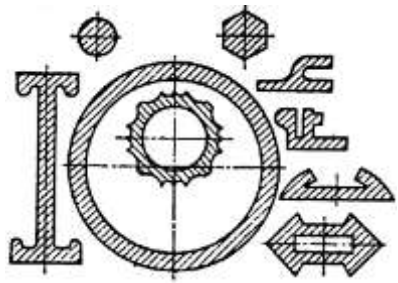


*Рис. 74. Примеры прессованных профилей*

*Ковка.* Вид обработки давлением, при котором исходную заготовку деформируют универсальным инструментом – бойками: течение металла в стороны перпендикулярно действующему усилию не ограничивается. Ковка предназначена для придания заготовке формы, приближающейся к форме готовой детали.

Основные операции ковки: осадка, протяжка, пробивка, прошивка, гибка, скручивание, отрубка, кузнечная сварка (рис. 75).

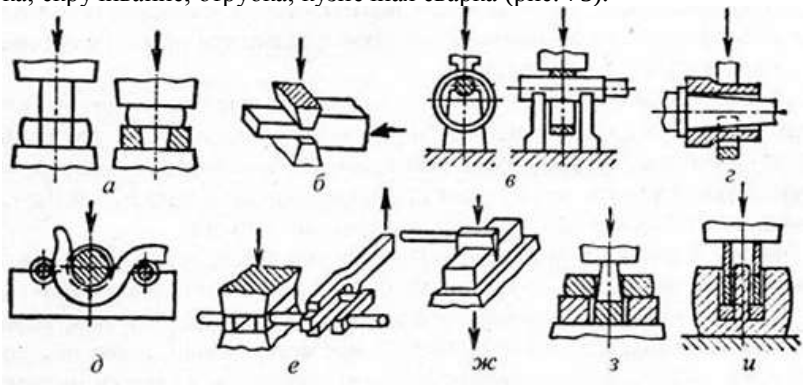



*Рис.75. Операции ковки:*
*а – осадка; б – протяжка; в – раскатка; г – протяжка на оправке; д – гибка; е – закручивание; ж – рубка; з – пробивка; и – прошивка*

Кузнечная сварка – образование неразъемного соединения под действием давления в нагретом состоянии.

*Горячая объемная штамповка.* Вид обработки металлов давлением, при котором формообразование поковки осуществляется пластическим деформированием заготовки в специальном инструменте – штампе. Полости в верхней и нижней частях штампа называют *ручьями штампа.*

Основные этапы техпроцесса горячей объемной штамповки:

– выбор плоскости разъема штампа;
– назначение припусков, допусков и напусков;
– определение штамповочных уклонов;
– определение радиусов закругления;
– конструирование штампов.

Исходный материал для горячей объемной штамповки – прокатанные или прессованные прутки круглого, квадратного или прямоугольного сече-

ния, периодический прокат.

Достоинства метода:

– высокая производительность – до сотен поковок в час;

– меньшие припуски и допуски, чем при ковке;

– меньшая квалификация штамповщика, чем кузнеца.

Ограничения:

– значительно большие усилия, чем при ковке;

– меньшая масса штамповок (до 100-200 кг).

Процесс штамповки выполняется в зависимости от вида поковки, рода материала и характера производства на различного вида установках: штамповка на молотах, прессах, горизонтально-ковочных машинах, ковочных вальцах, ротационно-обжимных машинах.

В зависимости от типа штампа ГОШ подразделяют на штамповку в открытых штампах, штамповку в закрытых штампах и в штампах для выдавливания.

*Штамповка в открытых штампах***.** Полость штампа в процессе деформирования незамкнута, весь излишек металла выдавливается в заусенец, и точность поковок не зависит от точности исходных заготовок. Все поковки являются точными отпечатками полости штампа, а объем заусенца имеет переменную величину. Это позволяет не предъявлять высоких требований к точности исходных заготовок по массе (рис. 76).

Фасонные заготовки часто получают в заготовительных ручьях многоручьевых штампов (рис. 77).

*Штамповка в закрытых штампах***.** Деформация заготовки осуществляется в закрытой полости штампа, и весь объем металла в полости штампа идет на формообразование поковки без вытекания металла в заусенец (рис. 78). Возможно штамповать малопластичные сплавы.

Преимущества:

– из-за отсутствия заусенца экономится металл;

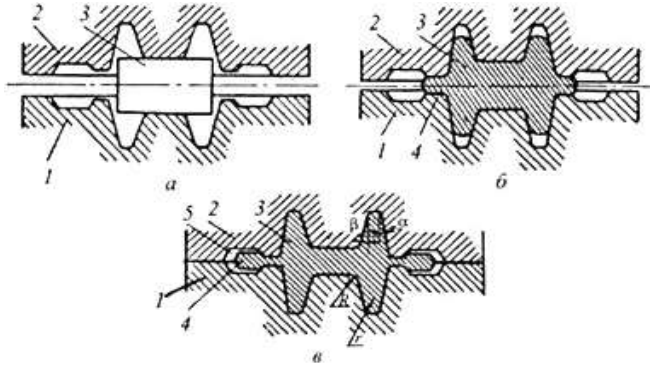



*Рис. 76. Штамповка в открытых штампах:*
*а – начальная стадия; б – стадия образования заусенца; в – конечная стадия штамповки; 1-2 – нижняя и верхняя половины штампа; 3 – исходная заготовка; 4 – заусенец; 5 – заусеничная канавка*

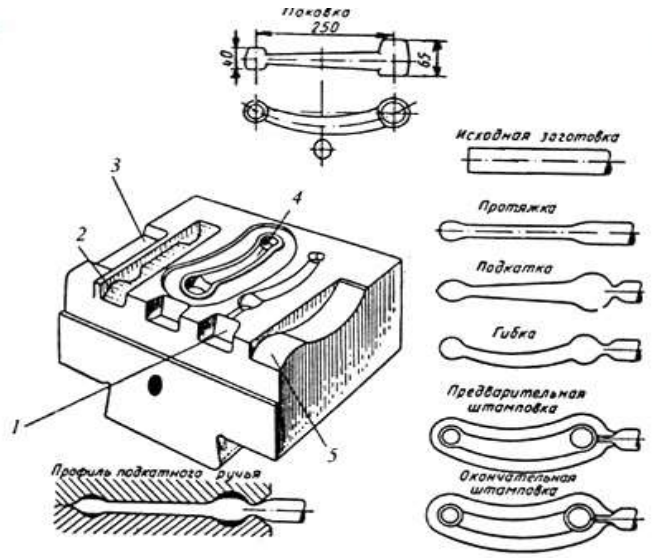



*Рис.77. Стадии получения сложной поковки в нескольких ручьях: 1 – предварительный ручей; 2 – подкатной ручей; 3 – протяжной ручей; 4 – окончательный ручей; 5 – гибочный ручей*

– ликвидируется потребность в прессах и штампах для обрезки заусенца;

– снижается трудоемкость и сокращается технологический процесс изготовления поковок;

– получение поковок более высокого качества, чем в открытых штампах, за счет рационального распределения волокон металла, плавно обтекающих контур поковки, и за счет более равномерной деформации металла.

Недостатки:

– требуются заготовки высокой точности;

– дополнительные затраты на калибровку и специальный инструмент для отрезки заготовок;

– срок службы штампов меньше, чем открытых, часть из них выходит из строя из-за поломок.

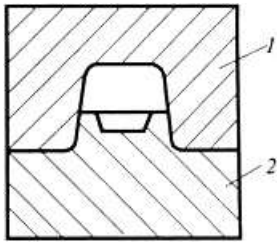



*Рис. 78. Штамповка в закрытых штампах: 1, 2 – верхняя и нижняя части штампа*

*Штамповка выдавливанием.* Позволяет изготовлять поковки из малопластичных высокопрочных сталей с наименьшими отходами металла.

Различают штамповку прямым выдавливанием и штамповку прошивкой (обратное выдавливание) (рис. 79). Комбинированное выдавливание характеризуется течением металла в прямом и обратном направлениях одновременно.

Производится на гидропрессах, кривошипных прессах и горизонтально-ковочных машинах (ГКМ). Штамповка в штампах с разъемными матрицами характеризуется наличием дополнительного разъема, что дает возможность получить за один переход поковки очень сложной формы,

невыполнимые при штамповке в цельной матрице. Штампы с разъемными матрицами выполняют как с вертикальной, так и с горизонтальной плоскостями разъема.

*Штамповка на ГКМ.* Механизм обеспечивает как рабочее движение пуансона, так и разъем матриц (рис. 80). В качестве заготовок используют круглый прокат либо трубы.

Продукция ГКМ – стержни с утолщением на концах типа клапанов, втулки, кольца и др.

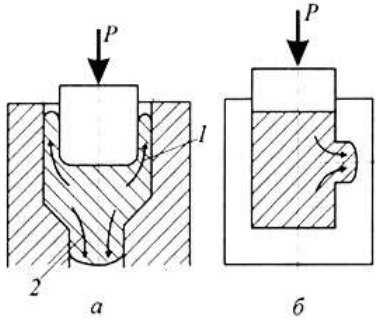



*Рис. 79. Штамповка выдавливанием: а – комбинированная (1 – обратное, 2 – прямое выдавливание); б – в разъёмных матрицах*

Штамп состоит из трех частей:

– неподвижной части матрицы, закрепленной в станине;

– подвижной части матрицы;

– пуансона.

Преимущества штамповки на ГКМ перед штамповкой в неразъемных матрицах:

– более высокая производительность;

– возможность получения поковок без заусенцев, с минимальными припусками на обработку;

– получение поковок типа колец, подшипников без отхода материала на отверстие, с улучшением структуры металла.

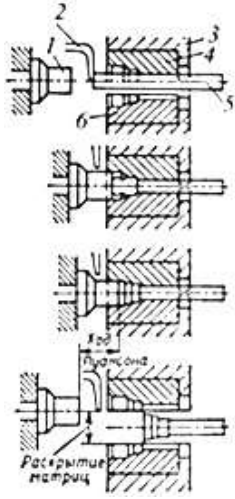



*Рис. 80. Схема штамповки на горизонтально-ковочных машинах: 1 – пуансон; 2 – упор; 3 – станина; 4 – неподвижная матрица; 5 – заготовка; 6 – подвижная матрица*

## Специализированные методы получения поковок

***Штамповка на ковочных вальцах.*** Это продольная прокатка нагретой заготовки между двумя валками, на которых закрепляются секторные штампы, имеющие соответствующие ручьи (рис. 81).

Преимущество: при вальцовке поверхность контакта заготовки с рабочими ручьями в каждый момент деформирования составляет малую часть полной поверхности заготовки. В результате требуется значительно меньшее усилие для деформации.

Процесс вальцовки производится за один проход, и может быть непрерывным при замкнутом расположении секторных штампов по всей окружности валков и при непрерывной подаче нагретой полосы. Ковочные вальцы просты по конструкции, бесшумны в работе, их можно использовать в механизированных поточных линиях.

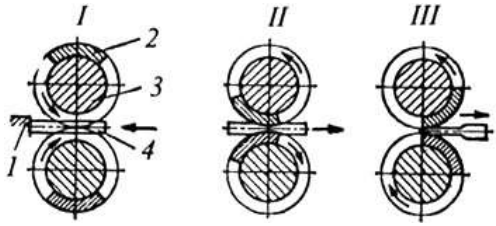



*Рис. 81. Штамповка на ковочных вальцах:*
*1 – заготовка; 2 – секторные штампы; 3 – валки; 4 – поковка*

*Высокоскоростная штамповка.* Деформация металла в штампе протекает в условиях приложения мощного импульса энергии в небольшой промежуток времени. Это создается применением в рабочем цилиндре газов или жидкости высокого давления и сокращения пути перемещения рабочих частей штампов до момента их соударения.

Пластичность металла увеличивается, что объясняется высокой скоростью деформации, и небольшими тепловыми потерями нагретой заготовки из-за относительно небольшого времени контакта ее с рабочей частью штампа.

***Изотермическая штамповка.*** Применяется для штамповки некоторых высоколегированных сталей и сплавов на основе цветных металлов (жаропрочные стали, титановые сплавы).

Горячее деформирование заготовки осуществляется в изотермических условиях, когда штампы и окружающее их рабочее пространство нагрето до температуры, близкой к температуре деформации сплава, ~ 900°С. Нагрев производится индукторами, встроенными в рабочее пространство пресса. Изотермическая штамповка значительно повышает пластичность деформируемого сплава и снижает сопротивление деформированию.

***Резка заготовок для поковок.*** Мерные заготовки отрезают от прутка: резкой на пресс-ножницах и кривошипных прессах, ломкой в хладноломах, резкой пилами и абразивами. Точность длины отрезаемой заготовки зависит от способа резки и колеблется от 0,2 до 8 мм.

***Отделочные операции после штамповки:***

– обрезка заусенцев и пробивка пленок;
– правка штампованных заготовок;
– термическая обработка поковок;
– очистка поковок от окалины;
– очистка травлением;
– калибровка поковок;
– объемная калибровка.

***Холодная объемная штамповка.*** Штамповка без предварительного нагрева заготовки. Обеспечивает достаточно высокую точность, малую шероховатость поверхности заготовок при небольших отходах металла, малую трудоемкость и себестоимость изготовления. Производительность холодной штамповки в 2-3 раза выше, чем горячей, и в 10-15 раз выше по сравнению с обработкой резанием. Большое значение имеет подготовка поверхности заго-

товок: удаление окалины, загрязнений и поверхностных дефектов, необходима смазка для снижения усилия штамповки, повышения стойкости инструмента, обеспечения качества поверхности, предотвращения образования трещин и других дефектов деталей. Часть необходим промежуточный отжиг для снятия наклепа, и проведение процесса за несколько технологических переходов.

Получают готовые детали или близкие к ним заготовки, требующие минимальной обработки резанием. КИМ достигает 95% вместо 30-40% при обработке резанием.

При холодном деформировании формируется благоприятно ориентированная волокнистая структура металла, что придает деталям высокую усталостную прочность при динамических нагрузках.

Основные разновидности холодной объемной штамповки - выдавливание, высадка и объемная формовка.

***Листовая штамповка.*** Включает методы получения деталей и изделий, для которых в качестве исходной заготовки используют листовой материал, трубные заготовки, катаные и гнутые профили. Осуществляют как в холодном, так и подогретом состоянии.

Получают крупногабаритные детали паровых и гидротурбин большой мощности, детали прессов, прокатных станов и др.

Достоинства способа:

– малая металлоемкость изделий;

– высокая точность штампуемых изделий;

– хорошее качество поверхности (исключение последующей обработки поверхности);

– высокая производительность;

– простота механизации и автоматизации процессов листовой штамповки;

– рентабельность в условиях как мелкосерийного, так и массового производства;

– малоотходность;

– возможность получения различных и оптимальных механических свойств в различных участках штамповок.

***Разделительные операции ЛШ.*** Получают детали, к которым не предъявляются высокие требования качества поверхности разделения (например, заготовки под последующую обработку).

Пластическая деформация при разделении заготовок сосредоточивается у кромок инструмента, который затем внедряется на некоторую глубину в металл, а далее пластическая деформация охватывает всю толщину заготовки в месте реза (рис. 82).

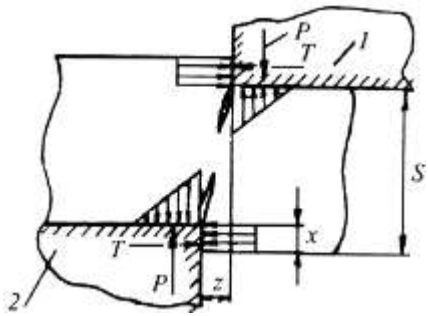



*Рис. 82. Схема разрушения металла при разделительной резке*

Виды разделительных операций:

– отрезка – разделение заготовки по незамкнутому контуру;

– вырубка – разделение заготовки по замкнутому контуру, при котором отделяемая часть является деталью;

– пробивка – разделение заготовки по замкнутому контуру, при котором отделяемая часть является отходом.

Конфигурация холодноштампованной детали или ее заготовки может быть изменена без какого-либо ущерба для конструктивного или эксплуатационного назначения таким образом, что измененная форма детали позволит значительно снизить расход материала (рис. 83).

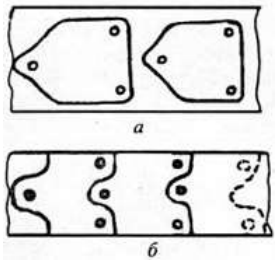



*Рис. 83. Примеры раскроя: а – нерационального; б – рационального*

**Формообразующие операции листовой штамповки**

Наиболее широко применяющиеся операции листовой штамповки - гибка и вытяжка (Рис.84).

*Гибка* – изменение направления оси заготовки. Определяя необходимый угол изгиба, следует учитывать угол пружинения – уменьшение угла изгиба после снятия деформирующей нагрузки вследствие упругой деформации.

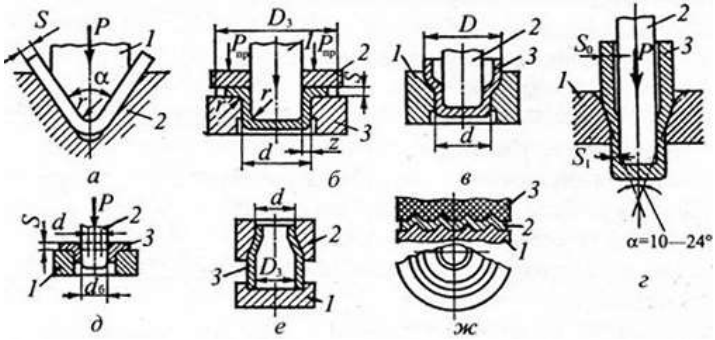



*Рис. 84. Формообразующие операции:*
*а – гибка; б – вытяжка; в – многопереходная вытяжка; г – вытяжка с утонением стенки; д – отбортовка; е – обжим; ж – формовка; 1 – матрица; 2 – пуансон; 3 – заготовка*

Получают изделия типа скоб, кронштейнов, заготовок для шовных труб и др.

*Вытяжка без утонения стенок* – превращение плоской заготовки в полое изделие или увеличение высоты полого полуфабриката путем протягивания через матрицу с уменьшение поперечных размеров заготовки без предварительного ее утонения.

Мера деформации при вытяжке - коэффициент вытяжки:

$$K_B = \frac{D_{заг}}{d_{изд}} \sim 1{,}6 - 2{,}2 .$$

Предельный (теоретический) коэффициент вытяжки для деталей типа кругового цилиндра с дном равен 2,7.

*Вытяжка с утонением стенок* – зазор между матрицей и пуансоном выбирается меньшим, чем толщина материала заготовки. Заготовкой является стакан, полученный обычной вытяжкой. Степень деформации 40-60%.

Вытяжкой получают как осесимметричные детали, так и детали коробчатой и более сложных форм, например, кузовные детали автомобилей.

*Отбортовка* – процесс получения горловины или просто бортов вокруг предварительно пробитых отверстий.

Коэффициент отбортовки (зависит от механических свойств металла):

$$K_o = \frac{d}{d_o} < 1{,}8 .$$

Применяют для изготовления кольцевых деталей с фланцами, для образования выступов под резьбу, для сварки с трубами.

*Обжим* – уменьшение периметра поперечного сечения концевой части полой заготовки – производится сужающей полостью матрицы насаживанием ее на гильзу.

*Раздача* – увеличение периметра поперечного сечения концевой части полой заготовки путем заталкивания в нее расширяющегося пуансона (операция, противоположная обжиму).

*Формовка* – используется для увеличения жесткости листов конструкции путем создания конструкционных выступов или впадин, ребер жесткости (локальная вытяжка). Изменение формы внутренней части изделия происходит за счет ее утонения.

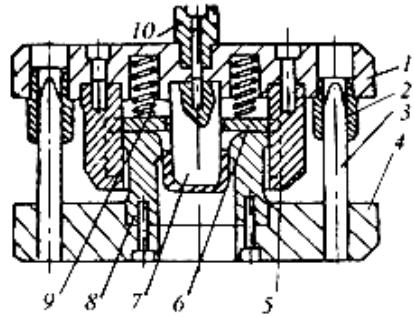


*Рис. 85. Штамп для вытяжки*

Способы листовой штамповки, используемые в единичном и мелкосерийном производствах:

*Штамповка эластичной средой* (рис. 86)*:*

а) вытяжка резиновым пуансоном;

б) вытяжка резиновой матрицей.

Заготовку укладывают на матрицу или на пуансон и прижим. Резина, опускаясь, прижимает заготовку к матрице или прижиму и вдавливает ее в матрицу или обтягивает по пуансону, формируя деталь.

*Штамповка взрывом* применяется для изготовления крупногабаритных деталей при толщине более 2 мм (рис. 87), основана на деформации листовой заготовки давлением ударной среды, образующейся при взрыве бризантных взрывчатых веществ.

Преимущества:

– высокая экономическая эффективность в результате резкого снижения капитальных затрат и сокращения сроков и стоимости подготовки производства;

– возможность штамповки деталей из высокопрочной стали.

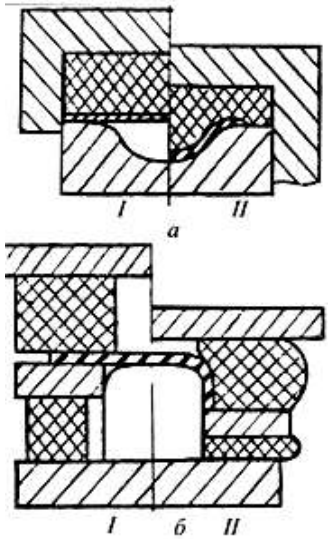



*Рис. 86. Штамповка эластичной средой: а – вытяжка резиновым пуансоном; б – вытяжка резиновой матрицей; I – начальная стадия процесса; II – конечная стадия процесса*

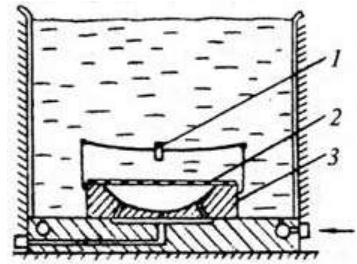



*Рис. 87. Схема штамповки взрывом: 1 – заряд; 2 – заготовка; 3 – матрица*

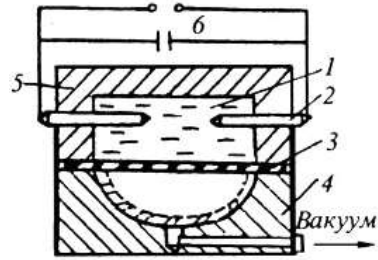



*Рис. 88. Схема электрогидравлической штамповки: 1 – камера; 2 – электроды; 3 – заготовка; 4 – матрица; 5 – контейнер; 6 – источник тока*

При больших габаритах деталей – штамповка в бассейнах с водой, небольших – штамповка в наземных установках и бронекамерах.

*Электрогидравлическая штамповка (ЭГШ).* Основа способа штамповки – электрогидравлический эффект образования ударных волн при мощных электрических разрядах в несжимаемых жидкостях (рис. 88).

*Магнитно-импульсная штамповка* – давление на деформируемую металлическую заготовку создается непосредственным воздействием импульсного магнитного поля, без участия промежуточных твердых, жидких или газообразных сил (рис. 89).

Возможно штамповать детали из полированных и лакированных заготовок без повреждения поверхности, а также деформировать заготовки, заключенные в герметическую пластмассовую оболочку.

Обработка основана на мгновенном разряде электроэнергии, накопленной в мощной конденсаторной батарее, через индуктор, являющийся рабочим органом.

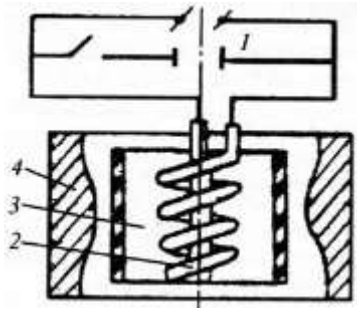



*Рис. 89. Магнитно-импульсная штамповка: 1 – источник тока; 2 – индуктор; 3 – заготовка; 4 – матрица*

В цепи индуктора протекает импульс тока, а в прилегающем пространстве возникает импульсное магнитное поле, которое индуцирует в металлической заготовке вихревые токи противоположного направления.

Обработка получила большое применение для вытяжки, пробивки отверстий, обжатия и раздачи труб, сборки трубчатых деталей с оправками и др.

*Давильные и давильно-раскатные работы.* Давильные или раскатные операции выполняются на специальных станках при вращательном движении заготовки или деформирующего инструмента (Рис.90).

Получают пустотелые детали выпуклой конфигурации весьма сложной формы.

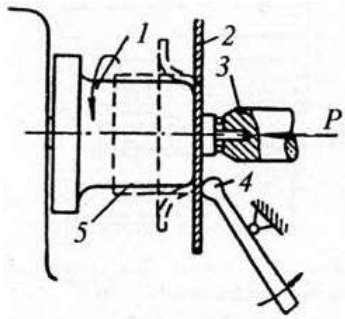



*Рис. 90. Схема давильных работ: 1 – оправка; 2 – заготовка; 3 – упор; 4 – давильный ролик; 5 – форма изделия*

*Лекция 6.*

## СВАРКА И ПАЙКА МЕТАЛЛОВ

В зависимости от основных признаков процесса, понятия сварки могут быть различными.

1. Сварка – процесс получения монолитного соединения, которое возникает в случае установления связей между атомами свариваемых деталей на границе их раздела, аналогично связям, действующим в твердом теле.

2. Сварка – процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между соединяемыми частями при их нагревании и (или) пластическом деформировании.

3. Сварка – процесс получения монолитного соединения за счет термодинамически необратимого превращения тепловой и механической энергии и вещества в стыке.

В зависимости от характера вводимой энергии все сварочные процессы (сварку, пайку, резку) можно отнести к термическим (Т), термомеханическим (ТМ) и механическим методам (М).

Признаки классификации процессов сварки (по ГОСТ 19521-74):

– форма вводимой энергии, наличие давления и вид инструмента – носителя энергии (табл.27);

– способ защиты металла в зоне сварки (сварка на воздухе, в вакууме, в защитном газе, под флюсом и др.);

– непрерывность сварки (непрерывные и прерывистые, т.е. импульсные процессы);

– степени механизации (ручная, механизированная, автоматическая);

– технологические (вид электрода или дуги, род сварочного тока, полярность, тип и качество электрических дуг).

Таблица 27. Классификация видов сварки

| | Класс | | |
|---|---|---|---|
| | термический | термомеханический | механический |
| Виды сварки | Дуговая | Контактная | Холодная |
| | Электрошлаковая | Диффузионная | Взрывом |
| | Электронно-лучевая | Индукционно-прессовая | Ультразвуковая |
| | Плазменная | Газопрессовая | Трением |
| | Ионно-лучевая | Дугопрессовая | Магнитно-импульсная |
| | Тлеющим разрядом | Шлакопрессовая | |
| | Световая | Термокомпрессионная | |
| | Индукционная | Печная | |
| | Газовая | | |
| | Термитная | | |
| | Литейная | | |

Преимущества методов сварки плавлением:

– возможность сварки в монтажных и цеховых условиях;

– разнообразие применяемых типов соединений;

– возможность сварки конструкций различных габаритов;

– широкий диапазон свариваемых марок металла;

– возможность изменения химического состава наплавленного металла;

– возможность сварки швов в любых пространственных положениях.

Недостатки:

– кристаллизация металла шва протекает при растягивающих напряжениях (образование трещин);

– необходима защита металла шва от воздействия атмосферы;

– возможно образование в наплавленном металле хрупких интерметаллических включений, ликвации примесей в шве;

– образование напряжений и деформации при сварке;

– изменение структуры основного металла под влиянием нагрева при сварке.

Преимущества сварки давлением (термомеханических и механических):

– значительное расширение диапазона свариваемых металлов;

– исключение в ряде случаев возникновения при сварке трещин, пористости;

– уменьшение деформаций сварных узлов.

Недостатки:

– ухудшается пластичность металла;

- ограничение применения в ряде конструкций.

### 1. Термические виды сварки

Источники теплоты: дуговые, плазменно-дуговые, электронно- и ионнолучевые, световые, индукционные, электрошлаковые и др.

*Электрическая дуга.* Сварочная дуга – это электрический разряд, длительно существующий между электродами, находящимися под напряжением. Одним из электродов может быть изделие (Рис.91).

Дуга прямого действия, дуга косвенного действия, трехфазная дуга.

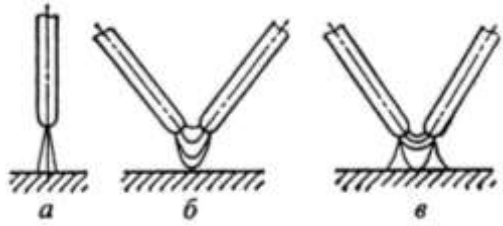



*Рис. 91. Виды дуг:*
*а – дуга прямого действия; б – дуга косвенного действия; в – трёхфазная дуга*

Электрический разряд сварочной дуги происходит в смеси газов и паров металла. Характеризуется высокой температурой газов, сильным свечением, большим током разряда, невысоким напряжением (падением напряжения на катоде *Uк*, аноде *Ua*, и в столбе дуги *Uст*.) (Рис.92):

$$Uд = Uк + Ua + Uст.$$

Температура столба дуги для разных методов сварки: 6000-15000 К.

Возбуждение дуги и ее устойчивое горение зависят от многих причин и обусловлены степенью ионизации дугового промежутка. Ионизация происходит под влиянием мощного потока электронов, который образуется в результате термоэлектронной и фотоэлектронной эмиссии.

Сопротивление дугового разряда непостоянно, так как зависит от количнства заряженных частиц, т.е. от степени ионизации, а последняя связана с силой сварочного тока. Поэтому вольт-амперная характеристика дуги нелинейна и имеет участок *I,* где напряжение падает по мере возрастания тока вследствие интенсивного увеличения числа заряженных частиц (рис. 93); *II* – участок пологовозрастающей характеристики; *III* – возрастающей. На участке *II* напряжение мало зависит от тока, так как число заряженных частиц возрастает по мере его увеличения незначительно и одновременно сокращаются размеры столба дуги. При сварке на высоких плотностях тока (участок *III)* столб дуги под влиянием электромагнитных сил сжимается, число заряженных частиц возрастать существенно не может, что приводит к практически постоянному значению электрического сопротивления столба дуги. На этом участке можно с высокой достоверностью считать действующим закон Ома $U_Д = IR$.

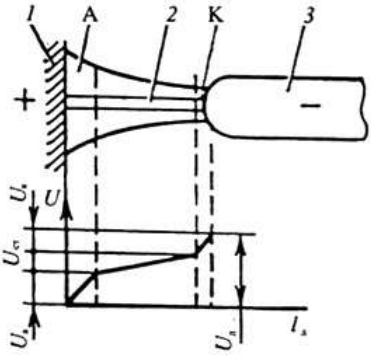



*Рис. 92. Зоны дугового разряда и характер падения в нем потенциала: А – анодная область; К – катодная область; 1 – деталь, 2 – столб дуги; 3 – электрод*

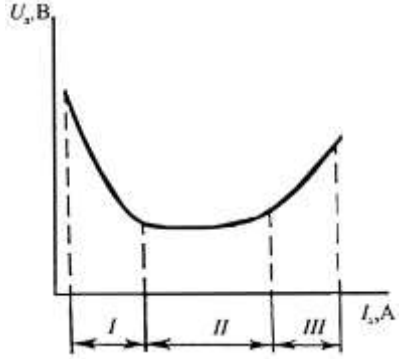



*Рис. 93. Вольт – амперная характеристика сварочной дуги: $U_д$ – напряжение дуги; $I_д$ – ток дуги*

Сварочная дуга может гореть между неплавящимся или плавящимся электродами и деталью. В качестве неплавящегося электрода применяется графит, чаще – вольфрам.

Ток дуги может быть постоянным или переменным.

Устойчивость горения дуги на постоянном токе выше, так как в случае переменного тока при переходе через нуль и перемене полярности в начале и конце каждого полупериода температура дугового промежутка уменьшается, что вызывает деионизацию газов.

Сварка дугой постоянного тока при подключении к изделию положительного полюса источника тока называется сваркой дугой прямой полярности, наоборот – обратной полярности. Для дуги прямой полярности характерно большее выделение теплоты на изделии, обратной – на электроде.

Электрические сварочные дуги могут быть непрерывными, прерывистыми и импульсными.

Импульсная сварочная дуга имеет преимущества:

– более совершенное управление процессом плавления проволоки;

– сокращение величины зоны термического влияния и размеров кристаллов в шве;

– снижение нижнего предела рабочих токов и повышение устойчивости горения дуги;

– улучшение условий для сварки в вертикальном и потолочном положениях.

Плазменно-лучевые или плазменно-дуговые источники нагрева для сварки – когда электрическая дуга функционирует в замкнутом канале – цилиндре: схемы свободно горящей, стабилизированной и сжатой (плазменной) дуги (Рис.94).

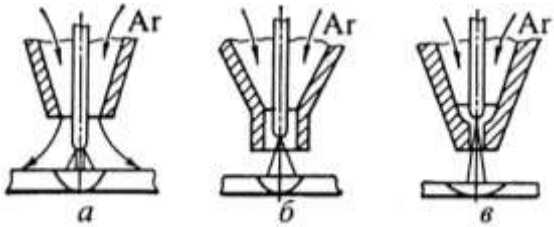



*Рис. 94. Схема свободного горящей (а), стабилизированной (б) и сжатой (в) дуги*

Напряжение плазменной дуги выше, чем свободно горящей, что позволяет, вследствие повышения мощности дуги, увеличить производительность сварки.

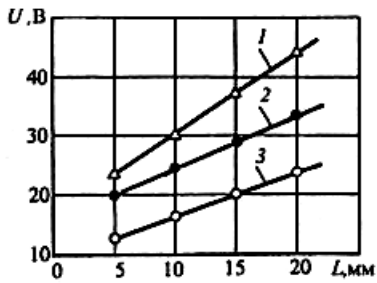



*Рис. 96. Зависимость напряжения дуги от её длины: 1 – сжатая дуга; 2 – стабилизированная дуга; 3 – свободно горящая дуга*

В зависимости от назначения, для питания электрических дуг применяют источники постоянного, переменного, импульсного тока. В качестве источников постоянного тока используют источники питания на базе выпрямителей и сварочных однофазных или трехфазных трансформаторов или, реже, мотор – генераторы, которые снабжаются двигателем внутреннего сгорания и могут применяться в полевых, монтажных условиях.

При сварке на переменном токе используют понижающие трансформаторы.

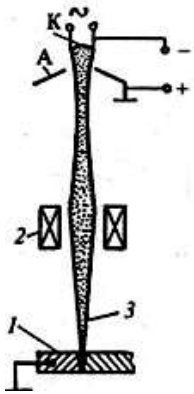
Процесс сварки может начинаться с касания электродом изделия (при ручной дуговой сварке) – с режима короткого замыкания, и поэтому источники питания обеспечивают ограничение силы тока короткого замыкания.

Обычно источники питания имеют напряжение 65-75 В, снижающееся после возбуждения дуги.

Инверторные источники, получившие широкое распространение в настоящее время, позволяют сваривать током высокой частоты, управлять в широких пределах его параметрами.

## 2. Электронный и ионно-лучевой нагрев

Заключается в бомбардировке металла потоком ускоренных электронов, кинетическая энергия которых при торможении в его поверхностном слое превращается в тепловую, КПД процесса достигает 0,85-0,9 (рис.96).




Ионная бомбардировка позволяет не только нагреть металл, но и при определенных условиях производить одновременно со сваркой физическую и химическую очистку его поверхности, изменять его свойства внедрением ионов в поверхностный слой свариваемой детали.

В качестве источника ионов применяют специальные плазмотроны или другие устройства, в которых ионизируется какой-либо элемент, например, инертный газ-гелий.

*Световые источники нагрева* – используют энергию лазеров, солнечную, искусственных источников света.

*Рис. 96. Схема электронно-лучевой установки: К – катод; А – анод; 1 – деталь; 2 – электромагнитная линза; 3 – пучок ускоренных электронов*

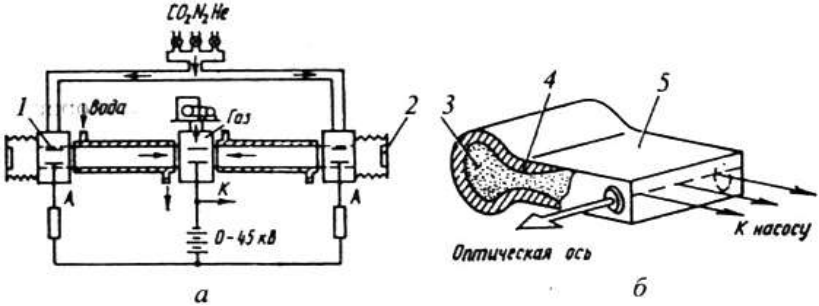



*Рис. 97. Схема газовых ($CO_2$) лазеров*

Излучение лазера, сфокусированное специальными оптическими устройствами, может выделять на поверхности металла большое количество теплоты (Рис.97). Особенность светового нагрева – отражение части энергии поверхностью металла.

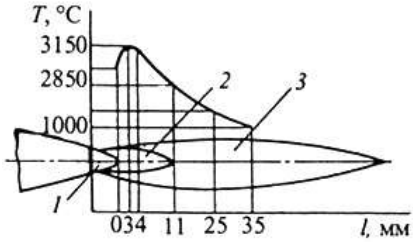



*Рис. 98. Строение пламени газовой горелки и распределение температур по ее длине: 1 – ядро; 2 – восстановительная зона; 3 – факел*

*Газовое пламя* образуется за счет сгорания в специальных горелках какого-либо горючего газа (ацетилена, кислорода). Пламя состоит из ядра, восстановительной зоны и факела (рис. 98). Температура ядра составляет ~ 300-600°С, температура восстановительной зоны максимальна и равна 3150°С.

В табл. 28 приведены данные по тепловой концентрации для ряда источников теплоты.

Таблица 28. Энергетические характеристики сварочных источников теплоты

| Виды сварки | Минимальная площадь пятна нагрева, $м^2$ | Максимальная плотность энергии, $Вт/м^2$ | Погонная энергия, Дж/м |
|---|---|---|---|
| Газовая сварка | $10^{-6}$ | $5\text{-}10^8$ | $52\cdot10^5$ |
| Ручная дуговая сварка | $10^{-7}$ | $10^{11}$ | $23\cdot10^5$ |
| Аргонодуговая плавящимся электродом | $10^{-7}$ | $10^{11}$ | $13\cdot10^5$ |
| Ионно-лучевая | $10^{-7}$-$10^{-8}$ | – | – |
| Микро плазменная | $10^{-10}$ | $10^{12}$ | $8\cdot10^5$ |
| Электронно-лучевая | $10^{-11}$ | $10^{13}$ | $1{,}5\cdot10^5$ |
| Лазерная | $10^{-12}$ | $10^{11}$ | $0{,}4\cdot10^5$ |

### 3. Ручная дуговая сварка

Выполняется неплавящимся и плавящимся электродами (рис. 99).

На электроды наносят специальные покрытия с целью:

– создания шлаковой и газовой защиты расплавленного металла сварочной ванны (шлак защищает и капли металла в процессе перехода их с электрода в шов, обволакивая их);

– раскисления наплавленного металла с помощью добавок в покрытие таких элементов, как Mn, Si, Ti, Al в виде ферросплавов или чистых элементов;

– легирования наплавленного металла, что позволяет изменять его химический состав, а также расширяет возможность получения требуемых свойств наплавленного металла;

– улучшения стабильности горения дуги посредством включения в покрытие элементов с малым потенциалом ионизации.

Применяется, главным образом, в изделиях, имеющих короткие и прерывистые швы, сложной конфигурации.

Преимущество:

– возможность производить сварку в любом пространственном положении, что особенно важно для сварки в монтажных условиях.

Недостатки:

– трудности сварки тонкого материала (менее 1-2- мм);

– длительный срок обучения сварщика высокой квалификации;

– большая зависимость качества сварки от способностей сварщика;

– малая производительность.

Можно сваривать стали, чугун, медь, медные сплавы.

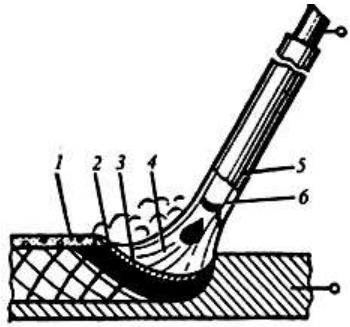



*Рис. 99. Схема дуговой электрической сварки металлическим электродом: 1 – затвердевший шлак; 2 – слой расплавленного шлака; 3 – сварочная ванна; 4 – дуга; 5 – электродное покрытие; 6 – металлический стержень*

Виды соединений (рис. 100):

– соединение стыковое без разделки кромок (для толщины до 3 мм);

– соединения стыковые с V-образной разделкой кромок (для 3-21 мм);

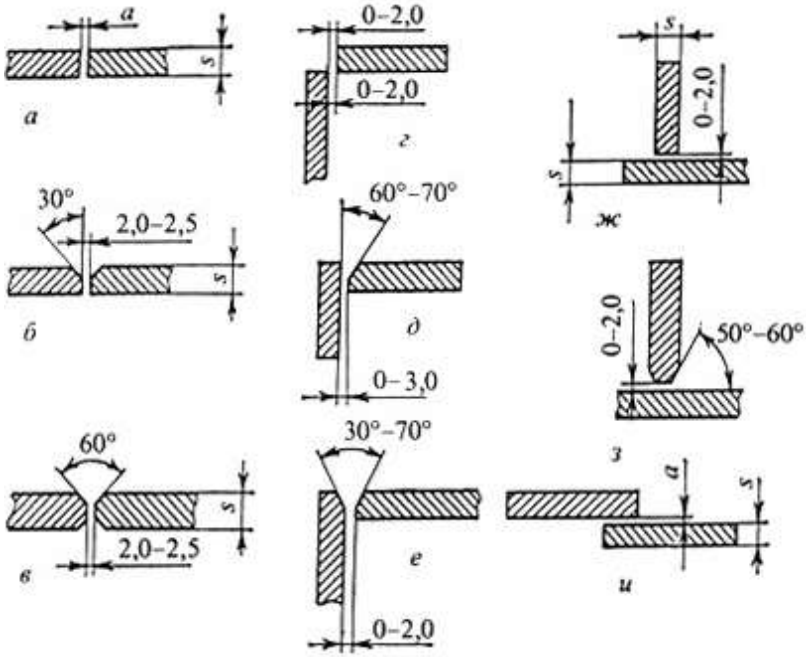



*Рис. 100. Рекомендуемые типы соединений для ручной дуговой сварки*

– стыковое соединение с Х-образной разделкой кромок (для толщины до 30 мм);

– угловые соединения (без разделки и с разделкой кромок);

– тавровые соединения (без разделки и с разделкой кромок);

– нахлесточное (2-6 мм): нерационально с точки зрения уменьшения расхода металла, и снижения массы конструкции.

### 4. Автоматическая дуговая сварка под флюсом

Дуга горит под слоем флюса между непокрытым металлическим электродом и деталью, расплавляя некоторое количество флюса, поступающего из бункера (рис. 101). Подача электрода по мере его оплавления и перемещения вдоль шва полностью механизированы, что улучшает стабильность качества сварки и условия труда.

Преимущества метода:

– хорошая и сравнительно дешевая защита расплавленного металла от воздействия атмосферного воздуха;

– увеличенная в 5-25 раз производительность в сравнении с ручной сваркой;

– лучшее качество сварного соединения из-за более надежной защиты расплавленного металла, однородности металла по химическому составу, отсутствия перерывов в процессе сварки для смены электрода;

– более низкий расход электродного металла вследствие уменьшения доли электродного металла в образовании шва (с 70 до 30%), снижение потерь на угар, разбрызгивание и огарки;

– улучшение условий труда (отпадает необходимость защиты глаз от светового излучения, уменьшается количество вредных газов, выделяемых в процессе сварки);

– сокращение производственных площадей;

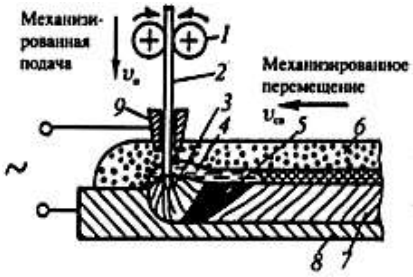



*Рис. 101. Схема сварки под флюсом: 1 – механизм подачи электродной проволоки; 2 – электродная проволока; 3 – электрическая дута; 4 – жидкий шлак; 5 – расплавленный металл; 6 – флюс; 7 – шов; 8 – основной металл; 9 – токоведущая втулка; $v_п$ и $v_{св}$ – соответственно скорость подачи проволоки и скорость сварки*

– сокращение времени на обучение сварщика.

Недостатки метода:

– повышенные требования к чистоте свариваемых кромок и сборке деталей;

– трудность сварки деталей толщиной 1-2 мм и менее, швов потолочных и вертикальных;

– невозможность визуального контроля за положением электрода;

– необходимость наличия подкладки (съемной или остающейся) при сварке с полным проплавлением для поддержания расплавленного металла.

Производят на автоматах, представляющих самоходную тележку – трактор, снабженную сварочной головкой, пультом управления или сварочные головки, устанавливаемые неподвижно (сварка производится за счет движения изделия).

*Полуавтоматическая сварка* – подача проволоки к месту сварки производится с помощью редуктора и электрического двигателя, а перемещение ее вдоль стыка – вручную. Флюс поступает из бункера сварочного пистолета. Применяется для сварки швов сложной конфигурации небольшой протяженности и в единичном производстве.

*Сварка порошковой проволокой* – автоматическая и полуавтоматическая (рис. 102). В ряде случаев сварка порошковой проволокой вытесняет ручную дуговую сварку качественным электродом и сварку под флюсом.

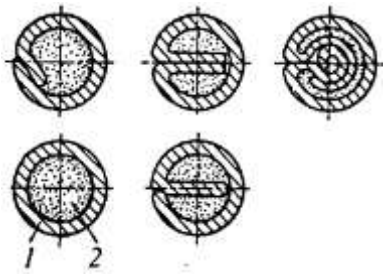



*Рис. 102. Разновидности порошковой проволоки: 1 – стальная оболочка; 2 – порошковый наполнитель*

## 5. Электрошлаковая сварка

Расплавление электродной проволоки и свариваемых кромок производится за счет теплоты расплавленного флюса, который нагревается при прохождении через него тока. Электрошлаковый процесс осуществляется благодаря джоулевой теплоте и является бездуговым (рис. 103).

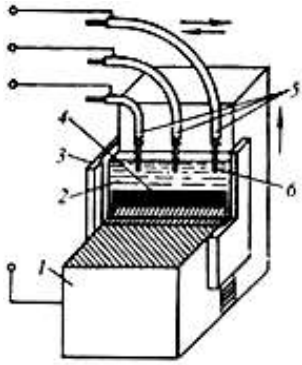



*Рис. 103. Схема процесса электрошлаковой сварки: 1 – свариваемая деталь; 2 – шлаковая ванна; 3 – медные охлаждающие накладки; 4 – сварочная ванна; 5 – мундштуки, подводящие ток; 6 – электроды*

Сварка выполняется вертикально снизу вверх. Зазор в стыке свариваемых деталей снизу ограничен технологической подкладкой, сбоку – водоохлаждаемыми медными накладками. При сварке используют один или несколько пластинчатых электродов из проволоки. Для равномерного заполнения стыка электродам иногда придают возвратно-поступательное движение вдоль плоскости стыка.

Соединяют детали толщиной более 40-50 мм, верхний предел толщин не ограничен.

Электрошлаковый процесс осуществляется благодаря джоулевой теплоте и является бездуговым.

Преимущества:

– значительное повышение производительности при сварке больших толщин;

– высокое качество сварного соединения вследствие надежной защиты жидким шлаком;

– малая пористость в наплавленном металле;

– стойкость сварного шва к образованию трещин;

– меньшая стоимость сварочных работ (в сравнении с автоматической сваркой под флюсом) из-за уменьшения в 15-20 раз расхода флюса и отсутствие необходимости в разделке кромок.

## 6. Дуговая сварка в защитных газах

Наибольшее распространение получила сварка в инертном газе аргоне и в углекислом газе. Вследствие высокой стоимости инертных газов их заменяют (если можно) углекислым газом или водородом, получаемым разложением дистиллированной воды электролизом. Сварка производится плавящимся и неплавящимся электродами.

Неплавящимся электродом выполняется ручная сварка, полуавтоматическая и автоматическая (рис. 104).

При сварке вольфрамовым электродом дуга горит очень устойчиво, можно сваривать небольшие (до 0,1 мм) толщины металла. Свыше 8-10 мм – применяют мощные трехфазные дуги.

Преимущества метода:

– аргонодуговая сварка металла позволяет сваривать заготовки с очень малой толщиной – до 0,1-0,2 мм, возможна сварка на весу с полным проплавлением стыковых соединений без применения поддерживающих прокладок;

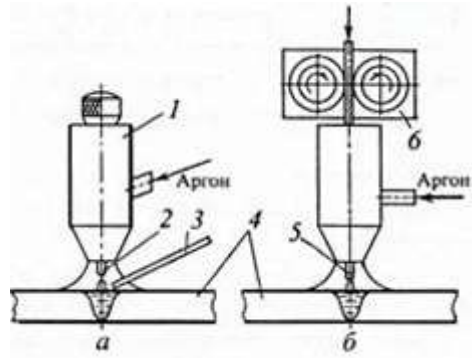



*Рис. 104. Схема сварки в инертном газе: а – неплавящимся электродом; б – плавящимся электродом; 1 – горелка, 2 – неплавящийся (вольфрамовый) электрод. 3 – присадочная проволока. 4 – свариваемая деталь; 5 – электродная проволока (плавящийся электрод); 6 – механизм подачи*

– сварка возможна в любых пространственных положениях;
– высококачественная защита расплавленного металла аргоном;
– сварка алюминиевых, магниевых и бериллиевых сплавов без флюса;
– возможность сварки практически всех металлов и сплавов.

Рекомендуемые типы сварных соединений для аргонодуговой сварки неплавящимся и плавящимся электродами (рис. 105):

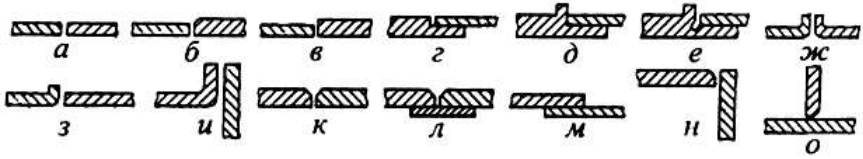



*Рис. 105. Виды соединения для аргонодуговой сварки: а, б, в. г, к, л, м. н, о – для сварки плавящимся и неплавящимся электродом; д, е. ж. з, и – для сварки неплавящимся электродом (е – вариант для алюминиевых и магниевых сплавов)*

*Сварка в контролируемой атмосфере* используется для сварки особо активных к кислороду металлов и сплавов, когда изделие или отдельные узлы помещают в специальные камеры, заполняемые аргоном, с предварительным вакуумированием камеры.

*Импульсная аргонодуговая сварка* – производится с изменением амплитуды тока, длительности импульсов и пауз между ними для обеспечения влияния на скорость кристаллизации сварочной ванны, ее размеры, структуру околошовной зоны, увеличение глубины проплавления, снижение потребляемого количества энергии. Повышается стабильность горения дуги, что позволяет значительно снизить нижний предел сварочного тока, соответствующий устойчивому горению дуги.

Применяется для сварки тонколистового материала. Производится и на переменном токе.

*Сварка погруженной дугой* используется для толстолистового материала. Можно производить сварку встык, без разделки кромок, за один проход сваривать стальные, алюминиевые или титановые детали толщиной до 10 мм.

Высокое качество сварного соединения при аргонодуговой сварке достигается в результате поперечных колебаний дуги при ее перемещении в

магнитном поле специальной катушки или колебаний электрода вместе со сварочной горелкой с помощью механического привода.

*Сварка в углекислом газе* может приводить к окислению металла и выгоранию легирующих элементов. При наличии достаточного количества раскислителей они будут не только связывать свободный кислород и переводить его в шлак, но и восстанавливать некоторые оксиды. Поэтому при сварке в углекислом газе применяют проволоки с повышенным содержанием кремния и марганца по сравнению с ручной дуговой сваркой.

Преимуществами данного способа сварки являются низкая стоимость углекислого газа и высокая производительность метода, чтопозволяет применять его в различных областях промышленности. Производится на постоянном токе обратной полярности и бывает автоматической и полуавтоматической.

### 7. Плазменная сварка

В горелку подаются плазмообразующий газ (аргон или смесь аргона с гелием, с углекислым газом и др.) и защитный газ (аргон). Первый обтекает вольфрамовый электрод и выходит через отверстие внутреннего сопла, второй подается во внешнее сопло и защищает сварочную ванну (рис. 106).

Микроплазменная сварка (ручная или автоматическая) сварка позволяет вести сварку деталей толщиной 0,1-0,5 мм.

Изготавливают детали типа сильфонов, тонкостенных трубопроводов, приборов из легированных сталей, алюминиевых, титановых сплавов. Источники питания для микроплазменной сварки позволяют вести процесс в обычном и импульсном режимах.

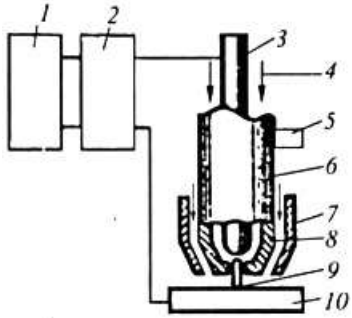



*Рис. 106. Схема сварки плазменной дугой: 1 – сварочный источник питания; 2 – высокочастотный генератор; 3 – вольфрамовый электрод; 4 – плазмообразуюший газ; 5 – охлаждающая вода; 6 – защитный газ; 7 – сопло защитного газа; 8 – сопло, формирующее дугу; 9 – дуга; 10 – изделие*

### 8. Электронно-лучевая сварка

Установка включает в себя герметичную камеру с системой откачивающих насосов. Достоинства метода сварки – узкий шов, незначительные деформации, малые размеры зоны термического влияния, хорошая защита металла от взаимодействия с газами, экономичность и возможность автоматизации.

Рациональные области применения:

– сварка изделий из тугоплавких активных металлов;

– сварка с минимальными деформациями и зоной термического влияния (ЗТВ);

– сварка в труднодоступных местах, узких щелях;

– соединение разнородных металлов;

– сварка деталей малых толщин;

– сварка в космосе.

Недостатки:

– необходимость использования вакуумных камер, ограничивающих размеры свариваемых деталей;

– наличие рентгеновского излучения;

– сложность и высокая стоимость оборудования.

## 9. Лазерная сварка

Обеспечивается высококонцентрированный нагрев с плотностью мощности излучения до $10^{11}$ Вт/м$^2$. Позволяет получать швы с минимальным расплавлением металла, снижает напряжения и деформации в сварных конструкциях по сравнению с другими способами сварки.

Возможна сварка через прозрачные среды, в труднодоступных местах и т.п.

Непрерывная лазерная сварка металлов значительных толщин производится газовыми лазерами, и обеспечивает значительно большие скорости сварки по сравнению с импульсной.

## 10. Газовая сварка

Производится за счет теплоты, выделяемой при сгорании горючего газа, чаще всего ацетилена, в кислороде. Для образования шва в сварочную ванну подают присадочную проволоку или сварку осуществляют по отбортовке, в результате плавления которой и формируется шов..

Регулируя количество ацетилена и кислорода, поступающих в горелку, можно получать нормальное, восстановительное и окислительное пламя, характер которого выбирают в зависимости от свариваемого материала. Мощность пламени регулируют сменй наконечников горелки, имеющих разные проходные сечения.

Газовая сварка сопровождается нагревом широкой зоны, большими деформациями металла, существенными изменениями его структуры. Производительность газовой сварки низкая, автоматизировать ее сложно.

Применяется для сварки, в основном, деталей малой толщины в монтажных условиях, при сварке стальных труб малого диаметра, а также в ремонтных работах. Можно сваривать стали, алюминиевые сплавы, медь и ее сплавы, чугун.

## 11. Термомеханические методы сварки

*Контактная сварка* включает несколько способов сварки: точечная, шовная, стыковая, рельефная.

*Точечная сварка.* При этой сварке детали собираются внахлестку и свариваются по отдельным ограниченным участкам касания, называемым точками. Детали плотно прижимаются между электродами сварочной машины, затем нагреваются кратковременным импульсом электрического тока (рис. 107).

Создание в центре ядра за счет давления электродов зоны сжимающих напряжений позволяет снизить вероятность образования трещин. Она еще более снизится в случае приложения ковочного усилия (резкого, в 2-3 раза увеличения давления на электродах на завершающей стадии сварки).

Последовательность включения и выключения сварочного тока и давления составляет цикл сварки (рис. 108).

Сила тока, давление, характер их изменения являются важнейшими параметрами режимов сварки.

Минимальное расстояние между сварочными точками для деталей из низколегированных сталей должно быть равно 3-4 диметрам точки, из хромоникелевых – на 15-20% меньше, алюминиевых – на 25-30% больше (из учета потерь на шунтирование).

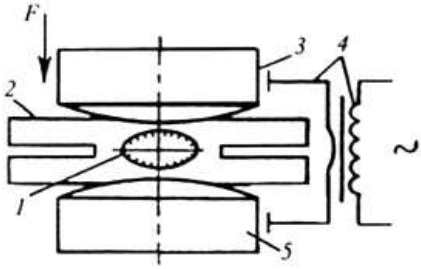



*Рис. 107. Схема точечной сварки: 1 – литое ядро; 2 – свариваемые детали; 3 – верхний электрод; 4 – трансформатор; 5 – нижний электрод*

Режим точечной сварки выбирают на основании отраслевых стандартов, инструкций и рекомендаций. На практике он корректируется в зависимости от влияния ряда факторов.

В условиях затрудненного доступа к свариваемым деталям с двух сторон применяется односторонняя точечная сварка (рис. 109).

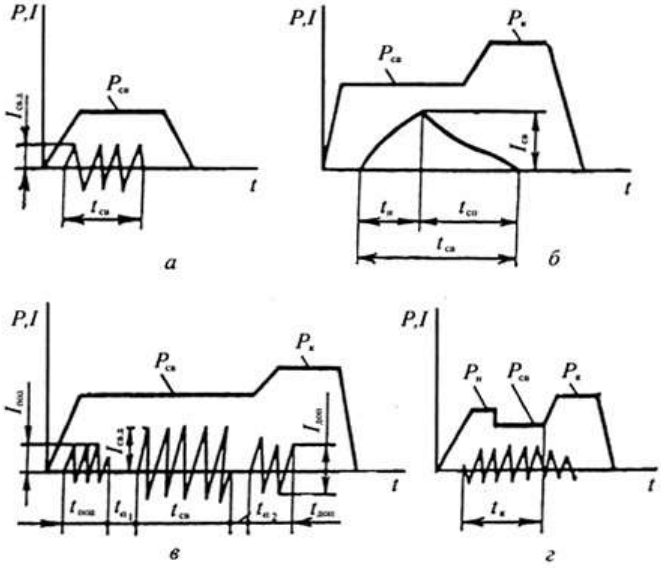



*Рис. 108. Циклограммы точечной сварки:*
*а – простейший цикл; б – с проковкой; в – трехимпульсный цикл; г – с увеличением давления в начальный период или уменьшением давления в момент протекания тока; $I_{св.д}$ – действующее значение тока; $I_{под}$ – ток импульсного подогрева, – ток дополнительного импульса; $I_{доп}$ – длительность нарастания импульса; $t_н$ – длительность импульса подогрева; $t_{под}$ – длительность спада импульса. $t_{п1}$ и $t_{п2}$ – длительность пауз; $P_{св}$ – длительность сварочного импульса; $P_н$ – начальное усилие. $P_к$ – ковочное усилие*

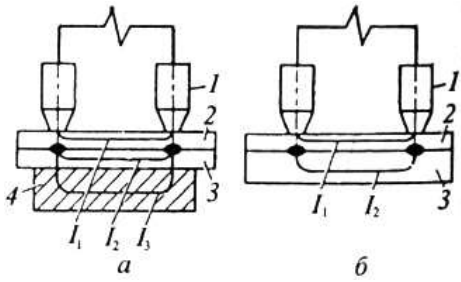



*Рис. 109. Схема односторонней точечной сварки при одинаковой (а) и разной (б) толщине деталей:*
*1 – сварочные электроды; 2 – верхняя деталь; 3 – нижняя деталь; 4 – медная прокладка; $I_1$ – ток шунтирования; $I_2$ – ток, проходящий через нижнюю деталь; $I_3$ – ток. проходящий через медную шину*

*Рельефная сварка* – разновидность контактной точечной сварки (происходит по предварительно подготовленным в металлических изделиях выступам). Применяется для деталей небольших размеров.

Точечная сварка широко применяется для сварки конструкций и узлов из сталей, титановых, алюминиевых и медных сплавов.

*Шовная сварка* обеспечивает соединение элементов внахлестку вращающимися дисковыми электродами в виде непрерывного или прерывистого шва (рис. 110). В зависимости от характера вращения роликов различают непрерывную и шаговую (прерывистую) шовную сварку.

Шовная сварка, как и точечная, из-за использования в изделиях нахлесточных соединений приводит к увеличению расхода металла и массы конструкций.

*Стыковая сварка* – контактная сварка, при которой соединение свариваемых деталей происходит по поверхности стыкуемых торцов. По характеру протекания процесса образования соединения стыковая сварка может быть сваркой сопротивлением или сваркой оплавлением. Сварка оплавлением подразделяется на сварку с прерывистыми и непрерывистым оплавлением (рис. 111).

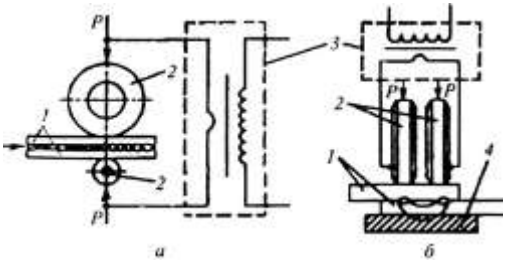



*Рис. 110. Схема шовной двусторонней (а) и односторонней (б) сварки: 1 – свариваемые детали; 2 – сварочные ролики; 3 – сварочный трансформатор. 4 – медная прокладка*

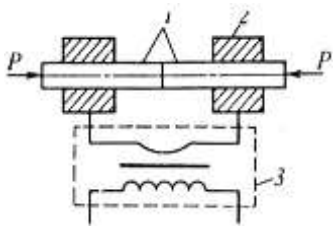



*Рис. 111. Схема стыковой сварки: 1 – детали; 2 – зажимные губки; 3– сварочный трансформатор*

Сварку оплавлением рекомендуют для соединения деталей с повышенной площадью поперечного сечения, сложной конфигурацией, а также для сплавов с высокой электро- и теплопроводностью, например, алюминиевых.

Применяется для изготовления деталей из сталей, алюминиевых, титановых, медных сплавов, тугоплавких металлов.

### Конденсаторная сварка

Является разновидностью контактной сварки и отличается от рассмотренных методов источником энергии. По виду свариваемых соединений она может быть точечной, шовной и стыковой (рис. 112).

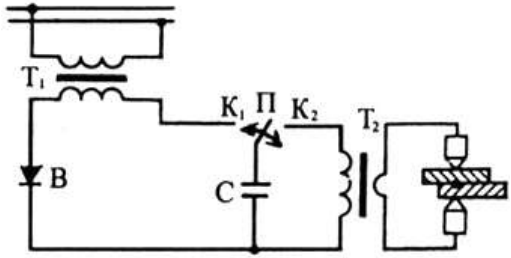



*Рис. 112. Принципиальная схема точечной конденсаторной сварки*

Время протекание тока измеряется сотыми и тысячными долями секунды. Преимущественно применяют для сварки деталей малых толщин.

### Диффузионная сварка

Происходит в твердом состоянии вследствие возникновения связей на атомарном уровне, появившихся в результате максимального сближения контактных поверхностей за счет локальной пластической деформации при повышенной температуре, обеспечивающей взаимную диффузию в приповерхностных слоях соединяемых материалов.

Свариваемые детали сдавливают с небольшим усилием и нагревают. Процесс сварки последовательно включает в себя возникновение и развитие физического контакта, активацию контактных поверхностей, взаимодействие атомов, в результате чего между ними устанавливаются связи, приводящие к образованию монолитного соединения.

Режимы диффузионной сварки: температура нагрева, удельное давление при сварке, время выдержки, степень вакуумирования.

Обычно температуру нагрева при диффузионной сварке выбирают в интервале (0,4-0,8) $T^0$ пл.

Максимальное давление $P$, с которым сдавливают детали, определяют, зная площадь соприкосновения деталей $Fn$, среднее значение предела текучести при температуре сварки деталей $\sigma_T$ :

$$P = \sigma_T \cdot Fn.$$

Преимущества диффузионной сварки:

– отсутствие плавления металла при сварке;
– незначительные изменения свойств основного металла;
– минимальные остаточные напряжения и деформации;
– большая точность изготовления узлов;
– малая вероятность образования трещин;
– возможность сварки разнородных металлов.

### Высокочастотная (индукционно-прессовая) сварка

Заключается в нагреве свариваемых кромок индуктором при частоте тока $f$ = =2,4-8,5 кГц. Нагретые кромки заготовки сжимаются с помощью роликов, которые и завершают процесс сварки.

*Радиочастотная сварка* – производится токами радиочастоты – $f$ от 70 до 450 кГц подводом энергии через скользящие контакты (рис. 113) .

Сварка высокопроизводительна, скорость достигает 0,25 м/с, ЗТВ мала и деформации незначительны.

Можно сваривать низко- и высокоуглеродистые, легированные стали, алюминий, медь, латунь, титан и цирконий. Применяют для изготовления труб диаметром от 10-12 до 1000-1200 мм как прямым, так и спиральным швом.

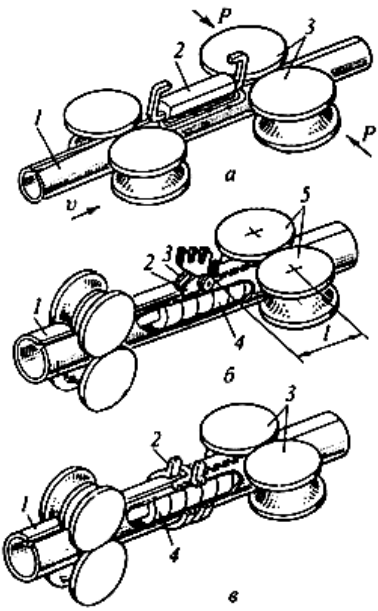



*Рис. 113. Схема сварки труб: а – индукционная; б, в – радиочастотная*

### Механические методы сварки

*Холодная сварка*

Сварка в твердой фазе со значительной объемной пластической деформацией и малой степенью ее локализации в зоне контакта соединяемых материалов.

Производится при комнатной температуре, для большинства материалов – ниже температуры кристаллизации.

В результате значительных пластических деформаций происходит разрушение оксидных пленок, препятствующих сближению атомов чистых поверхностей металла в месте контакта на расстояния, соизмеримые с параметрами кристаллической решетки, и их активация приводит к возникновению металлических связей и образованию сварного соединения (рис. 114).

Холодная сварка может быть:

– по форме получаемого соединения (точечная, шовная, стыковая);

– по характеру деформаций (сваркой сдавливанием, сваркой сдвигом).

Сварка с предварительным зажатием позволяет получать соединения более прочные, чем при сварке по обычной схеме.

При холодной сварке сдвигом наряду с нормальными усилиями, сдавливающими соединяемые детали, прикладываются дополнительные усилия, обеспечивающие относительное смещение свариваемых поверхностей.

Параметры режимов холодной сварки: удельное давление, величина вылета деталей из цанг (при стыковой сварке), диаметр пуансона, степень деформации.

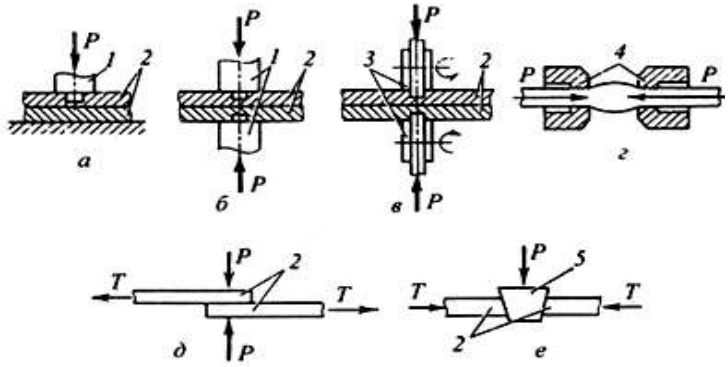



*Рис. 114. Схема холодной сварки:*
*а – точечная с одним пуансоном; б – точечная с двумя пуансонами; в – шовная; г – стыковая, д, е – сдвигом; 1 – пуансон. 2 – свариваемые детали; 3 – ролик; 4 – зажимные цанги; 5 – клин*

Успешно соединяются металлы с хорошими пластическими свойствами: алюминий, свинец, олово, медь, цинк, никель, титан и др.

Используется, главным образом, в приборостроении.

*Сварка взрывом*

Образование соединения происходит в результате соударения верхней (метаемой) пластины с нижней (рис. 115). Ударной волной взрыва осуществляется и необходимая для сварки очистка от загрязнений свариваемых поверхностей.

Удаление оксидов происходит под воздействием кумулятивной (направленной) воздушной струи, которая образуется при сближении с огромной скоростью свариваемых деталей. Скорость струи достигает 6000-7000 м/с, она оказывает большое давление на металл.

Обычно детали располагают друг относительно друга под углом α = 2-15°, с первоначальным зазором $h_o$ = 2-3- мм, либо без зазора.

За счет энергии взрыва сварка может происходить практически по неограниченной поверхности. Таким образом получают биметаллические материалы.

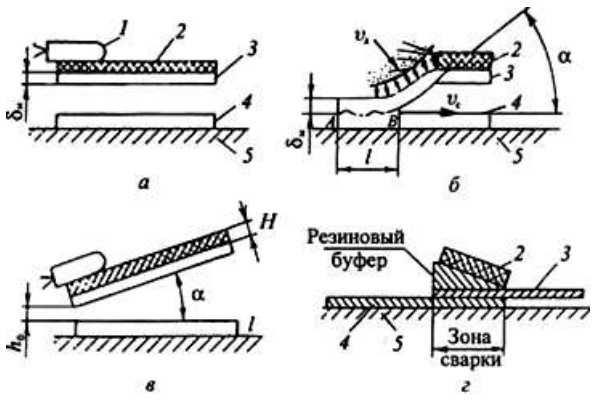



*Рис. 115. Схема сварки взрывом: а, в – исходное положение деталей, б – установившийся процесс сварки, г – сварка без начального зазора; 1 – детонатор; 2 – взрывчатое вещество; 3 – верхняя деталь; 4 – нижняя деталь; 5 – основание*

*Ультразвуковая сварка*

Соединение образуется под влиянием давления и ультразвуковых колебаний (рис. 116).

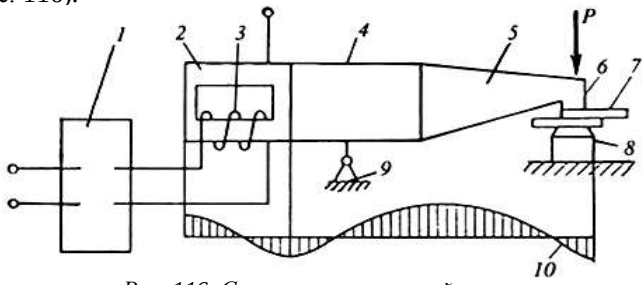



*Рис. 116. Схема ультразвуковой сварки*

Преобразователи ультразвуковых колебаний с помощью припоя или клея соединяются с волноводом 4.

К деталям, находящимся под давлением, через концентратор 5 подводятся продольные, сдвиговые колебания. Сварное соединение образуется в результате совместного воздействия давления и колебаний при сдвиге.

Рациональные области применения:

1. Сварка деталей малых толщин.
2. Сварка деталей разных толщин из разнородных металлов, которые не свариваются или трудно свариваются другими методами (и с неметаллами). Сваривают детали из пластмасс, биологические ткани.
3. Сварка деталей из термообработанных материалов.
4. Сварка без предварительной зачистки поверхности деталей, защищенных покрытиями.
5. Сварка ультразвуком более экономична по затратам электроэнергии.

Недостатки:

– толщина ограничена 1,5-2 мм;

– неустойчивость параметров режимов сварки (нестабильность прочности сварных соединений).

*Сварка трением*

Образование сварного соединения под влиянием давления и нагрева, при котором нагрев осуществляется трением, вызываемым вращением одной из свариваемых деталей (рис. 117).

Параметры режима сварки: частота вращения свариваемых деталей, величина осевого усилия проковки, длительность приложения усилия проковки, длительность нагрева.

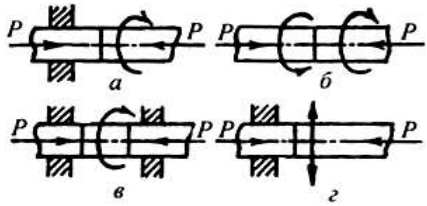



*Рис. 117. Принципиальная схема сварки трением: а – вращение одной детали; б – вращение обеих деталей; в – сварка неподвижных деталей с вращающейся вставкой; г – сварка при возвратно-поступательном движении одной из деталей*

Преимущества метода: возможность сварки трением деталей из самых разнообразных материалов, экономичность, высокая производительность и качество соединения.

*Магнитоимпульсная сварка*

Соединение образуется в результате соударения соединяемых частей, вызванного воздействием импульсного магнитного поля (рис. 118).

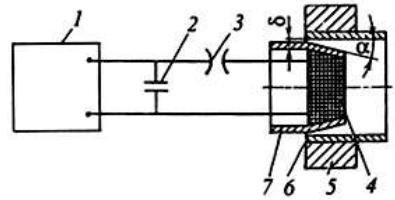


*Рис. 118. Схема магнитоимпульсной сварки*

Детали 7 и 6 устанавливают так, чтобы свариваемые поверхности находились внахлестку под углом друг к другу и с зазором между ними. Магнитная катушка 4 размещается внутри детали на поверхности, противоположной свариваемой.

Взаимодействие магнитных полей катушки и детали приводит к отталкиванию детали от катушки. В результате возникает сила, которая придает ускорение детали 7 в направлении детали 6. При их соударении достигается давление, необходимое для сварки.

Кратковременность действия импульса, динамический характер процесса – такие же, как при сварке взрывом.

Магнитоимпульсная сварка – высокопроизводительный процесс, обеспечивающий хорошее качество сварного соединения, в том числе герметичность, вибро- и термостойкость.

**Свариваемость металлов и сплавов**

Технологическое свойство материалов (металлов) или их сочетаний образовывать в процессе сварки соединения, отвечающие конструкционным и эксплуатационным требованием к ним. Поскольку свариваемость является сложным, комплексным свойством материалов, его невозможно определить каким-либо одним испытанием, одной методикой. Оценка свариваемости непосредственно связана с характеристикой материала, условиями его эксплуатации.

Критерии оценки свариваемости:

1. *Изменение химического состава и распределение элементов в сварном соединении.* Зависит от химической активности самого металла, состава, температуры, качества подготовки поверхности металла под сварку, диффузионных процессов в сварочной ванне.

2. *Влияние сварочного нагрева на структуру и механические свойства основного металла.* В сварном соединении различают 3 основные области: первая – металл нагрет до температуры выше линии солидуса; второе – металл нагрет до температур, достаточных для протекания фазовых превращений или процессов рекристаллизации; третья – с температурой ниже температуры протекания этих процессов (рис. 119).

Первая область образует собственно шов и зону сплавления; вторая – ЗТВ; третья – зона механического или термомеханического влияния. В конструкциях часто необходимо определять прочность сварных соединений при

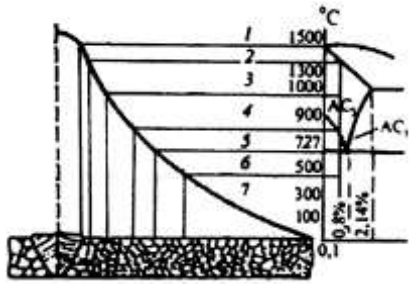



*Рис. 119. Схема структур в околошовной зоне при сварке сталей:*
*1 – зона наплавленного металла; 2 – зона неполного расплавления; 3 – зона перегрева, 4 – зона нормализации; 5 – зона неполной перекристаллизации; 6 – зона рекристаллизации и высокого отпуска; 7 – зона низкотемпературного отпуска*

переменных нагрузках, стойкость к хрупкому разрушению, зависящую от остаточных сварочных напряжений и состояния околошовной зоны. Сопротивляемость хрупкому разрушению оценивается по величине работы динамического разрушения специальных образцов, в которых формируют предварительно усталостные трещины или делают разного типа надрезы, представляющие собой концентраторы напряжений.

3. *Деформации, напряжения и перемещения.* Они относятся к сопутствующим сварочным процессам, оказывающим отрицательное воздействие на конструкцию в процессе ее изготовления и в последующем, снижая ее эксплуатационные характеристики, ухудшая качество (рис. 120). Изменения формы и размеров изделия, вызванные сваркой, затрудняют сам процесс сварки, последующую сборку, ухудшают эксплуатационные характеристики изделия, его внешний вид.

Температурные деформации определяются физической характеристикой материала – коэффициентом его температурного удлинения α температурой нагрева *T*:

$$\varepsilon_\alpha = \alpha \cdot T,$$

где α – коэффициент температурного удлинения; Т – температура нагрева.

Наблюдаемые деформации – линейные $\varepsilon_н$ и угловые $\upsilon_н$ – влияют на изменение размеров сварного изделия.

Собственные (внутренние) деформации существуют и без наличия внешних сил, они представляют собой упругие и пластические деформации.

Собственные напряжения, в зависимости от характера сил, явившихся причиной образования напряжений, классифицируются следующим образом:

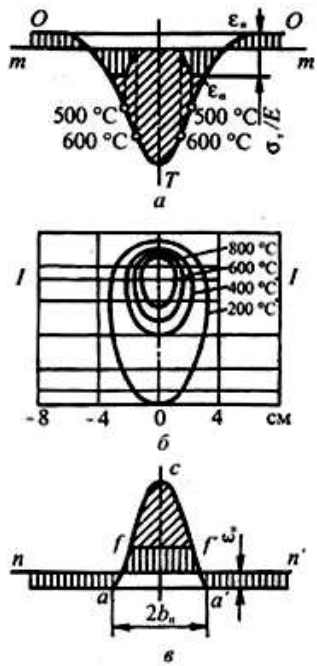



*Рис. 120. Образование остаточных напряжений и деформаций при неравномерном нагреве: а – распределение температур и деформаций в сечении 1-1; б – температурное поле в пластине при сварке, в – эпюра остаточных напряжений в пластине*

1) вызванные механическим упругим или пластическим деформированием при сборке, монтаже и правке;

2) вызванные упругими и пластическими деформациями вследствие неравномерного нагрева деталей;

3) возникшие в результате структурных и фазовых превращений вследствие неравномерного изменения объема тел.

*Перемещения* элементов сварных конструкций – прогибы, углы поворота, укорочения и т.п., являются следствием деформаций.

Конструктивные мероприятия, направленные на уменьшение деформаций и напряжений:

– выбор рационального метода сварки;

– уменьшение катета сварного шва, в том числе за счет применения материалов с повышенными механическими свойствами;

– уменьшение в конструкциях числа сварных швов, в том числе за счет рациональных профилей;

– сохранение числа или полное исключение различного рода концентраторов напряжений.

Технологические меры, уменьшающие деформации и напряжения:

1. Предварительный и сопутствующий подогрев при сварке;
2. Термообработка (отпуск) после сварки.
3. Усиленный отвод теплоты от шва, что рекомендуется при сварке тонкостенных полотнищ, обшивок и т.п.
4. Пластическое обжатие металла шва и прилежащей к нему зоны.

### *Борьба с перемещениями*

Конструктивные меры:

– рациональный выбор метода сварки, уменьшение катета шва, числа швов;

– проектирование таких сварных элементов, в которых влияние отдельных сварных швов взаимно уравновешено;

– установка ребер жесткости для предупреждения потери устойчивости;

– применение двусторонней сварки вместо односторонней.

Технологические меры:

– сварка в жестких приспособлениях, препятствующих свободному развитию деформаций;

– увеличение жесткости конструкции с помощью «прихваток» - коротких швов (длиной 5-25 мм), располагающихся друг от друга, в зависимости от толщины свариваемых деталей, на на расстоянии 50-300 мм;

– рациональная последовательность наложения швов, сборки и сварки узлов в единую конструкцию;

– использование предварительного растяжения элементов конструкции и обратного прогиба.

### *Трещины при сварке*

Склонность к образованию трещин – один из основных показателей свариваемости, что обусловливает технологическую прочность – способность материалов выдерживать без разрушения различного рода воздействия в процессе их технологической обработки.

Разрушения при сварке происходят в процессе кристаллизации (горячие трещины), в процессе фазовых и структурных превращений в твердом состоянии – холодные и другие виды трещин. В общем случае образование горячих трещин заключается в следующем: при остывании расплавленного металла при температуре ликвидуса в шве появляются кристаллы, разделенные между собой жидкими прослойками. В дальнейшем при увеличении числа кристаллов они могут образовывать своеобразный каркас, в котором циркуляция жидкости между кристаллами затруднена. Это приводит к снижению деформационной способности системы и ее хрупкому разрушению. Температурный интервал, при котором сплав имеет низкую деформационную способность и повышенную склонность к горячим трещинам, называется *температурным интервалом хрупкости* (рис. 121).

*Рис. 121. Характер изменения прочности и внутренних напряжений в шве от температуры*

Для повышения технологической прочности в процессе кристаллизации используются меры технологического характера – применение оптимальных сварочных материалов, режимов и условий сварки; конструктивного характера – направленные на снижение величины деформаций и напряжений в процессе сварки или замедление их роста.

Влияние на скорость роста напряжений можно снизить в результате местного или общего подогрева изделия до сварки.

*Пористость при сварке* зависит от концентрации газа в сварочной ванне, растворимости его в твердом или жидком металле при температуре кристаллизации, скорости кристаллизации металла шва, коэффициента диффузии в твердом и жидком металлах.

Исключения образования пористости в шве возможно за счет улучшения исходной чистоты металла, его защиты при варке, тщательной зачистке поверхности деталей и проволоки перед сваркой, применения сварочных материалов с соответствующим составом раскислителей, правильного выбора метода сварки и марки материала.

### Характеристика свариваемости металлов и сплавов

Характерные особенности свариваемости можно привести для отдельных групп однотипных по свариваемости сплавов.

*Углеродистые стали* – содержат примеси: марганец, кремний, сера, фосфор, кислород, азот, водород (Mn и Si – полезные), остальные – ухудшают свариваемость.

*Низкоуглеродистые стали* – обладают хорошей свариваемостью. Исключение – сварка деталей больших толщин при пониженных температурах (Ст3, стали 10, 15, 20 и др.).

*Среднеуглеродистые стали* – увеличение содержания углерода способствует появлению закалочных структур, усилению ликвации серы в шве и обогащению ею межкристаллических прослоек, что ведет к образованию

горячих трещин (стали с ограниченной свариваемостью).

*Высокоуглеродистые стали* имеют ограниченную свариваемость. Склонны как к закалке, так и к перегреву металла. Необходимы подогрев при сварке и последующая термообработка.

Уменьшение склонности к образованию горячих трещин добиваются снижением содержания углерода в наплавленном металле вследствие применения сварочной проволоки с меньшим содержанием углерода по сравнению с основным металлом. Одновременно шов легируют марганцем и кремнием, которые обеспечивают сохранение необходимых механических свойств металла и шва.

Для сварки углеродистых сталей рекомендуется ручная дуговая сварка покрытыми электродами, сварка самозащитной порошковой проволокой, под флюсом, сварка в атмосфере защитных газов (аргона, аргона с добавлением кислорода или углекислого газа), электрошлаковая, газовая или контактная сварка.

*Низколегированные стали* – стали с содержанием одного легирующего элемента, не превышающего 2%, при суммарном содержании всех легирующих элементов менее 2,5-5%. В низколегированных сталях, применяемых в сварных конструкциях, количество углерода ограничивают 0,23%, чем достигается хорошая или удовлетворительная свариваемость сталей. Влияние легирующих элементов учитывается, в том числе, определением эквивалентного содержание углерода на основании эмпирических зависимостей:

$$C_э = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{V}{5} + \frac{M_o}{4} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2}.$$

При $C_э$ > 0,45 сварка сопровождается образование трещин, поэтому необходимо принимать меры, предупреждающие их возникновение, в том числе снижением содержания углерода в шве (<0,15%).

Стали низколегированные по сравнения с углеродистыми более чувствительны и сварочному нагреву, склонны к образованию закалочных структур, перегреву, разупрочнению. Рекомендуется предварительный подогрев и последующая термическая обработка, в том числе высокотемпературный отпуск.

Рекомендуется сварка в защитных газах (сварка в углекислом газе, аргоне, с добавкой $CO_2$).

*Среднелегированные стали* – содержание одного легирующего элемента в этих сталях не превышает 2-5%, а суммарное содержание всех элементов – 5-10%. Перлитный класс – 25ХГСА, 30ХГСА, 35ХГСА и др. Мартенситный класс – 30ХГ2Н2СВМА, 30Х2НМФА. В целом стали имеют ограниченную свариваемость.

Методы сварки – сварка в углекислом газе, аргоне, сварка под флюсом, ручная сварка покрытыми электродами, электрошлаковая, электронно-лучевая, плазменная.

*Высоколегированные стали* – стали с суммарным содержанием легирующих элементов более 10%. Могут быть ферритного, аустенитного и мартенситного классов, и переходных классов: аустентно-ферритного, аустенитно-мартенситного, мартенситно-ферритного. По основному легирующему элементу – принято делить на высокохромистые, хромоникелевые, хромоникельмарганцевые и др.

При сварке приходится учитывать более высокую теплопроводность этих сталей, что ускоряет теплоотвод от шва, способствует увеличению скорости охлаждения и, следовательно, может привести к образованию холодных трещин. Также этому способствует мартенситный распад при пониженных температурах, что исключает процесс самоотпуска, делает сварное соединение малопластичным. Для сварки сталей мартенситного класса рекомендуется электронно-лучевая сварка, лазерная и контактная сварка.

*Хромоникелевые стали* – коррозионностойкие жаропрочные стали с высоким содержанием хрома и никеля (стали 08Х18Н10, 12Х18Н10Т, 08Х18Н12, 20Х13Н18). При сварке могут образовываться горячие трещины, поэтому для улучшения свариваемости сталей типа Х18Н9 в шов добавляют легирующие добавки для измельчения зерен или создания в шве двухфазной аустенитно-ферритной структуры. Сваривают практически всеми методами (особенно успешно контактной сваркой). Режимы подбираются таким образом, чтобы сварка происходила при малых значениях погонной энергии.

*Алюминиевые и магниевые сплавы* – делятся на деформируемые и литейные, упрочняемые и не упрочняемые термообработкой. Свариваемые – АД, АД1, АМц, АМг3, АМг5В, АВ и др. Магниевые – МА1, МА2, МА2-1, МА8, МА13, Ма11.

Наиболее широко применяется сварка сплавов алюминия и магния в инертных газах (аргон, гелий) вольфрамовым или плавящимся электродом. Оксидная пленка при сварке разрушается под воздействием электрической дуги.

Алюминиевые и магниевые сплавы сваривают прежде всего аргонодуговой сваркой, в ряде случаев – электронно-лучевой сваркой, ультразвуком, взрывом и трением, особенно при соединении деталей из этих сплавов с другими металлами.

*Титановые сплавы.* При сварке существует вероятность образования холодных трещин из-за наличия в металле водорода, образующего хрупкие нестабильные гидриды, и появления метастабильной ω-фазы, вызывающей изменение объема металла и образование внутренних напряжений. Распространенными методами сварки титановых сплавов являются аргонодуговая, электронно-лучевая, плазменная, автоматическая под слоем специальных бескислородных флюсов, электрошлаковая, контактная и термодиффузионная сварка в вакууме.

*Химически активные тугоплавкие металлы* – вольфрам, молибден, цирконий, тантал, ниобий. Особенности сварки этих металлов обусловлены следующим: высокой температурой плавления, высокой химической активностью по отношению к кислороду и азоту, чувствительностью к нагреву, который снижает механические войства вследствие собирательной рекристаллизации.

Наиболее рациональными способами их сварки являются электронно-лучевая, термодиффузионная в вакууме, плазменная и дуговая в камерах с атмосферой аргона или гелия. Для малых толщин применимы лазерная сварка, контактная и сварка трением.

*Разнородные металлы.* Сварка при преимущественном расплавлении одного из них и ограничением доли участия второго металла в наплавленном металле (сварка в твердожидком состоянии), применение промежуточных металлов, использование биметаллических вставок.

Возможна сварка давлением (термодиффузионная сварка в вакууме), холодная сварка, сварка ультразвуком, трением и взрывом, электронно-лучевая, лазерная.

*Лекция 7*

# КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ МЕХАНИЗМЫ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ (МРС)

## 1. Классификация и кинематические схемы станков

### 1.1. Приводы и передачи МРС

Деление станков на типы проводят по следующим основным признакам:

– виду обработки и применяемому инструменту;

– технологическим особенностям станка;

– степени автоматизации станка;

– числу важнейших рабочих органов станка (или инструмента) и их расположению.

Трехзначный или четырехзначный шифр станка (часто с добавлением буквы, обозначающей дополнительную характеристику станка): первая цифра – группа; вторая – тип; третья (при четырехцифровом обозначении – третья и четвертая) типоразмер станка. Прописные буквы после первой цифры указывает на модернизацию станка.

В зависимости от степени специализации МРС разделяются на универсальные, специализированные и специальные. Степень точности станков бывает нормальной Н, повышенной П, высокой В и особо высокой А и С.

По массе и габаритам станки бывают легкие (до 1 т), средние (до 10 т) и тяжелые (> 10 т), уникальные (> 100).

Металлорежущие станками называют технологические машины, предназначенные для обработки материалов резанием. Они должны обеспечивать заданные производительность, точность и качество обработанных поверхностей.

В экономически оправданных случаях МРС используют для реализации технологических методов, отличных от обработки резанием (например, поверхностное пластическое деформирование).

Согласно системе классификации ЭНИМСа все станки делятся на технологические группы в зависимости от характера выполняемых работ.

Первая группа объединяет токарные станки, для которых общим технологическим методом является точение.

Вторая группа – состоит из сверлильных и расточных станков (предназначенных для обработки отверстий).

Третья – включает шлифовальные, полировальные, доводочные и заточные станки, на которых выполняется абразивная обработка.

Четвертая – комбинированные станки и станки, в которых для удаления материала с заготовки используется электрический ток.

Пятая – зубо- и резьбообрабатывающие станки, на которых осуществляется обработка эвольвентных и винтовых поверхностей.

Шестая – фрезерные станки – для обработки плоскостей, уступов, пазов и фасонных поверхностей.

Седьмая – включает строгальные, долбежные и протяжные станки.

Восьмая – разрезные станки – для разрезки заготовки различными инструментами.

Девятая – станки различного назначения, не вошедшие в предыдущие группы.

## 1.2. Кинематика станков. Принципы построения

Каждому исполнительному движению в станке соответствует своя ***кинематическая цепь***, т.е. ряд элементов, по которым передается движение от источника к исполнительному органу (шпинделю, суппорту, столу, ползуну и т.п.).

Для изменения параметров движения (скорости, направления, траектории) исполнительных органов в кинематические цепи вводят органы настройки в виде коробок скоростей (подач), гитар сменных колес и электронных управляющих блоков.

Взаимосвязанную совокупность условно изображенных исполнительных органов, элементов кинематических цепей и источников движения называют ***кинематической схемой станка.***

Сложность кинематических схем различна для универсальных, специализированных и специальных станков. В универсальных станках кинематические схемы сложны, что связано с весьма широкими технологическими возможностями таких станков. Эти возможности должны обеспечивать обработку поверхностей любого размера ($D$) внутри заданного интервала ($D_{max}$ - $D_{min}$) в широком диапазоне скоростей главного движения ($v_{max}$ - $v_{min}$) и подач ($s_{max}$- $s_{min}$). $v_{max}$- $v_{min}$может быть представлена в виде диапазона частот вращения шпинделя ($n_{max}$ - $n_{min}$), которые рассчитывают по формулам:

$$n_{\min} = \frac{1000 v_{\min}}{\pi D_{\max}}; \quad n_{\max} = \frac{1000 v_{\max}}{\pi D_{\min}}.$$

Технологические возможности станка могут быть охарактеризованы диапазоном регулирования частот вращения шпинделя ($R_n$), представляющим собой отношение предельных частот вращения:

$$R_n = n_{\max} / n_{\min}.$$

Промежуточные значения частот вращения шпинделя при ступенчатом регулировании обычно выбираются по закону геометрической прогрессии:

$$n_{\min} = n_1$$
$$n_2 = n_1 \cdot \varphi$$
$$n_3 = n_2 \cdot \varphi = n_1 \cdot \varphi^2$$
$$\text{----------}$$
$$n_z = n_1 \cdot \varphi^{z-1} = n_{\max}$$

где φ – знаменатель геометрического ряда; $z$ – число ступеней скорости.

Графически зависимость $n_z = n_1 \cdot \varphi^{z-1}$ в координатах $v$ - $D$ для ряда $n$ и $\varphi$=const представляется в виде лучевой диаграммы частот вращения.

Преимущества геометрического ряда частот вращения сводятся к тому, что он обеспечивает постоянство максимальной возможной потери ($\Delta v_{\max}$) экономически выгодной скорости $v_2$ (для всех интервалов ряда) при переходе на ближайшую меньшую скорость $v_1$. при прочих равных условиях обработки максимальная относительная потеря скорости ($A=\Delta v / v$) и соответствующая ей потеря производительности постоянны.

$$\frac{\Delta v_{\max}}{v_2} = \frac{v_2 - v_1}{v_2} = \frac{n_2 - n_1}{n_2} = 1 - \frac{1}{\varphi} = const$$

Наибольшее распространение получили значения φ, равные 1,26 и 1,41. Подобным образом формируются ряды чисел двойных ходов в станках прямолинейным главным движением, а также ряды подач большинства станков.

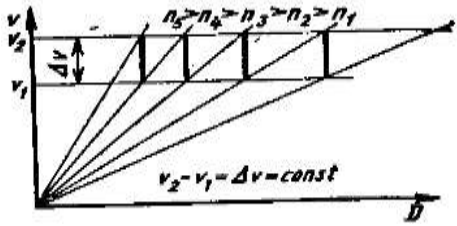



*Рис. 123. Лучевая диаграмма частот вращения МРС*

В станках с прерывистым движением подачи (поперечно-продольно-строгальные, долбежные и др., в приводах которых используются храповые механизмы, ряды подач строятся по закону арифметической прогрессии.

Аналогично, диапазон регулирования подач $R_s$:

$$R_s = s_{max} / s_{min}.$$

Для токарных станков $R_s$= 6… 60, фрезерных $R_s$ = 25…60, универсальных горизонтально-расточных $R_s$ = 30…150.

Передаточное отношение ($i_к$) кинематической цепи – ее важнейшая характеристика. $i_к$ определяется как произведение передаточных отношений кинематических пар, входящих в состав этой цепи. Кинематические пары цепей привода главного движения – ременные и зубчатые передачи.

Передаточное отношение $i$ в соответствии с ГОСТ 16530-83 – отношение угловых скоростей ведомого ($\omega_2$) и ведущего ($\omega_1$) валов (либо шкивов ременной передачи):

$$i = \omega_2 / \omega_1.$$

Для ременной передачи:

$$i = D_{ш1} / D_{ш2},$$

где $D_{ш1}$ – диаметр ведущего шкива; $D_{ш2}$ – диаметр ведомого шкива.

Зубчатой передачи:

$$i = D_1 / D_2 = z_1 / z_2.$$

### 1.3. Приводы и передачи МРС

Совокупность механизмов, передающих движение от двигателя к рабочему органу станка, называется приводом. В настоящее время применяются индивидуальные приводы, которые характеризуются применением на каждом станке своего электродвигателя. Разновидность индивидуального привода – многомоторный привод (каждый электродвигатель приводит в движение определенный орган станка).

### 1.4. Типы приводов МРС

**Электропривод.** Наибольшее распространение в станкостроении *трехфазные асинхронные короткозамкнутые электродвигатели*. Основные преимущества электродвигателей этого типа – компактность, надежность и экономичность эксплуатации. Экономичность проявляется в их способности со-

хранять практически постоянной частоту вращения при изменении нагрузки (жесткая характеристика), что обеспечивает заданные производительность и качество обработки резанием. В станках часто применяют приводы со встроенным механическим тормозом, управляемым электромагнитом.

В станкостроении используют *три основные компоновки асинхронных двигателей*: нормальную на лапах с горизонтальным расположением вала; фланцевую, допускающую вертикальное и горизонтальное расположение вала; встроенную, при которой конструктивные элементы двигателя встраиваются в корпус детали станка.

*По форме защиты:* защищенные, закрытые и закрытые обдуваемые.

*Электродвигатели постоянного тока* используют в станкостроении как в приводах для осуществления движений формообразования (до 200 кВт) так и в системах автоматического регулирования (до 1 кВт).

Преимущество: высокая экономичность бесступенчатого регулирования их частоты вращения.

Двигатели постоянного тока по сравнению с асинхронными имеют меньший КПД, большую массу и более высокую стоимость.

Особое место среди двигателей приводов подач занимают *шаговые двигатели*, являющимися синхронными машинами, обмотки которых питаются импульсами напряжения от специальных коммутаторов. Шаговые двигатели применяют как в приводах подач, имеющих старт-стопный характер движения, так и приводах, в которых преобладают непрерывные движения.

**Гидропривод станков** – совокупность устройств, предназначенных для приведения в движение его механизмов посредством рабочей жидкости, подаваемой под давлением. В МРС гидроприводы используют в приводах главного движения, приводах подач и в приводах вспомогательного движения.

Преимущества: простота бесступенчатого регулирования скорости движения, простота получения прямолинейного движения и его реверса; возможность получения больших сил и мощностей; компактность и широкое использование нормализованных узлов; высокая долговечность, обеспечиваемая применением в качестве рабочих сред минеральных масел.

Состав: насосы; механизмы перемещения рабочих органов станка (рабочие цилиндры для получения поступательного движения и гидромоторы для вращательного); механизмы управления (золотники); регулирующие механизмы (клапаны, регуляторы скорости).

Скорость (мм/мин) продольного перемещения стола в гидроприводе поступательного движения можно определить по формуле:

$$v = 10^9 \frac{Q}{F} \eta_o ,$$

где $Q$ – производительность насоса, м$^3$/мин; $F$ – площадь поршня рабочего цилиндра, мм$^2$; $\eta_o$ – объемный КПД системы (с учетом дросселя).

Недостатки гидропривода – низкий КПД вследствие утечек и потерь на внутреннее трение, влияние температуры и давления на вязкость среды и стабильность работы гидропривода; склонность возгорания большинства рабочих сред; сложность изготовления деталей гидроприводов; необходимость специального обслуживания гидроприводов.

## 2. Узлы и механизмы МРС

### 2.1. Компоновка основных узлов и механизмов

Конструктивно металлорежущий станок представляет собой совокупность узлов и механизмов, обеспечивающих технологически необходимые движения исполнительных органов и обладающих достаточными прочностью и жесткостью в условиях длительного действия высоких эксплуатационных нагрузок.

Традиционно основные узлы и механизмы станка располагают на станине, являющейся базовым узлом станка. В зависимости от служебного назначения узлы и механизмы либо неподвижны, либо перемещаются относительно станины. Взаимное расположение основных узлов и механизмов представляет компоновку станка, которая отражает метод обработки, характер движений формообразования и кинематическую структуру.

С точки зрения компоновки станки представляют собой совокупность стационарного и подвижных блоков, состоящих, в свою очередь, из узлов и механизмов. Например, в стационарный блок токарного станка входят станина, передняя бабка, коробка подач и задняя бабка. Представление станка в виде блоков позволяет обозначать его как сочетание символов в структурной формуле компоновки.

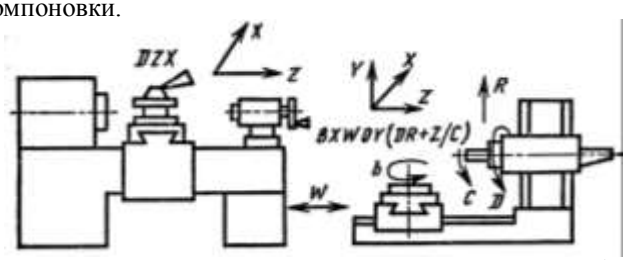



*Рис. 124. Структурная компановка станка*




*Рис. 125. Структурная формула расточного станка*

Символами обозначают блоки, перемещения и характер их сопряжения.

В структурных формулах направление оси *X* всегда горизонтально, а направление от заготовки к инструменту принимают за положительное направление оси *Z*, причем координатная ось *Z* всегда параллельно оси главного шпинделя станка. Структурные формулы позволяют выбрать компоновку и этим обеспечить высокие жесткость, точность, долговечность и малую материалоемкость при оптимальном уровне унификации.

Унификация позволяет удешевить станок, повысить качество узлов и снизить расходы на ремонт.

*OZX* – структурная формула токарного станка. «*O*» – символ стационарного блока.

Структурная формула горизонтально-расточного станка:

$$BXWOY\ (DR + Z/C),$$

где *B* – стол с установочным вращением вокруг оси *Y*; *W* – каретка станка; *D* – планшайба, вращающаяся вокруг оси *Y*; *R* – радиальный суппорт; *Z/C* – расточной шпиндель, выполняющий одновременно поступательное *Z* и вращательное *C* движения.

**Передаточные механизмы**

***Передачи*** – механизмы, преобразующие или передающие движение от одного узла станка к другому. Передачи – зубчатые, цилиндрические, конические, ременные, цепные, червячные, реечные, винтовые.

***Коробки скоростей*** дают возможность в определенных пределах изменять скорость рабочего органа станка. Частоту вращения шпинделя изменяют при помощи переключения зубчатых колес, т.е. изменяя передаточное отношение в цепи от вала привода к шпинделю станка.

***Механизмы подачи*** служат для получения различных величин подач (скоростей перемещения инструмента относительно вращающейся заготовки). Подачи – непрерывные (токарные, сверлильные, фрезерные станки), прерывистые (строгальные и долбежные станки). Кинематическая цепь механизма подачи соединяется с тем органом станка, в связи с движением которого подача рассчитывается. Чаще всего величину подачи изменяют зубчатыми коробками подач, сменными колесами, регулированием храпового механизма (строгальные и долбежные станки) или при помощи гидропривода.

***Механизм с накидным колесом, механизм с вытяжной шпонкой.***

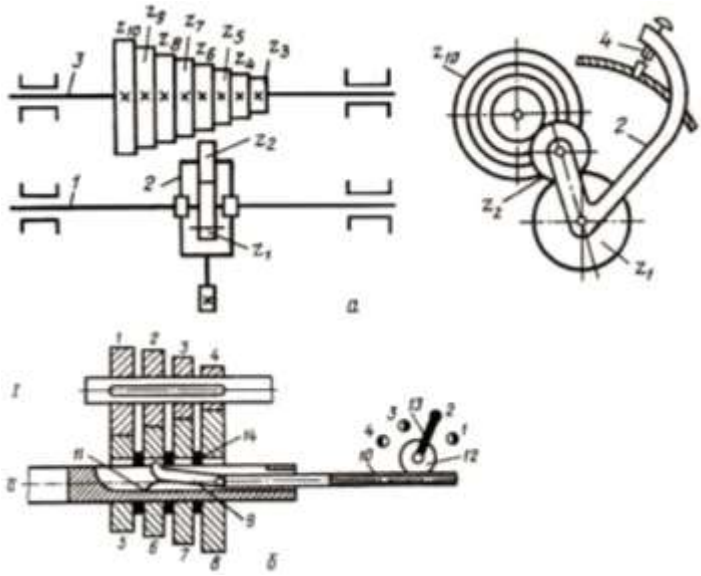


*Рис. 126. Схемы механизмов:*
*а – с накидным зубчатым колесом; б – с вытяжной шпонкой*

***Храповый механизм*** служит для прерывистой подачи и применяется на строгальных и долбежных станках.

Передаточное отношение храпового механизма:

$$i = x / z,$$

где $x$ – число зубьев, захватываемое собачкой; $z$ – число зубьев храпового колеса.

Частота вращения храпового колеса:

$$n_2 = n_1 x / z,$$

где $n_1$ – частота вращения кривошипного колеса, об/мин.

***Мальтийский механизм (крест)*** служит для периодического поворота через длительные отрезки времени револьверных головок, шпиндельных барабанов станков.

$$i = 1 / z,$$

где z – число пазов в диске.

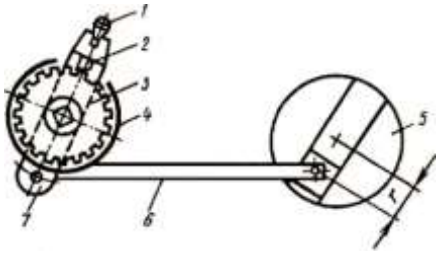



*Рис. 127. Схема храпового механизма*

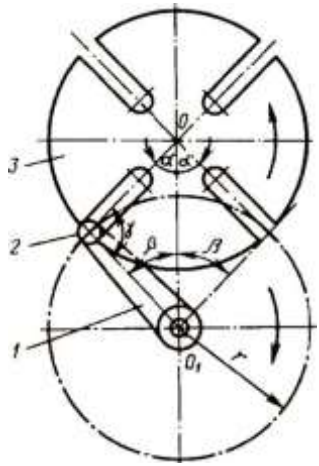



*Рис. 128. Схема мальтийского механизма*

***Кулачковые механизмы*** – для преобразования равномерного вращательного движения в возвратно-поступательное с любым законом движения.

Кулачки: дисковые и цилиндрические.

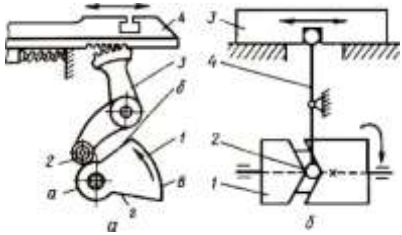



*Рис. 130. Схемы кулачковых механизмов: а – дискового; б – цилиндрического*

***Кулисный механизм*** – в поперечно-строгальных станках, служит для преобразования вращательного движения в возвратно-поступательное.

Время одного двойного хода ползуна t равно времени одного оборота кулисного зубчатого колеса:

$$t = \frac{1}{n} = t_p + t_x = \frac{\alpha}{360} \cdot \frac{1}{n} + \frac{\beta}{360} \cdot \frac{1}{n},$$

где n – число двойных ходов ползуна в мин (или частота вращения кулисного колеса); $t_p$ – время рабочего хода ползуна, мин; $t_x$ – время холостого хода ползуна, мин; $\alpha$ – угол рабочего хода, $\alpha = 180° + 2\delta$; β – угол холостого хода, $\beta = 180° - 2\delta$; $2\delta$ – угол поворота кулисы

$$tg\,\delta = \frac{L}{2H},$$

где $L$ – длина хода ползуна, мм; $H$ – расстояние от центра качания кулисы до центра пальца, мм.

Средняя скорость (м/мин) рабочего хода ползуна:

$$v_{p.cp.} = \frac{L}{1000 t_p} = \frac{L}{1000 \frac{\alpha}{360} \cdot \frac{1}{n}} = \frac{0{,}36 \cdot L \cdot n}{\alpha}$$

Средняя скорость ползуна:

$$v_{cp.} = \frac{2Ln}{1000}.$$

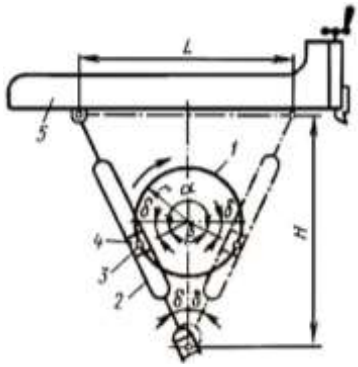



*Рис. 131. Схема кулисного механизма*

***Реверсивные механизмы*** служат для изменения направления движения. Они состоят из цилиндрических зубчатых колес и фрикционной муфты, цилиндрических зубчатых колес и скользящих колес или блоков, из конических зубчатых колес и кулачковой муфты.

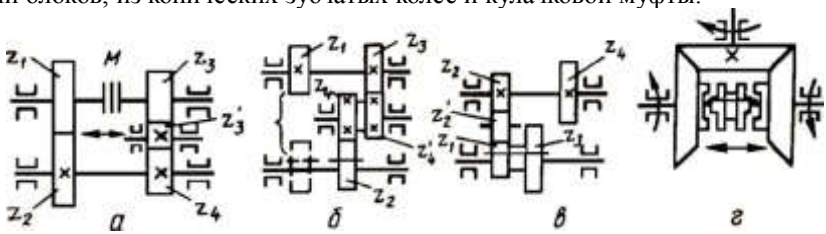



*Рис. 132. Схемы возможных вариантов реверсивных механизмов*

***Механизм (муфта) обгона*** – в токарных и фрезерных станках для выбора из двух вращательных движений более быстрого. Позволяет, не включая рабочей подачи (медленной), включать ускоренную подачу без поломки механизмов станка. Передает крутящий момент благодаря силам трения, возникающим при заклинивании роликов в клиновидных щелях между ступицей и обоймой, вследствие разности окружных скоростей ступицы и обоймы.

***Дифференциалы*** – служат в качестве суммирующих механизмов, осуществляющих алгебраическое сложение двух движений.

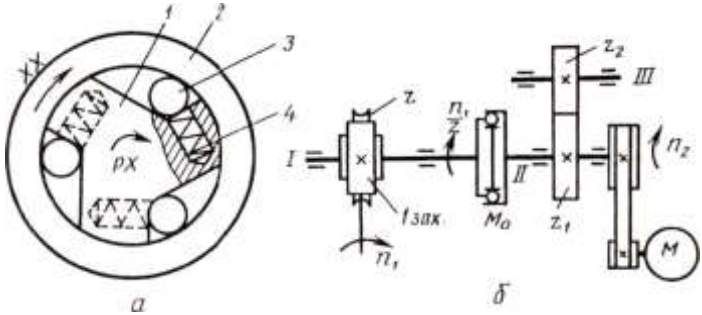



*Рис. 133 Схема обгонной муфты (а) и ее включение в кинематическую цепь (б)*

Конический дифференциал используется на зубофрезерных станках. По схеме действия – планетарная передача с двумя степенями свободы.

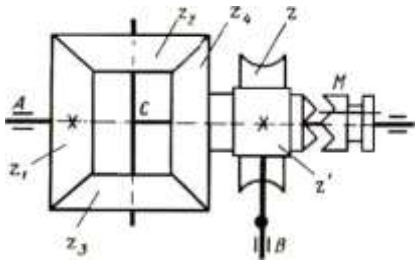



*Рис. 134. Схема конического дифференциала*

***Механизмы бесступенчатого регулирования скоростей*** позволяют наиболее точно установить необходимые скорость резания и величину подач, бывают электрические, механические и гидравлические (гидроприводы).

Электрический механизм бесступенчатого регулирования – шунтовой электродвигатель постоянного тока. Диапазон регулирования:

$$C = n_{max} / n_{min} \approx 3\ldots6.$$

***Механические вариаторы.*** Передаточные отношения 135А135щениются в пределах наклона промежуточных роликов, при повороте которых меняются радиусы точек контакта роликов с ведущей и ведомой чашками, закрепленными на валах.

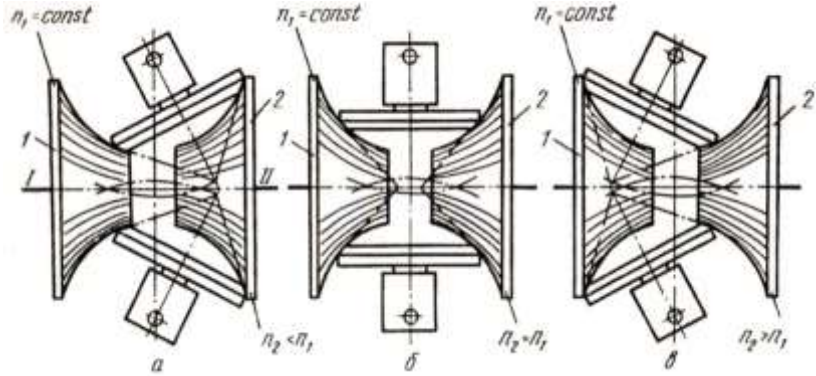



*Рис. 135. Вариатор В.А. Светозарова*

**Механизм главного движения**

Изменение частоты вращения шпинделя производится 135А135щением двойных и тройных блоков по шлицевым валам с помощью зубчато-рычажных механизмов переключения, рукоятки управления которыми выведены на лицевую панель коробки.

Реверсирование вращения шпинделя осуществляется фрикционной муфтой МФ главного привода.

Вращение электродвигателя $M$ с частотой вращения шпинделя связано зависимостью:

$$n_{шп.} = n_{э} \cdot i_{р.п.} \cdot i_{к.с.},$$

где $i_{р.п.}$ – передаточное отношение ременной передачи с учетом проскальзывания ремня; $i_{к.с.}$ – передаточное отношение зубчатых передач коробки скоростей.

Для нарезания многозаходных резьб на шпинделе установлен делительный диск.

**Коробка подач**

Установкой роликовой обгонной муфты МО в коробке подач обеспечивается разрыв кинематической цепи при холостом ускоренном вращении ходового вала от электродвигателя М1. При нарезании резьб (точении резьб) движение от гитары сменных колес может, минуя большую часть механизмов коробки подач, передаваться непосредственно на ходовой винт.

Уравнения кинематических цепей будет иметь вид:

Для нарезания резьб с шагом $P$:

$$1_{об.шп.} \cdot i_{к.с.} \cdot i_{к.п.} \cdot P_{х.в.} = P,$$

где $i_{к.с.}$ – предельное отношение механизмов коробки скоростей; $i_{к.п.}$ – предельное отношение механизмов коробки подач.

Для продольных подач $s_{пр.}$:

$$1_{об.шп.} \cdot i_{к.с.} \cdot i_{Г} \cdot i_{к.п.} \cdot i_{ф.} \cdot \pi mZ = s_{пр.}$$

Для поперечных подач $s_{п.п}$:

$$1_{об.шп.} \cdot i_{к.с.} \cdot i_{Г} \cdot i_{к.п.} \cdot i_{ф.} \cdot P_{п.с.} = s_{п.п.},$$

где $s_{п.п.}$ – шаг винта поперечных салазок.

Для подач салазок верхнего суппорта $s_{в.с.}$:

$$1_{об.шп.} \cdot i_{к.с.} \cdot i_{Г} \cdot i_{к.п.} \cdot i_{ф.} \cdot i_{в.с.} \cdot P_{в.с.} = s_{в.с.},$$

где $i_{в.с.}$– передаточное отношение передач от фартука к салазкам верхнего суппорта.

Обработке на токарно-винторезном станке предшествуют: установка соответствующими рукоятками частоты вращения шпинделя и подачи, настройка гитары сменных колес при нарезании точных резьб, установка и закрепление режущих инструментов, приспособлений и заготовок, изменение положения узлов суппорта и задней бабки при обработке конических поверхностей и т.п.

Общее уравнение баланса для настройки станков при нарезании резьбы:

$$1_{об.шп.} \cdot i_0 \cdot i_р \cdot i_{Г.} \cdot i_{к.п.} \cdot P_{х.в.} = P,$$

где $i_0$ – передаточное отношение зубчатых передач от шпинделя реверсивного механизма; $i_{р.}$ – передаточное отношение реверсивного механизма; $i_Г$ – передаточное отношение гитары сменных колес.

*Лекция 8*

## СТАНКИ ТОКАРНОЙ ГРУППЫ

Предназначены для выполнения наружного точения, сверления, растачивания, зенкерования и развертывания отверстий, нарезания наружных и внутренних резьб, а также других технологических операций механической обработки деталей при использовании различных специальных приспособлений и наладок.

Режущие инструменты – токарные резцы, сверла, зенкеры, развертки, метчики, плашки и др.

Основные размеры, характеризующие токарный станок: высота центров над станиной и суппортом и расстояние между центрами. По высоте центров станки делят на три группы: мелкие – с высотой центров до 150 мм, средние – 150…300 мм, крупные – более 300 мм.

### Устройство токарно-винторезного станка

Основные узлы станка – станина, передняя бабка с коробкой скоростей, задняя бабка, коробка подач, суппорт с фартуком, привод быстрых перемещений суппорта, гитара сменных колес, шкаф с электрооборудованием.

Суппорт предназначен для закрепления и подачи режущего инструмента. Он состоит из четырех основных частей: каретки (нижних салазок), нижней части, средней поворотной части и верхней части (верхних салазок).

Управление станком осуществляется посредством рукояток, маховичков, кнопок.

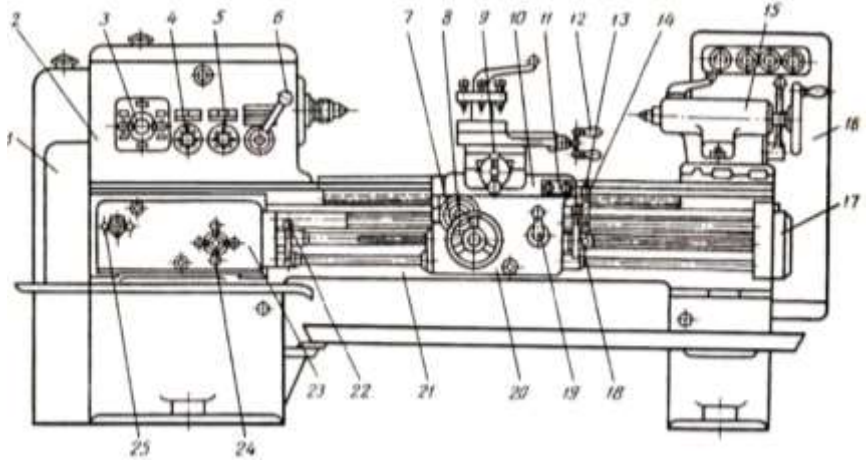



*Рис. 136. Схема токарно-винторезного станка*

***Токарно-винторезный станок 16К20*** предназначен для точения различных деталей и нарезания резьб.

*Механизм главного движения*. Движение коробке скоростей передается от электродвигателя $N$=10 кВт, $n$=1460 мин$^{-1}$ через клиноременную передачу шкивами. Муфта $M_1$ служит для прямого и обратного вращения шпинделя.

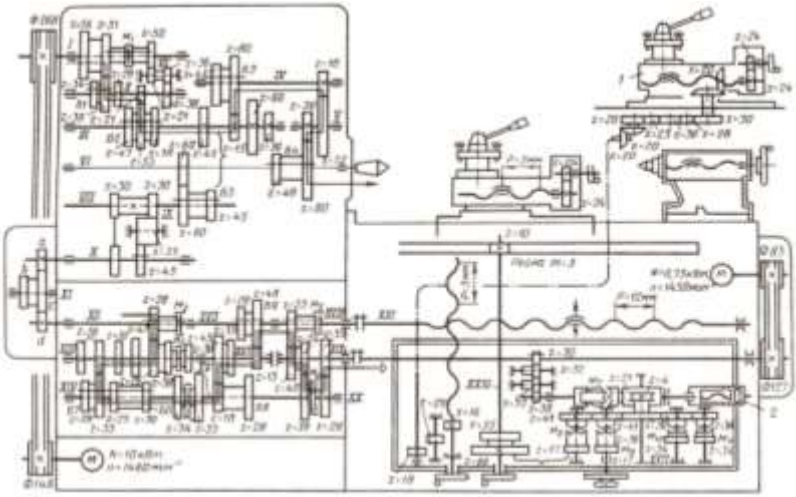


*Рис. 137. Кинематическая схема токарно-винторезного станка 16К20*

Всего станок 16К20 имеет 24 *частоты вращения*, но поскольку значения 500 и 630 мин$^{-1}$ повторяются дважды, то считается, что шпиндель имеет 22 частоты вращения.

*Привод подач* содержит звено увеличенного шага, реверсивный механизм, гитару смежных колес, коробку подач и механизм фартука.

*Механизм фартука*. Ускоренное перемещение суппорта осуществляется от специального электродвигателя ($N$ = 0,75 кВт, $n$ = 1450 об/мин) через ременную передачу, ходовой вал и механизм фартука. Наличие в коробке муфты обгона $М_6$ позволяет сообщить суппорту ускоренное движение без выключения рабочей подачи.

### Токарные резцы и инструмент для нарезания резьбы

***Токарные резцы*** подразделяют по форме головки, конструкции, сечению стержня, материалу рабочей части, назначению и т.д.

Существуют резцы отогнутые, изогнутые и оттянутые.

По конструкции различают резцы: цельные; с приваренной встык головкой; с припаянной пластинкой и резцы с механическим креплением режущих пластинок.

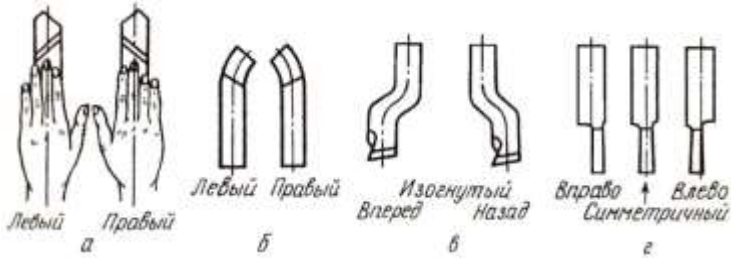



*Рис. 138. Формы головок резцов: а…г – возможные варианты*

По сечению стержня различают прямоугольные, квадратные и круглые резцы. По назначению различают проходные, подрезные, отрезные, расточные, галтельные, фасонные и резьбовые резцы.

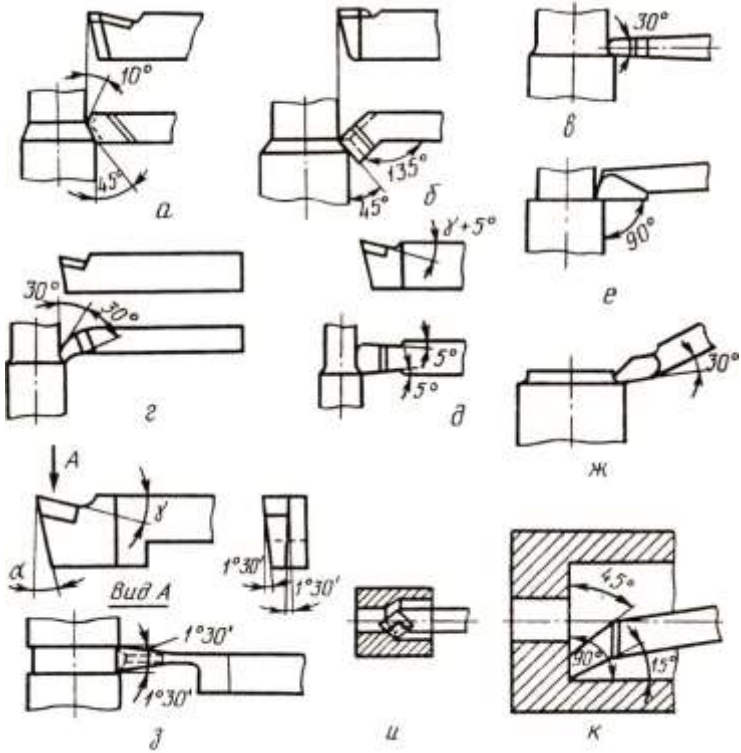



*Рис. 139. Токарные резцы: а…к – возможные варианты*

***Инструмент для нарезания резьбы***. Резьбовые резцы и гребенки применяют для нарезания наружной и внутренней резьб (метрической, дюймовой, трапецеидальной и прямоугольной). По конструкции такие резцы разделяются на стержневые, призматические и дисковые.

Для метрической и дюймовой резьбы изготовляют резцы с задним углом $\alpha = 12…15°$. Углы $\alpha_1$ и $\alpha_2$ для резьб с малыми углами подъема резьб выполняют в пределах 3…5°. Передний угол $\gamma$ может быть положительным и равным нулю. Чистовые резцы имеют $\gamma = 0°$, т.к. $\gamma > 0$ приводит к искажению профиля и требует коррекции профиля резьбы.

Из-за высоких скоростей резания угол профиля (угол при вершине в плане $\varepsilon$) у твердосплавных резьбовых резцов делают на 30′ меньше, чем профиль резьбы.

Призматические резьбовые резцы применяют для нарезания наружных треугольных резьб с небольшим углом подъема витков.

Дисковые резьбовые резцы широко используются в условиях крупносерийного и массового производства.

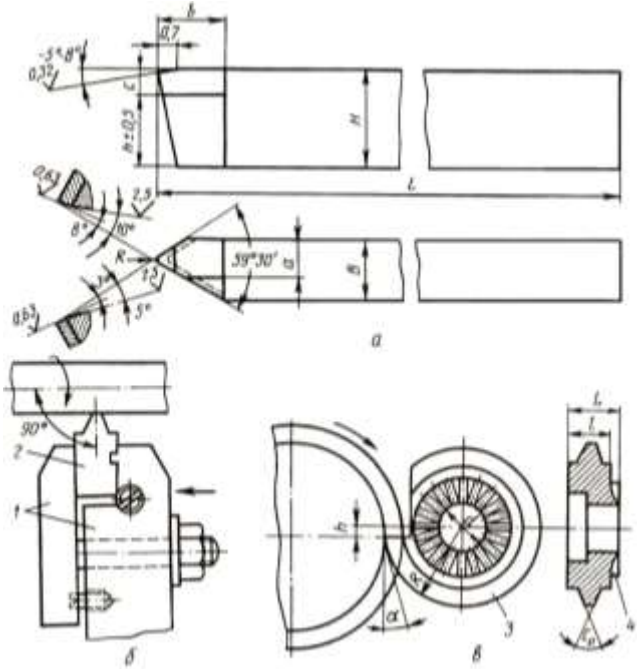


*Рис. 140. Резьбовые резцы:*
*а – стержневой резец; б – державка 1 с призматическим резцом 2; в – дисковый резец 3 с зубцами 4 для крепления*

Резьбовые гребенки представляют собой объединение нескольких резьбовых резцов с профилем, соответствующим профилю нарезаемой резьбы. Первые два резца, срезанные под углом φ = 25…30°, образуют режущую (заборную) часть, остальные – калибрующую часть.

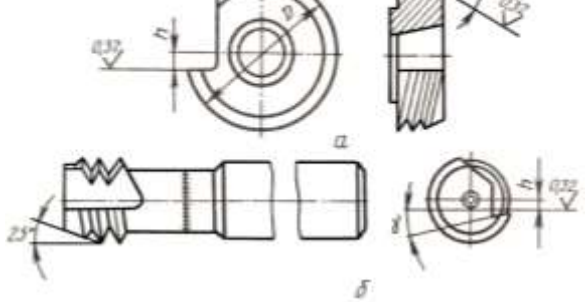


*Рис. 141. Круглые резьбовые гребенки для нарезания резьб:*
*а – наружной; б – внутренней*

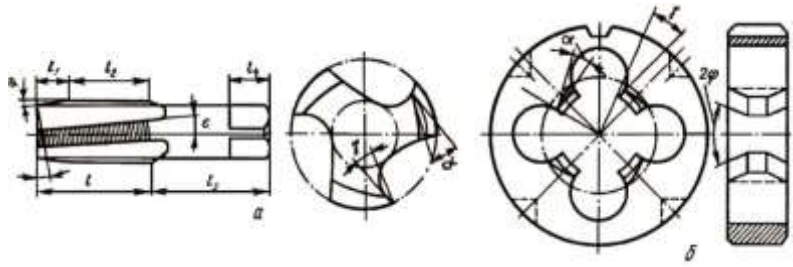


*Рис. 142. Конструктивные элементы метчика (а) и плашки (б)*

Метчики предназначены для нарезания или калибрования резьбы в отверстиях и представляют собой винт с продольными (прямыми или винтовыми) канавками. Существуют ручные (двух- и трехкомплектные), машинные, гаечные и планшетные метчики.

### Оснастка и принадлежности к токарным станкам

*Центр* применяют для установки на станке длинных деталей.

*Патроны* бывают двух-, трех-, четырехкулачковые, с ручным приводом и пневматические.

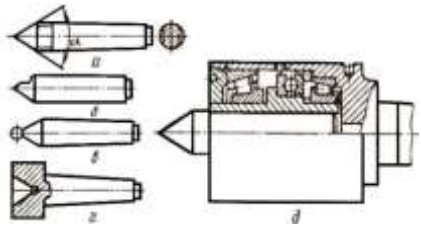


*Рис. 143. Токарные центры: а – простой; б – срезанный; в – с шариком; г – обратный; д – вращающийся*

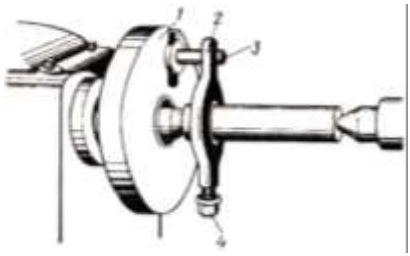


*Рис. 144. Установка заготовки в центрах*

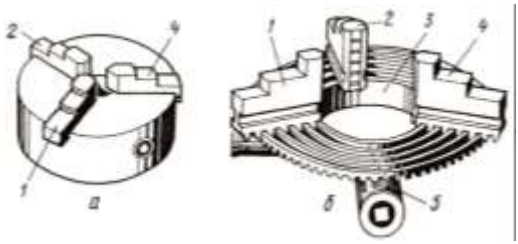


*Рис. 145. Самоцентрирующий трехкулачковый патрон: а – общий вид; б – схема*

*Рис. 146. Четырехкулачковый патрон: 1…4 – кулачки; 5 – винт*

Поводковый самозажимной патрон. Детали зажимают кулачками за счет наличие эксцентриситета между осью вращения кулачков и осью вращения детали.

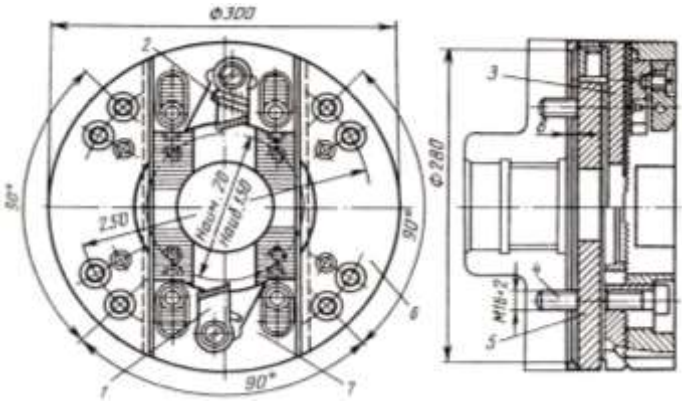



*Рис. 147. Схема поводкового зажимного патрона*

***Планшайбу*** применяют для закрепления несимметричных и сложных по конфигурации деталей.

***Люнеты*** – приспособления для дополнительной поддержки нежестких (длинных и тонких) валов. Люнеты бывают неподвижные и подвижные.

*Рис. 148. Установка и закрепление обрабатываемой детали на планшайбе*

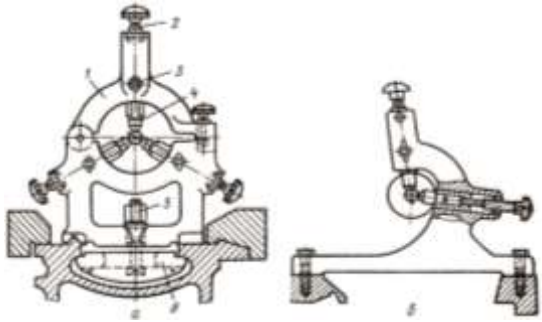


*Рис. 149. Схема неподвижного (а) и подвижного (б) люнетов*

***Оправки*** – приспособления для установки полых деталей при обработке по отверстию, существуют цельные и разжимные.

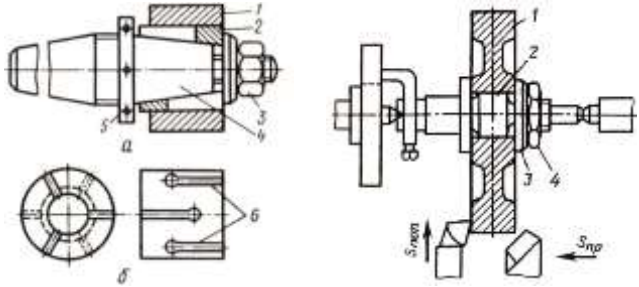



*Рис. 150. Схемы обработки детали на разжимной оправке (а), с разрезной гильзой (б) и на цельной цилиндрической оправке*

**Работы, выполняемые на токарных станках**

***Центрование*** выполняют при помощи сверла и конической зенковки или при помощи комбинированного центровочного сверла.

***Обтачивание наружных цилиндрических поверхностей***. Короткие детали с $l/D < 4$ закрепляют в патроне; детали с $4 < l/D < 10$ детали закрепляют в центре или в патроне, подпирая центром задней бабки. При $l/D > 10$ подпирая центром дальней бабки, и, кроме того, поддерживают люнетом.

***Обработка конических поверхностей*** выполняется различными способами: смещением задней бабки в поперечном направлении, поворотом верхней части суппорта, при помощи конусной (копировальной) линейки и при помощи широкого резца (при длине конуса до 50 мм).

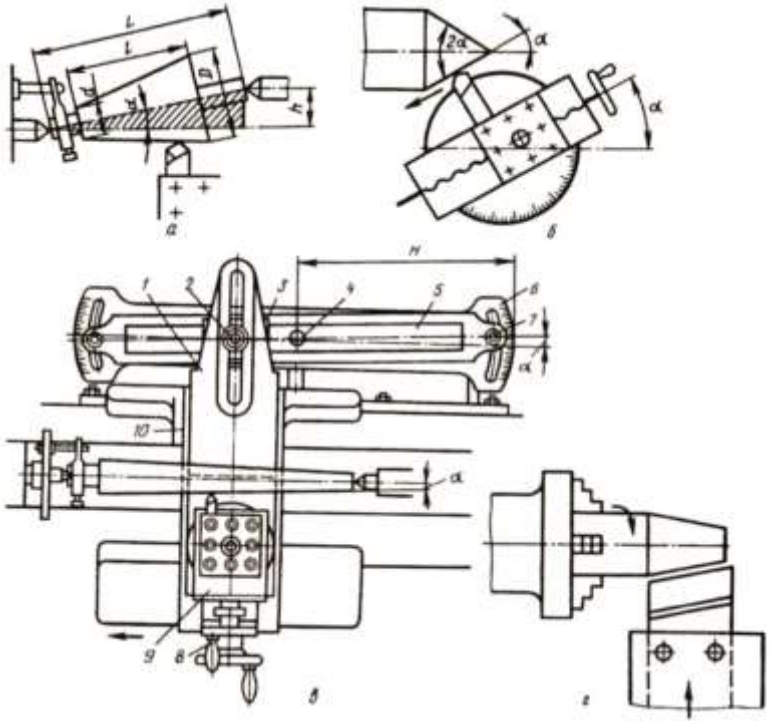


*Рис. 151. Схемы точения конической поверхности:*
*а – смещением задней бабки; б – поворотом верхней части суппорта; в – с применением конусной линейки; г- широким резцом*

Смещением задней бабки в поперченном направлении обрабатывают на длинных валах конические поверхности с углом конуса $\alpha \le 8\ldots10°$.

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{D-d}{2l}; \quad h = l\sin\alpha.$$

Поворот верхней части суппорта применяют при обработке коротких наружных и внутренних конических поверхностей.

Точение по конусной линейке применяют на специально оборудованных станках для обработки наружных и внутренних конических поверхностей с углом при вершине до 25°.

***Обработка отверстий*** производится на токарном станке сверлами, зенкерами, развертками и расточными резцами.

***Нарезание резьбы*** резцами выполняется за несколько проходов. Нарезаемые резьбы разделяют на четные и нечетные. У четных резьб отношение $T_{хв}$ / $S$ (где $T_{хв.}$ – шаг ходового винта, $S$ – шаг нарезаемой резьбы) – целое число, а у нечетных – дробное.

***Настройка станка на нарезание однозаходной резьбы.*** Общее уравнение баланса для настройки станков при нарезании резьбы выражается формулой:

$$1_{об.шп.} i_o i_p i_{см} i_{под} T_{хв} = S,$$

где $i_{см} = S / AT_{хв}$ (передаточное отношение сменных зубчатых колес)

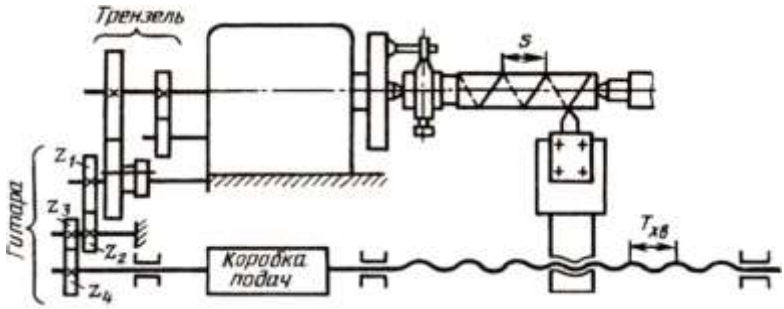



*Рис. 152. Принципиальная схема нарезания резьбы на токарно-винторезном станке*

***Нарезание многозаходной и торцовой резьб.*** Ход резьбы – расстояние, измеренное вдоль оси винта между одноименными точками одной и той же нитки:

$$S = tk,$$

где $t$ – шаг резьбы, мм; $k$ – число заходов.

После нарезания одной нитки поворачивают нарезаемую деталь (при неподвижном резце) на угол равный 360°/$k$ ($k$ – число заходов резьбы) и нарезают следующую нитку (заход). Деление многозаходных резьб на заходы можно выполнять несколькими способами:

1. Деление с помощью специальных делительных устройств. При этом применяют патрон с нанесенной на корпусе шкалой в градусах или поводковый диск с точным расположением определенного количества отверстий (обычно 24).

2. Деление с помощью верхнего суппорта. После нарезания первой нитки резьбы суппорт с резцом смещают в осевом направлении на величину шага однозаходной резьбы и таким образом нарезают следующую нитку.

3. Деление с помощью сменных зубчатых колес. Возможно при условии деления без остатка числа зубьев ведущего колеса гитары z на число заходов резьбы и равенство передаточного отношения трензеля единице ($i_{тр}$ = 1)

***Нарезание торцовых спиралей*** производят с поперечной подачей в несколько проходов.

Нарезание резьбы метчиками, плашками и резьбонарезными головками. Крутящий момент, потребный для осуществления процесса резьбонарезания (экспериментальная формула):

$$M = 10 \cdot C_m \cdot d^{x_m} \cdot S^{y_m},$$

где $d$ – наружный диаметр метчика, мм; $S$ – шаг метчика, мм; $C_m$ – коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала и условий обработки; $x_m$ и $y_m$ – показатели степени. $C_m$, $x_m$ и $y_m$ – берутся из справочников.

Потребная мощность (кВт) при нарезании резьбы на станке:

$$N = \frac{M \cdot n}{9570},$$

где $M$ – крутящий момент, Н·м.

Рациональная скорость резания при нарезании резьбы метчиками:

$$v = \frac{C_v \cdot d^{x_v}}{T^m \cdot S^{y_v}} \cdot K_v,$$

где $d$ – диаметр метчика, мм; $T$ – период стойкости (60…90 мин); $S$ – шаг резьбы, мм; $K_v$ – поправочный коэффициент.

Основное (машинное) время при нарезании резьбы машинным метчиком:

$$T_0 = \frac{l + l_1}{n \cdot S} \cdot i + \frac{l + l_1}{n_1 \cdot S} \cdot i,$$

где $l$ – длина резьбы, мм; $l_1$ – перебег метчика в начале и в конце прохода (5…8); $S$ – шаг резьбы; $n$ – частота вращения заготовки, мин$^{-1}$; $i$ – число проходов; $n_1$ – частота вращения заготовки при обратном ходе, мин$^{-1}$.

## Паспорт станка. Проверочный расчет слабых звеньев станка

*Паспорт станка* – основной документ, определяющий его технологические возможности. паспорт содержит данные о типе и модели, о габаритах станка, о размерах обрабатываемых деталей, суппорте, шпинделе, задней бабке, приводе и т.д., данные о механизме главного движения и механизме подач.

Новые или отремонтированные станки проходят испытания для проверки качества изготовления или ремонта станка. Станки испытывают на геометрическую точность, точность геометрической формы обрабатываемых деталей, на жесткость.

Проверяемые параметры, методы контроля и нормы точности регламентированы специальными ТУ и ГОСТ 18097-72 (предусмотрено 17 проверок на точность, две – в работе – проверки точности обрабатываемых образцов, одна – на жесткость):

1. Проверка прямолинейности продольного перемещения суппорта в горизонтальной плоскости;

2. Проверка одновысотности оси вращения шпинделя передней бабки и оси отверстия пиноли задней бабки к направляющим станины в вертикальной плоскости;

3. Проверка радиального биения центрирующей поверхности шпинделя под патрон.

*Проверочный расчет слабых звеньев станка* производят при заполнении раздела паспорта, касающегося механизма станка. Для механизма главного движения по каждой ступени подсчитывают КПД, мощность на шпинделе по приводу и по наиболее слабому звену, определяют для каждой ступени наиболее слабое звено. Подсчитывают наибольшую силу, допускаемую механизмами продольной и поперечной подач.

КПД одношпиндельного станка определяется по формуле:

$$\eta = \eta_1^a \eta_2^b .. \eta_n^m \cdot K ,$$

где $\eta_1$, $\eta_2$, … $\eta_n$ – КПД отдельных элементов передач; *a, b, ...m* – числа элементов передач, имеющие равные значения КПД; *K* – коэффициент, учитывающий расход мощности на механизм подачи (для токарных станков *K* = 0,96).

*Мощность на шпинделе по приводу (номинальную)* рассчитывают по формуле:

$$N_ш = N_э \cdot \eta ,$$

где $N_э$ – мощность электродвигателя, кВт.

Элемент привода, который передает наименьшую мощность, называется слабым звеном. Слабыми звеньями могут быть ременная передача, фрикционная муфта или одно из зубчатых колес коробки скоростей. Мощность по наиболее слабому звену при малой частоте вращения обычно значительно меньше мощности по приводу, т.е. слабое звено не дает возможности при малой частоте вращения использовать всю мощность электродвигателя.

Определение мощности на шпинделе по силе, передаваемой ременной передачей. Передаваемая (полезная) сила:

$$P = P_o \cdot z \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 ,$$

где $P_o$ – сила, допускаемая прочностью одного ремня, Н; *z* – число ремней; $K_1$ – коэффициент угла обхвата меньшего шкива; $K_2$ – скоростной коэффициент; $K_3$ – коэффициент режима работы.

Угол (град) обхвата малого шкива:

$$\alpha = 180^0 - \frac{(D_2 - D_1)57}{l} ,$$

где $D_2$, $D_1$ – диаметр большего и меньшего шкива; *l* – расстояние между центрами шкивов.

Окружная скорость (м/с) ремня:

$$v = \frac{\pi D_1 n_1}{1000 \cdot 60} .$$

Мощность (кВт), которую может передать ременная передача:

$$N = \frac{Pv}{1020} ,$$

где *P* – полезная сила передачи, Н; *v* – окружная скорость, м/с.

Мощность, которую ременная передача может передать на шпиндель:

$$N_{1ш} = N\eta ,$$

где $\eta$ – КПД от ременной передачи до шпинделя.

*Определение мощности на шпинделе по крутящему моменту, передаваемому фрикционной муфтой*. Крутящий момент, передаваемый многодисковой фрикционной муфтой, определяется по формуле:

$$M_{кр} = \frac{1}{\beta}\pi(R^2 - r^2)\cdot R_{ср}\cdot i\cdot p\cdot \mu\cdot K_v,$$

где $\beta$ – коэффициент запаса сцепления (1,3); $R$ – наружный радиус поверхности трения дисков, м; $r$ – внутренний радиус поверхности трения дисков, м; $R_{ср} = (R + r) / 2$ – средний радиус поверхности трения дисков, м; $i$ – число пар поверхностей дисков; $p$ – давление, МПа (табл.); $\mu$ – коэффициент трения дисков (табл.); $K_v$ – скоростной коэффициент.

Мощность, которую может передавать муфта:

$$N = M_{кр}\cdot n / 9750.$$

Мощность, которую фрикционная муфта может передавать на шпиндель:

$$N_{2ш} = N\cdot \eta_2,$$

где $\eta_2$ – КПД от фрикционной муфты до шпинделя.

Определение мощности на шпинделе по прочности зубчатых колес. Нет необходимости рассчитывать все зубчатые колеса коробки скоростей. Из зубчатых колес каждого вала для расчета выбирают наиболее нагруженное колесо, т.е. то, которое передает полную мощность и имеет минимальное число зубьев и ширину при одинаковом модуле и материале. Если выбор затруднителен, рассчитывают два и более колеса на каждом валу.

Для цилиндрических колес с прямым зубом окружную силу, допускаемую прочностью зубьев колеса, рассчитывают по формуле:

$$P = \pi y\sigma_{из} bmK_v,$$

где $P$ – допустимая окружная (тангенциальная) сила; $y$ – коэффициент формы зуба; $\sigma_{из}$ – допускаемое напряжение на изгиб, МПа (табл.); $b$ – длина зуба (ширина венца колеса), м; $m$ – модуль, м; $K_v$ – коэффициент, учитывающий влияние окружной скорости зубчатых колес.

Формула применима и для расчета цилиндрических (косозубых и шевронных) и конических колес. В этих случаях пользуются не фактическим, а расчетным (приведенным) числом зубьев колес.

Для зубчатых колес, работающих (вращающихся) постоянно под нагрузкой в обе стороны, допускаемые напряжения на изгиб необходимо брать на 40% меньше.

Окружная скорость (м/с) цилиндрических прямозубых колес:

$$v = \frac{\pi\cdot m\cdot z\cdot n}{1000\cdot 60},$$

где $m$ – модуль, мм; $z$ – число зубьев; $n$ – частота вращения, м$^{-1}$.

Для цилиндрических косозубых колес:

$$v = \frac{\pi\cdot m\cdot z\cdot n}{1000\cdot 60\cdot \cos^3\beta},$$

где $\beta$ – угол наклона винтовой линии.

Значение поправочного коэффициента $K_v$ находят из таблицы.

По допустимой окружной силе $P$ определяют крутящий момент на данном валу по прочности рассчитанного колеса:

$$M = P \cdot m \cdot z / 2000.$$

Соответственно допустимый крутящий момент на шпинделе по прочности зубчатого колеса:

$$M_{шп} = M \cdot \eta_3 / i,$$

где $\eta_3$ – КПД от данного вала до шпинделя; $i$ – передаточное число от расчетного колеса до шпинделя станка.

Мощность (кВт) на шпинделе по прочности зубчатого колеса:

$$N_{з.шп.} = \frac{M_{шп.} n}{9750},$$

где $M_{шп.}$ – крутящий момент на шпинделе по прочности зубчатого колеса, Нм; $n$ – частота вращения шпинделя, мин$^{-1}$.

Мощность на шпинделя по прочности зубчатого колеса определяют для каждой ступени, начиная с наименьшей частоты. Результаты расчетов мощностей на шпинделе, допускаемых ременной передачей, фрикционной муфтой, зубчатыми колесами и по приводу записывают в таблицу. В графу «Слабое звено станка» для каждой частоты вращения записывается звено станка, которое способно передать минимальную мощность.

## Расчет наибольшей силы, допускаемой механизмом подач

Величины возникающих в процессе резания сил ($P_x$ и радиальной $P_y$) не должны превышать допустимых, указанных в паспорте. слабым звеном в механизме подач являются реечное колесо или рейка, ходовой винт или гайка винта, которые и подлежат расчету.

При расчете сначала определяют допустимую величину тяговой силы, действующей на последний ведущий элемент механизма подачи (реечное колесо, винт), затем по этой величине определяют допустимую силу подачи.

Тяговую силу (Н) $P_T$ для реечного колеса и рейки определяют по формуле:

$$P_T = \pi \cdot y \cdot m \cdot b \cdot \sigma_{из} K_\varepsilon,$$

где $y$ – коэффициент формы зуба; $m$ – модуль, м; $b$ – ширина зуба (венца), м; $\sigma_{из}$ – допускаемое напряжение на изгиб, Па; $K_\varepsilon$ – коэффициент перекрытия зацепления, 1,1…1,2.

Из двух вычисленных величин $P_T$ (для колеса и рейки) берут наименьшую величину, по которой вычисляют допустимую силу подачи:

$$P_{х.доп.} = P_T \cdot K,$$

где $K$ – коэффициент, учитывающий потери тяговой силы на преодоление сил трения.

Вычисленная величина наибольшей силы, допускаемой механизмом продольной подачи, проставляется в паспорте станка.

**Разновидности токарных станков**

Токарные станки – наиболее многочисленная группа МРС. На заводах автотракторного и сельскохозяйственного машиностроения применяют многие разновидности станков токарной группы (карусельные, револьверные, многорезцовые, автоматы, полуавтоматы и др.).

***Лобовые и карусельные станки.*** На этих станках обрабатываются детали большого диаметра (диаметром до 4 метров) при относительно малой высоте (маховики, колеса и др.). Ось вращения обрабатываемых деталей вертикальна. Имеет 2-4 суппорта и одну или две станинные стойки.

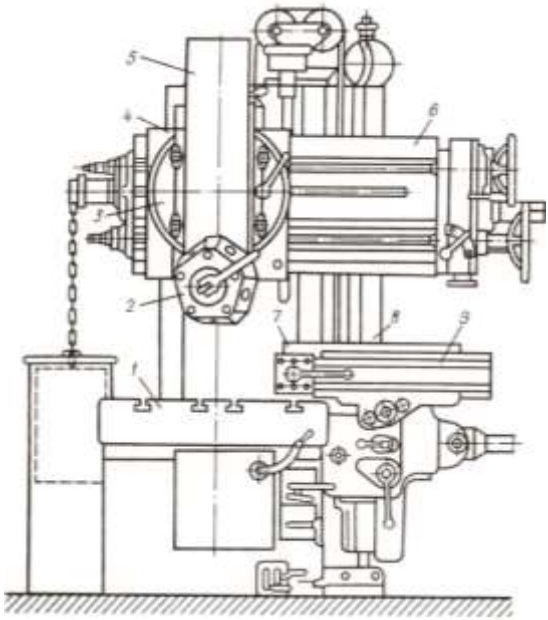



*Рис. 153. Схема одностоечного карусельного станка*

***Токарно-револьверные станки*** предназначены для серийного изготовления деталей сложной формы из прутка или штучных заготовок. Станки бывают с горизонтальной, вертикальной и профильной осью вращения револьверной головки. Время обработки на револьверном станке значительно меньше, чем на обычно токарно0винторезном, вследствие значительного сокращения времени на перестановку инструментов, применения выключающих станок упоров, одновременной работы нескольких инструментов.

***Многорезцовые токарные станки*** имеют два (иногда четыре) суппорта. Так как каждый резец обрабатывает одновременно определенную часть поверхности детали, то машинное время резко сокращается.

***Токарные полуавтоматы и автоматы***. Полуавтоматы – станки, у которых все элементы операции автоматизированы, за исключением установки и снятия заготовки. Автоматы – станки, у которых все операции автома-

тизированы, включая установку и снятие заготовки. Автоматы и полуавтоматы бывают одно- и многошпиндельные (4…12 шпинделей), с горизонтальным и вертикальным расположением шпинделей.

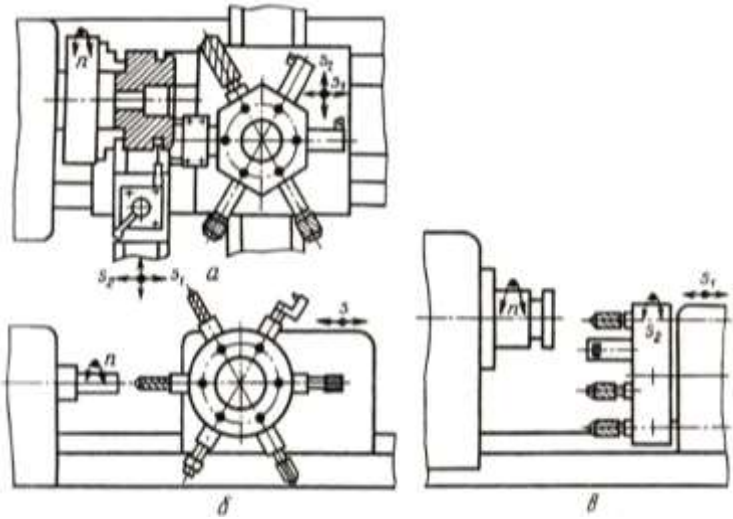


*Рис. 154. Схема револьверной головки с вертикальной (а), горизонтальной (б) и продольной (в) осями*

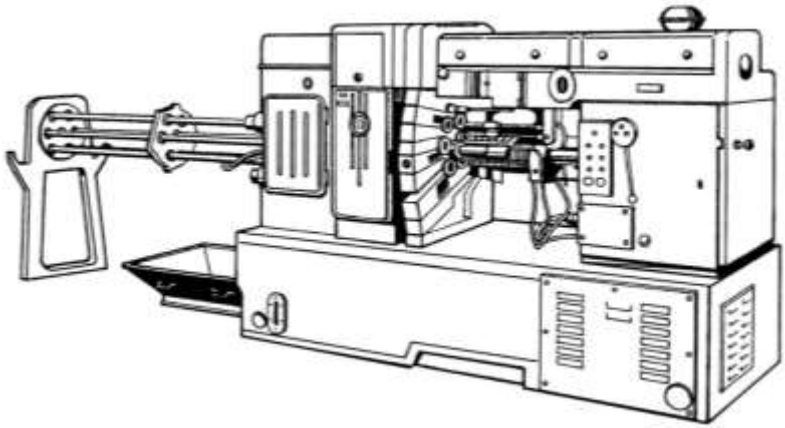


*Рис. 155. Шестишпиндельный токарный полуавтомат*

Конструктивные формы отдельных узлов одношпиндельных автоматов одинаковы и отличаются размерами. Так, автомат 1Д118 предназначен для обработки деталей из прутков диаметром до 18 мм, автомат 1Б125 – 25 мм, автомат 1Б140 – 40 мм.

Многошпиндельные автоматы делятся на автоматы параллельного и последовательного действия.

**Точность и шероховатость поверхностей при точении**

При обдирочном торцовом точении:

а) шероховатость 1…4 класса ($R_z$ 320…40 мкм)

б) точность 4 класс (11 квалитет)

При чистовом точении:

а) 5…7 класс $R_z$ 20…$R_a$ 1,25 мкм

б) 3 класс (9…10 квалитет)

При тонком точении:

а) 8 класс $R_a$ 0,63 мкм

б) 2 класс (6….8 квалитет).

**Токарные станки с ЧПУ**

Эти станки характеризуются тем, что их рабочие органы движутся автоматически по заранее заданной программе, которая кодируется на перфолентах или магнитных лентах, или дискетах.

Использование станков с программным управлением создает наиболее эффективные возможности для полной автоматизации обработки деталей в условиях мелкосерийного и серийного производства. В дальнейшем применение станков с программным управлением значительно улучшит условия автоматизации работ при ремонте машин.

Станки, оснащенные устройствами ЧПУ и устройством автоматической смены инструментов предназначены для комплексной обработки за одну установку корпусных деталей и деталей типа тел вращения.

Станки выпускают: с одним шпинделем и многопозиционным инструментальным магазином (вместимостью 12-120 инструментов), при этом инструмент заменяется в шпинделе автоматически (по программе) за 5-6 с; с револьверной инструментальной головкой (число инструментов 5-8), при этом смена инструмента (за 2-3 с) осуществляется поворотом револьверной головки.

В станках с ЧПУ направление перемещений и символика определяется ГОСТ 23597-79 по правилу правой руки. За положительное направление перемещения принимается то, при котором увеличивается расстояние между инструментом и заготовкой. Исходная ось (Z), перпендикулярная к плоскости крепления заготовки, имеет положительное направление от заготовки к инструменту и совпадает осью шпинделя.

*Лекция 9*

# ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ НА СТАНКАХ СВЕРЛИЛЬНО-РАСТОЧНОЙ, ФРЕЗЕРНОЙ, СТРОГАЛЬНОЙ, ДОЛБЕЖНОЙ И ЗУБООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ ГРУПП

## Сверление. Выполняемые работы

Сверление применяется для обработки отверстия в сплошном материале и увеличения диаметра имеющегося отверстия - рассверливания. Инструмент – спиральное (винтовое) сверло. Достигаемая точность – 5÷4 класс (13-11 квалитет), чистота 3-4 класс. Невысокая точность – результат, главным образом, биения сверла в связи с большим его вылетом из патрона и уводом (отклонением оси сверла от оси отверстия) вследствие несимметричной заточки режущих кромок. Результат – диаметр отверстия обычно больше диаметра сверла.

Главное движение – вращательное, движение подачи – поступательное.

## Элементы и режимы резания

Сверло состоит из рабочей части, хвостовика и шейки. На рабочей части расположены режущие элементы, которые срезают и отводят стружку. Рабочая часть имеет по две главных и вспомогательных режущих кромки и одну поперечную. В отличие от резца передние поверхности сверла винтовые, главные задние поверхности представляют собой винтовые ленточки, обеспечивающие направление сверла в процессе резания. Хвостовик служит для закрепления сверла на станке, имеет цилиндрическую или коническую форму. Шейка обеспечивает выход круга при шлифовании рабочей части сверла. На режущей части сверла, по аналогии с резцом, имеются главные угла, угла в плане и дополнительные углы $\omega$ и $\varphi$.

***Угол при вершине 2φ.*** У сверла обычно задается не главный угол в плане, а угол 2φ, образуемый главными режущими кромками сверла (рис. 156).

По аналогии с резцом – с уменьшением угла $\varphi$ ($2\varphi$) увеличивается длина режущей кромки сверла и ширина среза, улучшаются условия отвода тепла от режущих кромок, повышается стойкость сверла, поэтому $2\varphi$ выбирают с учетом свойств обрабатываемого материала. У стандартных сверл $2\varphi$ = 116÷118°. У нестандартных сверл $2\varphi$ = 70÷90° для малопрочных и хрупких материалов (включая пластмассу); $2\varphi$ = 116÷120° – для среднепрочных и $2\varphi$ = =130÷140° – для вязких и прочных материалов.

***Угол наклона винтовой канавки*** $\omega$ расположен между осью сверла и касательной к винтовой линии ленточки.

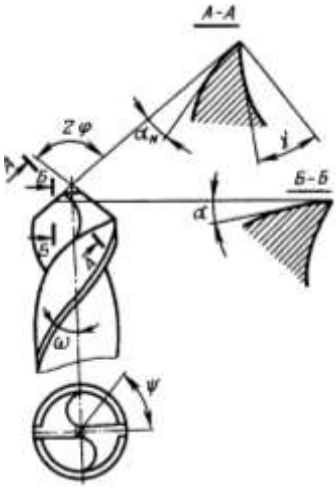



*Рис. 156. Геометрия спирального сверла*

$$tg\,\omega_i = \frac{\pi D_i}{H},$$

где $H$ – шаг винтовых линий.

Чем меньше $D$, на котором расположена точка режущей кромки, т.е. чем ближе к оси сверла, тем меньше угол $\omega$. Чем больше наклон канавок, тем лучше отводится стружка, но меньше жесткость сверла и прочность его режущих кромок, т.к. на длине рабочей части сверла увеличивается объем канавки, также увеличивается и передний угол на режущих кромках. У стандартных сверл $\omega$ больше для вязких материалов, образующих сливную стружку. Для алюминия, силумина, меди $\omega = 35 \div 45°$.

***Передний угол*** $\gamma$ измеряется в главной секущей плоскости NN, перпендикулярной проекции главной режущей кромки на основную (диаметральную) плоскость OO, проходящую через вершину и ось сверла. Измеряют $\gamma$ и в плоскости, перпендикулярной к главной режущей кромке. Угол $\gamma$ образуется касательной к следу передней поверхности в рассматриваемой точке режущей кромки и нормально в той же точке к окружности ее вращения вокруг оси сверла. Величина угла $\gamma$ зависит от угла наклона винтовой канавки $\omega$. С приближением к периферии сверла с увеличением угла $\omega_x$ возрастает и значение $\gamma_x$. На периферии $\gamma$ достигает 25÷30°; у поперечной кромки он может быть и отрицательным.

***Задний угол*** $\alpha$ образуется касательной к следу задней поверхности сверла в заданной точке режущей кромки и к окружности ее вращения вокруг оси сверла. Задние углы режущей кромки также переменные: на периферии сверла $\alpha = 8 \div 14°$, вблизи поперечной кромки 20÷25°.

**Угол наклона поперечной кромки** $\psi$ расположен между проекциями главной и поперечной режущих кромок на плоскость, перпендикулярную от сверла. У стандартных сверл $\psi = 50 \div 55°$.

Переменные значения углов $\gamma$ и $\alpha$ создают неодинаковые условия резания в различных точках режущей кромки. У периферии сверла, где угол $\gamma$ сравнительно большой, а скорость максимальная, стружка отделяется легко, меньше деформируется, но условия отвода тепла плохие. Вблизи поперечной кромки угол $\gamma \le 0$, условия резания неблагоприятные, сильно деформируются прилегающие участки стружки, большое тепловыделение. Особенно в тяжелых условиях работает поперечная кромка сверла, она не режет, а выдавливает материал, сильно его деформирует. Недостаток геометрии сверла – отсутствие заднего угла у ленточек. Это вызывает трение и повышает температуру ленточек, тем самым усиливая их износ вблизи уголков – места сопряжения ленточек с главными режущими кромками.

Скорость резания при сверлении – окружная скорость на периферии сверла:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000},\ \text{м/мин}.$$

Глубина резания:

$$t = D / 2,\ \text{мм}.$$

Крутящий момент на шпинделе станка:

$$M_{шп.} = 716200 \cdot 1{,}36 \frac{N_{шп.}}{n}, \text{ кГмм},$$

$$N_{шп.} = N_{дв} \cdot \eta, \text{ кВт}$$

Зная момент сопротивления резанию $M$, эффективная мощность:

$$N_e = \frac{M \cdot n}{716200 \cdot 1{,}36} = \frac{M \cdot v}{3960}, \text{ кВт.}$$

Мощность электродвигателя станка:

$$N_{дв.} = N_в / \eta.$$

Износ сверла (по задней поверхности):

$$h_з = C_h \cdot T^{1{,}42} \cdot v^{4{,}85} \cdot S^{2{,}35}, \text{ мм.}$$

Стойкость сверла

$$T = C / v^{4m},$$

где $m$ = 0,125÷0,5 в зависимости от обрабатываемого материала и материала сверла; С коэффициент, зависящий от материалов заготовки и сверла и условий обработки.

Свойства обрабатываемого материала и материала инструмента влияют на скорость резания по аналогии с точением:

$v = \frac{C}{\sigma_B^x} = \frac{C}{\sigma_B^{0,9}}$ при обработке деталей из углеродистых и легированных сталей.

$v = \frac{C'}{HB^{x'}} = \frac{C'}{HB^{1,3}}$ при обработке деталей из серых и ковких чугунов.

Формулы для подсчета скорости резания, допускаемой сверлом:

$$v = \frac{C_v D^{z_v}}{T^m S^{y_v}} \cdot K_v \text{ – для сверления;}$$

$$v = \frac{C_v D^{z_v}}{T^m t^{x_v} S^{y_v}} \cdot K_v \text{ – для рассверливания.}$$

Подача, допустимая прочностью сверла:

$$S = 4{,}46 \cdot \frac{D^{0,81}}{\sigma_B^{0,94}}, \text{ мм/об – для стали;}$$

$$S = 7{,}34 \cdot \frac{D^{0,81}}{HB^{0,75}}, \text{ мм/об – для чугуна;}$$

Машинное время:

$$T_м = \frac{L}{nS} i = \frac{l + y + y_1}{nS} i, \text{ мин.}$$

***Выбор рационального режима резания*** сводится к подбору наиболее выгодного сочетания подачи и скорости при заданных условиях обработки отверстия, при котором процесс сверления будет наиболее производительным и экономичным, режущие способности инструмента, кинематические возможности и мощность станка будут использованы рационально, а техно-

логические требования выполнены. Режимы резания назначаются в следующей последовательности:

1. Выбирается сверло (тип, материал) и рациональная геометрия его режущей части: форма заточки, величина режущих элементов, углы, исходя из условий сверления (обрабатываемого материала, глубины сверления, диаметра отверстия и др.)

2. Определяется (по нормативам или расчетным путем) максимально допустимая подача, исходя из свойств обрабатываемого материала, прочности сверла, требуемой точности, шероховатости. выбранная подача сверяется с паспортом станка и принимается ближайшая меньшая. Проверяется, допускает ли механизм подачи станка указанную подачу, для чего подсчитывается осевая сила $P_o$ и сравнивается с силой $P`_o$, допускаемой механизмом подачи станка по паспорту. Если $P_o > P`_o$, то соответственно уменьшают подачу.

3. Назначается период стойкости сверла по нормативам.

4. По выбранным подаче и стойкости определяется скорость (по нормативам или расчетным путем), допускаемая сверлом, и подсчитывается $n = 1000v / \pi D$, м/мин.

5. Определяется мощность $N_e$ и сопоставляется с $N_{шп.}$. Если $N_e > N_{шп.}$, то уменьшают $n$ соответственно отношению $N_{шп.} / N_e$ и вновь производят корректировку $n$ по паспорту и подсчитывают скорость резания.

6. По выбранному числу оборотов и подаче подсчитывают машинное время.

## Станки для обработки отверстий

Сверлильные станки предназначены для обработки отверстий сверлами, зенкерами, развертками, плашками и осевыми комбинированными инструментами. Также они служат для нарезания внутренних резьб, при получении конических и цилиндрических углублений, для обработки плоских торцов цековками, вырезания дисков и колец из листовых заготовок.

Сверлильные станки входят в сверлильно-расточную группу и представлены в ней тремя типами станков:

1) Вертикально-сверлильные станки (настольные и напольные). 2Н135 – две последние цифры указывают на ∅ просверливаемого отверстия – 35 мм.

2) Радиально-сверлильные станки – на базе вертикально-сверлильных станков, но их технологические особенности по обработке тяжелых и крупногабаритных заготовок шире. 2К52, 2Н53, 2М55, 2М58 (последние две цифры указывают на ∅ отверстий).

3) Специальные и специализированные сверлильные станки – для выполнения работ в условиях массового и крупносерийного производства. Они применяются для сверления отверстий в коленвалах, фильерах, распылителях, для обработки центровых отверстий, для глубокого сверления и др.).

ОС-401А – станок для глубокого сверления спиральными сверлами вертикального исполнения.

ОС-901 – станок для глубокого сверления спиральными сверлами горизонтальной компоновки ружейными сверлами (горизонтальной компоновки).

***Расточные станки*** обрабатывают в основном базовые, корпусные детали, от точности обработки которых зависит качество механизмов и машин. Обрабатывают отверстия, точно координированные относительно друг друга и расположенные в одной или нескольких плоскостях. Также производят сверление, зенкерование, развертывание, растачивание, нарезание резьбы, торцовое обтачивание плоскостей и фрезерование, выполнение этих операций возможно благодаря значительному числу формообразующих и вспомогательных движений в универсальных расточных станках.

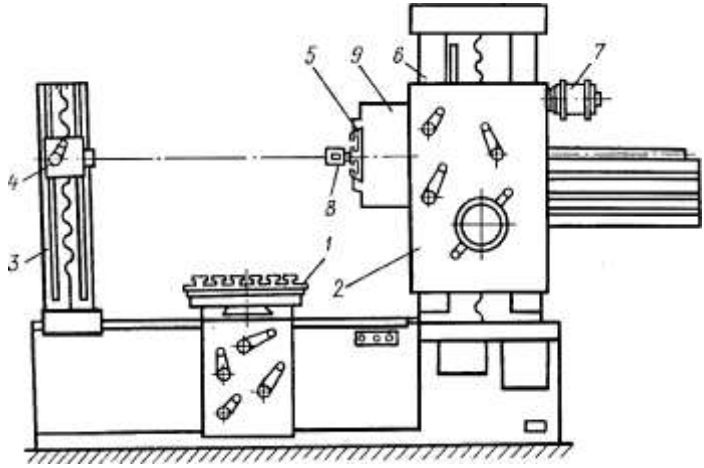



*Рис. 157. Схема горизонтально-расточного станка*

Марки станков: 2620В; 2Е656; 2421.

Различают горизонтально-расточные, координатно-расточные, отделочно-расточные станки.

### Фрезерование

Один из наиболее распространенных видов обработки плоскостей, пазов с прямолинейным и винтовым направлением, а также фасонных поверхностей. Фрезерование применяется и для обработки тел вращения.

Главное движение – вращение фрезы, движение подачи – обычно поступательное перемещение заготовки. Движение подачи может быть также вращательным – вращение заготовки вокруг своей оси (резьбофрезерование и обработка тел вращения) или вокруг оси вращающегося стола или барабана станка (карусельно-фрезерные и барабанно-фрезерные станки).

### Элементы фрез и режимы резания

Фреза любой конструкции – сложный инструмент, состоящий из ряда элементарных инструментов – резцов соответствующей геометрии.

Зуб фрезы имеет (аналогично резцу) главную, переходную и вспомогательную режущие кромки. Главный угол в плане $\varphi$ – угол, образованный

проекцией главной режущей кромки на основную плоскость, проходящую через вершину зуба и ось фрезы, и направлением подачи. Вспомогательный угол в плане $\varphi_1$ – угол, образованный проекцией вспомогательной режущей кромкой на основную плоскость и направлением подачи.

Два основных видов фрезерования – цилиндрическое и торцовое.

Несмотря на многообразие фрез и конфигураций обрабатываемых поверхностей, схема работы каждой фрезы будет соответствовать цилиндрическому или торцовому фрезерованию.

Фрезы – цилиндрические, дисковые, концевые, торцовые, фасонные, прорезные.

К элементам резания относятся: глубина резания t в мм, подача S в мм, скорость резания v в м/мин, ширина фрезерования B в мм. Глубиной резания t называется расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями, измеренное нормально к последней. Подачей называется величина перемещения обрабатываемой заготовки относительно фрезы. При размерности подачи: подачу на один зуб фрезы $S_z$ мм/зуб – величину перемещения заготовки относительно фрезы при ее повороте на один зуб, т.е. на угол $\varepsilon = 360°/z$ ($z$ – число зубьев фрезы), подачу на один оборот фрезы $S_o$ – величину перемещения заготовки на один оборот фрезы $S_o = S_z \cdot z$ мм/об, минутную подачу $S_м$ – величину перемещения заготовки за одну минуту $S_м = S_o \cdot n$ мм/мин ($n$ – число оборотов фрезы в мин).

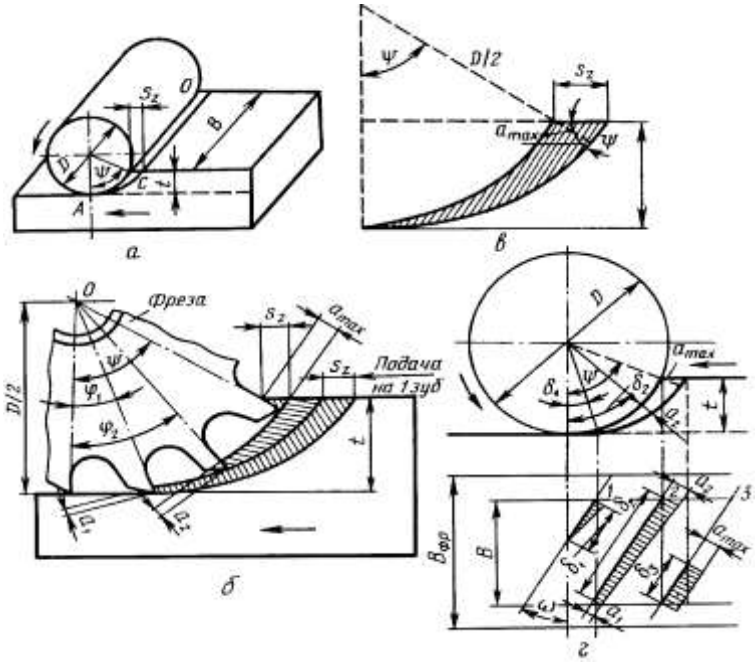



*Рис. 158. Элементы режима резания при фрезеровании*

Скорость резания при фрезеровании – скорость главного движения – вращения фрезы:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}, \text{ м/мин.}$$

Ширина фрезерования $B$ – величина обрабатываемой поверхности, измеренная в направлении, параллельном оси фрезы.

Толщина срезаемого слоя $a$ – расстояние между поверхностями резания, образованными режущими кромками двух смежных зубьев фрезы. Изменяется она нормалью к поверхности резания.

$$a_{\max} = S_z \cdot \cos(90^0 - \psi) = S_z \cdot \sin\psi, \text{мм}$$

Угол контакта фрезы $\psi$ – центральный угол, соответствующий дуге соприкосновения фрезы с заготовкой (измеряется в плоскости, перпендикулярной оси фрезы). Толщина срезаемого слоя в любой точке контакта – мгновенная толщина:

$$a_м = S_z \cdot \sin\psi_м,$$

где $\psi_м$ – мгновенный угол контакта. Таким образом, $a_м$ плавно возрастает от нуля до $a_{max}$, а затем быстро уменьшается до нуля.

Ширина срезаемого слоя $b$ – длина контакта режущей кромки зуба с заготовкой, измеренная по поверхности резания.

Площадь поперечного сечения среза $F$ меняется в зависимости от положения зуба на дуге контакта в каждой точке может быть определена по формуле:

$$F_м = a_м \cdot b_м, \text{ мм}^2.$$

Число одновременно работающих зубьев $z_i = \psi / \varepsilon$, где $\psi$ – угол контакта фрезы: $\varepsilon = 360° / z$ – угловой шаг зубьев, следовательно:

$$z_i = \psi z / 360.$$

У винтовой цилиндрической фрезы режущие кромки входят в контакт с заготовкой и прекращают резание постепенно. Ширина срезаемого слоя плавно возрастает от нуля до $b_{max}$, а затем также плавно уменьшается до нуля.

При торцовом фрезеровании – в зависимости от расположения оси торцовой фрезы относительно оси симметрии обрабатываемой поверхности (в направлении подачи) различают симметричное и несимметричное фрезерование. При симметричном фрезеровании ось фрезы совпадает с осью симметрии обрабатываемой поверхности.

Глубина резания t определяется, как у цилиндрического фрезерования. Шириной фрезерования B является раздел обрабатываемой поверхности в направлении, перпендикулярном подаче. Толщина срезаемого строя при симметричном фрезеровании достигает максимальной величины при угле контакта $\psi = 90°$ и равна подаче на зуб ($a_{max} = S_z$).

### Особенность процесса резания при фрезеровании

Особенность любой схемы фрезерования – прерывистость резания каждым зубом фрезы. Каждый зуб находится в контакте с заготовкой и режет металл только на некоторой части оборота, а затем вращается, не каса-

ясь заготовки до следующего врезания.

Периодичность работы зубьев фрезы приводит к ударному приложению нагрузки в момент врезания, вибрациям, повышенному износу зубьев и выкрашиванию твердого сплава, что отрицательно сказывается на точности и шероховатости обработанной поверхности.

***Фрезерование против подачи и по подаче.*** Существуют два способа фрезерования:

а) против подачи (встречное фрезерование), когда направление подачи противоположно направлению вращения фрезы;

б) по подаче (попутное фрезерование), когда направление подачи и вращение фрезы совпадают.

При встречном фрезеровании нагрузка на зуб вырастает от нуля до максимума, причем зубья фрезы, действуя на заготовку, стремятся «оторвать» ее от стола станка или занимаемого приспособления, что приводит к вибрации системы СПИД и увеличению шероховатости обрабатываемой поверхности детали. Преимущество – работа зубьев фрезы «из под корки».

При попутном фрезеровании зуб, врезавшись, начинает работать с максимальной толщиной срезаемого слоя, и естественно, с максимальной нагрузкой. Это исключает начальное проскальзывание зуба, уменьшает интенсивность износа зубьев по задним поверхностям, в силу чего примерно в 2-3 раза увеличивается стойкость фрезы.

Попутное фрезерование дает улучшение шероховатости обработанной поверхности и более высокую точность, так как зубьями фрезы заготовка во время работы прижимается к столу станка, что уменьшает вибрации, несколько снижается мощность, затрачиваемая на резание (фрезе не приходится преодолевать силу подачи).

Рекомендации: применение попутного фрезерования для проходов чистовых, при отсутствии корки, на станках с компенсаторами зазоров в узлах станка; Фрезерование против подачи – для предварительной обработки и особенно «по корке» или при работе твердосплавными фрезами.

### Силы резания и мощность

При работе цилиндрической фрезой с прямым зубом равнодействующая сил резания $R$ расположена в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы; в свою очередь фреза действует на обрабатываемую заготовку с реактивной силой $R`$, равной $R$ и противоположно направленной. Сила $R$ может быть разложена на окружную силу $P_z$ (тангенциальная сила) и радиальную силу $P_y$ – направленную по радиусу к центру.

Окружная сила $P_z$ производит основную работу резания, по ней производится расчет крутящего момента, мощности, необходимой на резание, а также деталей и узлов механизма главного движения станка.

Радиальная сила $P_y$ изгибает оправку, на которой крепится фреза и давит на подшипники шпинделя станка. $P_y = (0{,}6 \div 0{,}8)\ P_z$.

Осевая сила $P_o$ действует в осевом направлении на шпиндель станка, а через обрабатываемую заготовку на зажимное приспособление и механизм поперечной подачи стола. В обычных условиях $P_o = (0{,}35 \div 0{,}55)\ P_z$.

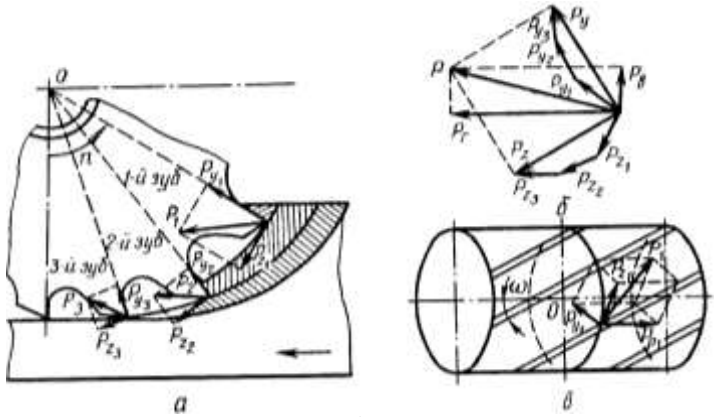



*Рис. 159. Силы резания при фрезеровании цилиндрической фрезой с зубом: а и б – прямым; в – наклонным*

Горизонтальная составляющая сила $P_H$ является силой подачи, она нагружает механизм подач станка и приспособления для закрепления заготовок.

Вертикальная составляющая сила $P_v$ нагружает механизм вертикальной подачи стола, а также стремится прижать стол к его направляющим при попутном фрезеровании или наоборот поднять его над ними при встречном.

Окружная сила резания $P_z$ определяется по формуле:

$$P_z = \frac{C_{pz} t^{X_{pz}} s^{Y_{pz}} BZ}{D^{q_{pz}}}, \text{ кГ},$$

где $C_{pz}$ – коэффициент, соответствующий силе $P_z$ при значении всех факторов, равных единице; $t$ – глубина фрезерования в мм; $S_z$ – подача на один зуб фрезы в мм; $B$ – ширина фрезерования в мм; $z$ – число зубьев фрезы; $D$ – диаметр фрезы в мм.

Коэффициент $C_{pz}$ и показатели степени зависят от вида фрез и приводятся в справочных материалах по режимам резания.

Мощность $N_e$, необходимая на резание, подсчитывается по окружной силе $P_z$ и скорости резания ν:

$$N_e = \frac{P_z \cdot v}{75 \cdot 60 \cdot 1{,}36}, \text{ кВт}.$$

Можно определить $N_e$ и по экспериментальной формуле (без определения $P_z$):

$$N_e = C_N \cdot 10^{-5} \cdot t^{X_N} \cdot S_z^{Y_N} \cdot D^{q_N} \cdot B \cdot z \cdot n, \text{ кВт}.$$

По таблицам режимов резания выбираются соответствующие $C_N$ и показатели степени в зависимости от вида фрезы, ее материала, твердости и свойств материала обрабатываемой детали.

Мощность электродвигателя главного движения:

$$N_{дв.} = N_e / \eta, \text{ кВт},$$

где $\eta$ – КПД цепи главного движения.

Мощность подачи обычно не превышает 5% от мощности резания.

На скорость резания, допускаемую режущими свойствами инструмента, влияет ряд факторов, из которых одни являются постоянными для определенных условий обработки: рациональная геометрия фрезы, обрабатываемый материал, режущий материал инструмента, охлаждение; а другие – переменными: стойкость фрез, глубина резания, подача на зуб фрезы, ширена фрезерования и др.

Общий вид формулы скорости резания, допускаемой режущими свойствами фрезы:

$$v = \frac{C_v \cdot D^{q_v} \cdot \omega^{P_v} \cdot K}{T^m \cdot t^{X_v} \cdot S_Z^{Y_v} \cdot B^{Z_v} \cdot Z^{n_v}}, \text{ м/мин.}$$

где $C_v$ – коэффициент, соответствующий скорости $v$, при всех влияющих факторах, равных единице; $K$ – общий поправочный коэффициент, вводимый при наличии отклонений от обычных принятых условий обработки.

Машинное время $T_м$ одного прохода определяют по формуле:

$$T_м = \frac{l + y + y_1}{S_м} = \frac{l + y + y_1}{S_z \cdot z \cdot n}, \text{ мин,}$$

где $l$ – длина обрабатываемой поверхности в мм; $y$ – путь врезания фрезы в мм; $y_1$ – 1÷5 мм – величина пути пробега фрезы.

*Преимущества торцового фрезерования:*

1. Большая производительность, угол контакта с обрабатываемой заготовкой $\psi$ больше, число одновременно работающий зубьев больше, выше равномерность фрезерования.

2. Площадь сечения срезаемого слоя при симметричном фрезеровании почти не изменяется на всей дуге контакта зуба фрезы с заготовкой. Меньше интенсивность износа зубьев на задних поверхностях.

3. Удобнее армировать пластинами твердого сплава, опасность выкрашивания меньше, чем у цилиндрических.

4. Крепление торцовых фрез более жесткое в связи с их малым вылетом.

### Выбор рационального режима резания

Порядок выбора элементов режима резания такой же, как и для других видов обработки. Выгоднее всего работать с максимально возможными глубиной и шириной резания, максимальной технологически допустимой подачей и с соответствующей скоростью резания.

1. Глубина резания выбирается в зависимости от припуска на фрезерование, мощности привода и жесткости станка, способа закрепления обрабатываемой заготовки. Можно снимать весь припуск за один проход. При повышенных требованиях к точности и шероховатости обрабатываемой поверхности припуск снимают за два прохода – предварительного и чистового. Для чистового оставляют припуск 0,75-2 мм.

2. По установленным глубине резания, подаче и рекомендуемой рациональной стойкости фрезы определяется скорость резания, допускаемая режущими свойствами фрезы (по формулам или нормативным таблицам).

3. По скорости резания определяется требуемое число оборотов шпинделя:

$$n = 1000v / \pi D, \text{ об/мин},$$

где $D$ – диаметр фрезы в мм.

4. По принятым подаче $s_z$ и числу оборотов определяют минутную подачу $s_м = s_z \cdot z \cdot n$, мм/мин.

5. По принятой скорости резания определяется мощность, необходимая на резание $N_e$. Если окажется, что мощность на шпинделе станка $N_{шп} < N_e$, то необходимо уменьшить скорость резания или число оборотов (при выбранной фрезе), с тем, чтобы $N_{шп} \geq N_e$.

Машинное время определяется в соответствии с принятой минутной подачей $s_м$.

## Фрезерные станки

***Станки общего назначения***. Консольно-фрезерные (вертикально-фрезерные, горизонтально-фрезерные, универсальные и широкоуниверсальные); бесконсольно-фрезерные (с неподвижной или подвижной шпиндельной головкой, с круглым столом, с копировальным устройством); продольно-фрезерные (одностоечные горизонтальные или вертикальные); двухстоечные с двумя или более шпинделями; карусельно-фрезерные (с одним или более шпинделями). 6Р83 – горизонтально-фрезерный; 6Р81Ш – широкоуниверсальный; 6А23 – карусельно-фрезерный; 6650 – продольно-фрезерный.

***Станки специального назначения***. Копировально-фрезерные, иглице- и шпоночно-фрезерные, барабанно-фрезерные, фрезерные станки с ЧПУ и др.

В основу классификации станков фрезерной группы положены признаки: положение оси шпинделя, выполняемые операции, конструктивные особенности, наличие программного управления и др.

***Вертикально-фрезерные станки***. Их отличительная особенность – вертикальное положение оси шпинделя и наличие подвижной консоли, на которой расположены салазки и стол.

Станки непрерывного фрезерования (карусельно- и барабанно-фрезерные).

## Делительные приспособления

Приспособления, позволяющие разделить окружность на равные или неравные части. К ним относятся делительные головки и круглые столы. Заготовки закрепляют на них в патронах, цангах, между центрами.

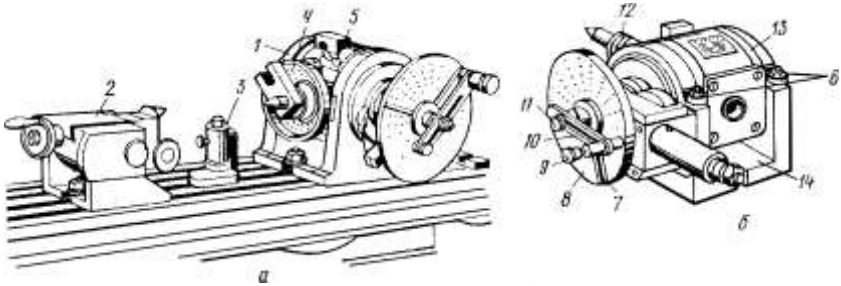



*Рис. 160. Универсальная делительная головка (а) и делительная бабка (б)*

Периодический поворот обрабатываемой детали на определенный угол при помощи делительной головки достигается способами ***непосредственного, простого, и дифференциального деления***.

*Простое деление производят по лимбу 4 вручную на требуемый угол по имеющейся на нем градусной шкале или отверстиям, просверленным на его тыльной стороне. При обработке лимб закрепляется фиксатором, входящим в соответствующее отверстие лимба непосредственного деления.*

$N = \frac{z}{K}$ – характеристика делительной головки; $K$ – число заходов.

Для 8 делений (зубьев): $n = \frac{N}{z} = \frac{40}{8} = 5$ оборотов.

*Простое деление – деление окружности на части при неподвижном делительном лимбе.*

Для 25 делений: $n = \frac{N}{z} = \frac{40}{25} = 1\frac{15}{25} = 1\frac{3}{5}$.

Для дробной части поворота на делительном лимбе необходимо подобрать число отверстий, кратное 5 (например, 30, 35). Тогда для поворота на $\frac{3}{5}$ оборота рукоятки требуется повернуть ее на 18 шагов (расстояний между соседними отверстиями) на диаметре с числом отверстий 30 и зафиксировать штифтом в соответствующем отверстии лимба ($n = \frac{N}{z} = \frac{40}{25} = 1\frac{15}{25} = 1\frac{3}{5} = 1\frac{18}{30}$. Поворот необходимо производить на 19 отверстий, т.е. на одно отверстие больше расчета.

*Метод дифференциального деления – применяют в тех случаях, когда на делительном диске нет окружности с числом отверстий, равным или кратным числу, на которое следует разделить деталь.*

В данном случае делительный диск освобождается от фиксатора и для деления выбирается приближенное число $z_o$, близкое к числу z. $z_o$ удобно брать кратным 5 или 10. Для исключения образующейся ошибки при делении на $z_o$ частей вместо z, лимб дополнительно вращают через гитару смен-

ных колес, присоединяемую к делительной головке. Ошибка в повороте рукоятки будет равна $40 \times (\frac{1}{z} - \frac{1}{z_o})$.

Для устранения ошибки рукоятке необходим дополнительный поворот, равный $\frac{1}{zi}$, где $\frac{1}{z}$ - требуемый поворот заготовки, а $i$ – передаточное отношение от шпинделя (заготовки) к лимбу. Таким образом, передаточное отношение сменных колес гитары $i = 40(z_o - z) / z_o$.

Вращение делительного диска осуществляется от шпинделя через гитару сменных колес.

## Строгание и долбление

Применяется для обработки плоскостей и несложных фасонных поверхностей с прямолинейными образующими в единичном и мелкосерийном производстве. Строгание производится на поперечно-строгальных и продольно-строгальных станках, а долбление – на долбежных. В качестве режущих инструментов соответственно применяются строгальные и долбежные резцы.

В поперечно-строгальных станках, а также на долбежных движение резания сообщается резцу. Резание производится при поступательном движении резца, а возвратное движение является холостым ходом.

На продольно-строгальных станках, предназначенных для обработки длинных заготовок, движение резания сообщается столу с заготовкой, а движение подачи производится резцами.

При чистовом строгании можно получить чистоту обработанной поверхности, соответствующей 6-7 классам. При благоприятных условиях резания – повышенная жесткость системы СПИД, небольшая глубина резания, правильно подобранная смазывающе-охлаждающая жидкость – и других факторах, чистота обработанной поверхности может быть повышена до 8 класса, а точность доведена до 2 класса (6-8 квалитет).

Процесс резания при строгании и долблении протекает так же, как и при точении. Вместе с тем строгание и долбление имеют существенные особенности. В начале каждого рабочего хода резец при входе в обрабатываемый материал испытывает удар о заготовку, что отрицательно сказывается на его прочности и стойкости. Наличие ударных нагрузок ограничивает возможность применения износостойких, но хрупких твердых сплавов.

Наибольшее распространение для строгания получили изогнутые резцы – у них нет дополнительного внедрения резца в металл и колебания глубины резания – что определяет повышение класса чистоты обработанной поверхности.

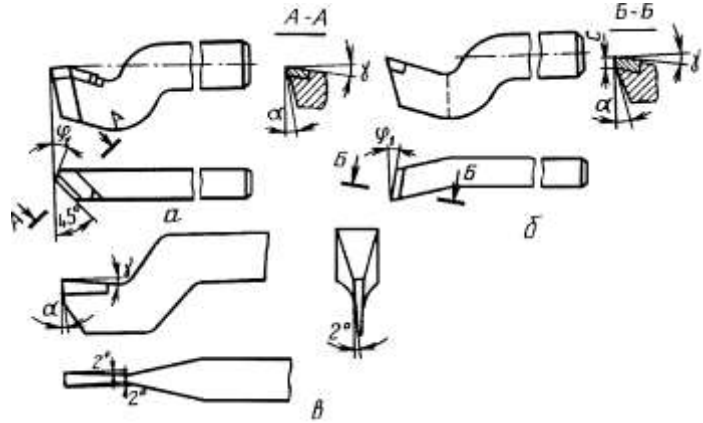



*Рис. 161. Строгальные резцы: а – проходной; б – подрезной; в – отрезной*

***Углы резца***: $\gamma$ делается на 5-10° меньше, чем у токарных, положительный $\lambda$ (до 15-20°) для упрочения режущей части. Задний угол $\alpha$ = 6-14°; $\varphi$ – угол в плане у проходных строгальных резцов 30÷75°; вспомогательный угол в плане $\varphi_1$ = 10÷30° у проходных и подрезных резцов и 2-3° у отрезных и прорезных.

### Элементы резания и срезаемого слоя при строгании

***Глубиной резания*** при строгании называется величина слоя металла, срезаемого резцом за один проход, и измеренного в направлении, перпендикулярном к обработанной поверхности.

***Подачей*** называется перемещение резца или заготовки (периодическое) в направлении подачи за один двойной ход.

***Толщина срезаемого слоя a*** измеряется в направлении, перпендикулярном главной режущей кромке в плоскости, перпендикулярной главному движению.

***Ширина срезаемого слоя b*** по поверхности резания вдоль главной режущей кромки.

$$a = s \cdot \sin\varphi \text{, мм;} \quad b = \frac{t}{\sin\varphi} \text{, мм.}$$

При долблении для большинства работ $\varphi$ = 90° и $\lambda$ = 0°, тогда:

$$a = s;\ b = t$$

Площадь поперечного сечения срезаемого слоя

$$F = a \cdot b = s \cdot t \text{, мм}^2.$$

Средняя скорость рабочего хода:

$$v_p = \frac{L \cdot n(1+m)}{1000} \text{, м/мин,}$$

где $L$ – длина хода в мм; $n$ – число двойных ходов в мин; $m = v_p / v_{хол}$ – находится по паспорту станка, обычно $m$ = 0,7÷0,75.

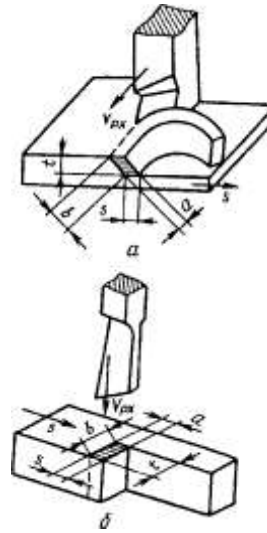


*Рис. 162. Элементы режима резания при строгании (а) и долблении (б)*

### Силы резания, мощность и скорость резания при строгании и долблении. Машинное время

Равнодействующая сила $R$ (сила сопротивления резанию), приложенная к резцу, так же, как и при точении, может быть разложена на три взаимно перпендикулярные составляющие силы: $P_z, P_y, P_x$.

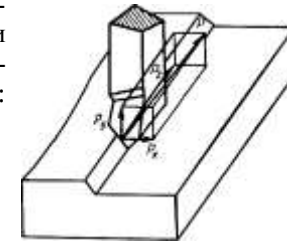


*Рис. 163. Схема сил, действующих на строгальный резец*

На силы резания при строгании оказывают влияние те же факторы, что и при точении, и поэтому определение величин $P_z$, $P_y$, $P_x$ производится по формулам точения:

$$P_z = C_{P_z} \cdot t^{X_P} \cdot s^{Y_P} \cdot K_{P_z}, \text{ кГ}.$$

Значение коэффициента $C_{P_z}$, показателей степени $X_P, Y_P$, а так же поправочных коэффициентов, входящих в общий поправочный коэффициент $K_{P_z}$, выбираются из соответствующих таблиц, приводимых в справочниках по режимам резания.

Мощность, необходимая на резание, при строгании рассчитывается по формуле:

$$N_e = \frac{P_z \cdot v_P}{75 \cdot 60 \cdot 1{,}36}, \text{ кВт}.$$

$$N_p = \frac{P_Z \cdot v}{1020 \cdot 60} \le N_П = N_Э \cdot \eta,$$

где $N_e$ – мощность, необходимая на резание; $P_Z$ – главная составляющая силы резания, Н; $N_p$ – мощность резания, кВт; $v$ – средняя скорость рабочего хода, м/мин; $N_э$ – мощность электродвигателя станка; $\eta$ – КПД станка; $N_П$ – мощность на ползуне станка.

Расчетная мощность приводного электродвигателя станка:

$$N_{дв.} = N_e / \eta_{ст}, \text{ кВт}.$$

Скорость резания, допускаемая режущими свойствами строгального или долбежного резца, подсчитывается по формуле:

$$v = \frac{C_v}{T^m \cdot t^{X_v} \cdot s^{Y_v}} \cdot K_v, \text{ м/мин},$$

где $C_v$ – коэффициент, характеризующий постоянные факторы процесса резания; $T$ – стойкость резца в минуту (рекомендуется 120-140 мин); $t$ – глубина резания, мм; $s$ – подача в мм за один двойной ход; $m$, $X_v$, $Y_v$ – показатели степеней; $K_v$ – общий поправочный коэффициент, вводимый при наличии отклонений от обычных принятых условий обработки.

Машинное время строгания подсчитывается по формуле:

$$T_M = \frac{B + y + y_1}{n \cdot s} \cdot i, \text{ мин},$$

где $B$ – ширина обрабатываемой заготовки в мм; $y = t / \operatorname{tg}\varphi$ – врезание резца, мм; $y_1 = 2 \div 3$ мм – боковой сбег резца в направлении подачи; $i$ – число проходов; $n$ – число двойных ходов в минуту.

### Выбор рационального режима резания при строгании

Методика выбора элементов режима резания при строгании такая же, как и при точении.

1. Определяется глубина резания в зависимости от припуска, требований к точности и классу чистоты обработанной поверхности, мощности двигателя станка.

2. Выбирается максимальная технологически допустимая подача в зависимости от точности и шероховатости обработанной поверхности, прочности режущей части резца.

3. По установленным глубине резания, подаче и стойкости резца определяют скорость резания $v_p$, допускаемую режущими свойствами резца.

4. По найденной скорости резания определяют соответствующее число двойных ходов в минуту:

$$n = \frac{1000 \cdot v_p}{L(1+m)}, \text{ дв. ход/мин.}$$

По принятому числу двойных ходов определяется действительная скорость резания:

$$v_{р.д.} = \frac{L \cdot n(1+m)}{1000}, \text{ м/мин.}$$

5. Проверяется наличие достаточной мощности электродвигателя станка:

$$N_{дв.} > \frac{P_Z \cdot v_{р.д.}}{75 \cdot 60 \cdot 1{,}36 \cdot \eta_{ст.}} \geq \frac{P_Z \cdot v_{р.д.}}{1020 \cdot 60 \cdot \eta_{ст.}}.$$

Если мощность электродвигателя станка $N_{дв.}$ недостаточна, то соответственно уменьшается число двойных ходов.

Также необходимо проверить достаточность тяговой силы $P_{ст.}$ (при большой глубине резания и подаче):

$$P_{ст.} > P_Z,$$

где $P_{ст.}$ приводится в паспорте станка.

*Лекция 10*

## ШЛИФОВАНИЕ. ШЛИФОВАЛЬНЫЙ И АБРАЗИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ

***Особенности метода.*** Обработка осуществляется абразивным инструментом (шлифовальные круги, бруски, сегменты, шкурки и т.п.), абразивные зерна которых являются режущими элементами.

Абразивные зерна в инструменте закреплены связующим компонентом – связкой с обязательным наличием пор.

Особенностью шлифования является одновременное микрорезание несколькими зернами, каждое из которых имеет два-три режущих лезвия и более, у каждого режущего лезвия – свои угловые параметры – $\alpha$, $\beta$, $\gamma$, $\varphi$, $\varphi_1$, $\lambda$. Передний угол $\gamma$ у режущих лезвий зерен часто бывает отрицательным.

Зерна, закрепленные связкой в инструменте, находятся на различном уровне, и чем меньше толщина срезаемого слоя, тем меньше зерен участвует в резании. Чем больше зерен участвует в резании, тем меньше шероховатость обработанной поверхности.

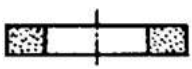
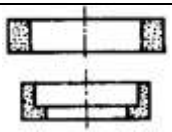
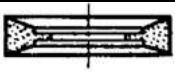
Ввиду геометрических особенностей режущих элементов абразивного инструмента, больших скоростей резания, снятие припуска происходит с большим выделением теплоты (1000-1500°С). Это оказывает влияние на физико-химические и эксплуатационные свойства обрабатываемой поверхности. Во избежание или для уменьшения влияния высокой температуры и силовых факторов, необходимы обильное охлаждение (СОЖ), оптимальные характеристики круга, шлифование, правящий инструмент и режимы правки.

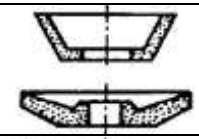
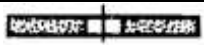
### 1. Абразивные инструменты

К абразивным инструментам относятся круги для шлифования деталей и затачивания инструментов, для разрезания металлов, сегменты и бруски.

Абразивный инструмент характеризуется формой и размерами, материалом абразивных зерен, связующим веществом, зернистостью, твердостью и структурой. Изготовляется он в соответствии со стандартами и техническими условиями.

Таблица 29. Основные формы абразивных инструментов

| Форма инструмента | Наименование, обозначение | Применение |
|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 |
|  | Плоские прямого профиля ПП | Круглое наружное и внутреннее, бесцентровое шлифование периферией круга, заточка резцов |
| | Плоские с двухсторонней конической выточкой ПВДК | Круглое шлифование с подрезкой торца |
|  | Кольца К, чашки цилиндрические ЧЦ | Плоское шлифование торцом круга |

Окончание табл. 29

| 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|
|  | Чашки конические ЧК, тарелки Т | Заточка инструмента |
|  | Диски Д | Отрезание, прорезание пазов |
| | Бруски: квадратные БКв, круглые БКр, трехгранные БТ, полукруглые БПкр | Для ручных работ |
| | Бруски: квадратные БКв, плоские БХ | Для хонингования и суперфиниша |
| | Сегменты: плоские СП, выпукло-вогнутые 1С, 2С | Для наборных кругов в зависимости от типа станка и конструкции сегментной головки или оправки |

## 2. Абразивные материалы

***Естественного происхождения***: алмаз, корунд (80-95% $Al_2O_3$), наждак (20-60% $Al_2O_3$) и кварц (зерна кварца $SiO_2$, связанные известью и глинистыми веществами).

Естественный алмаз применяется для правки шлифовальных кругов и оснащения резцов для тонкого точения цветных металлов и сплавов.

Применение абразивных материалов естественного происхождения ограничено из-за нестабильности их физико-механических характеристик или их дефицита.

***Искусственного происхождения***: электрокорунд, карбид кремния (карборунд), карбид бора, нитрид бора (эльбор) и синтетический алмаз.

***Электрокорунд*** – кристаллический $Al_2O_3$ полученный плавкой в электропечах из бокситов. Имеются следующие разновидности электрокорунда: нормальный, белый, хромистый, титанистый, монокорунд.

*Электрокорунд нормальный* содержит 92-95% $Al_2O_3$ (остальное примеси) и выпускается марок 12А, 13А, 14А, 15А, 16А.

*Электрокорунд белый* содержит меньше примесей ($Al_2O_3$ = 99%) имеет более высокую режущую способность, чем электрокорунд нормальный, и выпускается марок 22А, 23А, 24А, 25А.

*Электрокорунд хромистый* (технический рубин) содержит дополнительно до 0,3% $Cr_2O_3$. Выпускается марок 32А, 33А, 34А. Зерна имеют розовую или темно-вишневую окраску и более высокую режущую способность.

*Электрокорунд титанистый* (технический сапфир) имеет добавки $TiO_2$, что способствует режущей способности зерен, имеет марку 37А.

*Монокорунд* (марки 43А, 44А, 45А) имеет форму правильных кристаллов, не подвергнутых дроблению и измельчению, имеет добавки сульфида

железа (пирита). благодаря правильной форме зерен имеет повышенную прочность и износостойкость.

Электрокорунды применяют при обработке пластичных материалов (стали, ковкий чугун, мягкая бронза и др.).

***Карбид кремния*** (карборунд) SiC получается в электрических печах спеканием угля с кварцевым песком. Выпускается двух видов: черный (марок 52С – 55С) и зеленый (марок 62С, 64С). Зеленый карбид кремния применяют при заточке твердосплавного инструмента, черный – при обработке серого чугуна, твердой бронзы, алюминиевых сплавов.

***Карбид бора*** ($B_4C$) содержит до 94% кристаллического карбида бора. Его применяют в виде порошка для доводки твердосплавного инструмента и при притирочных работах.

***Нитрид бора*** (эльбор) – абразивный материал, состоящий из бора (43,6%) и азота (56,4%). Твердость эльбора близка к твердости алмазов, температурная стойкость достигает 1500°С, тогда как у алмаза она равна 850°С. Выпускают нитрид бора марок ЛО, ЛП. Эльборовые круги применяют для заточки инструментов из быстрорежущей стали, обработки деталей из труднообрабатываемых материалов, бруски – для хонингования закаленной стали.

Синтетические алмазы (АС) изготовляют из графита в специальных камерах при высоком давлении (10.000 МПа) и температуре 2500…2300°С. В зависимости от размера зерен, метода их получения и контроля они делятся на две группы: шлифпорошки зернистостью 630…50 мкм и микропорошки – 40…3 мкм. Шлифпоршки бывают пяти марок:

АСО – обычной прочности для изготовления инструментов на органических связках;

АСР – повышенной прочности для инструментов на керамических и металлических связках;

АСВ – высокой прочности для инструментов на металлических связках, работающих при повышенных удельных нагрузках;

АСК – более прочные, чем АСВ, рекомендуются для инструментов на металлических связках, применяемых в особо тяжелых условиях работы (хонингование закаленных чугунов и др.);

АСС – обладают наибольшей из всех марок порошков прочностью, рекомендуются для инструмента, применяемого в процессе правки абразивных кругов.

Микропорошки выпускают двух марок: АСМ – нормальной абразивной способности для обработки твердых сплавов, стали, чугуна, стекла и других материалов; АСН – повышенной абразивной способности для обработки алмазов, корундов и других особо твердых материалов.

Зернистость абразивных материалов характеризует размеры зерен. В зависимости от размеров абразивные зерна разделяют на три группы:

– шлифовальные зерна (шлифзерна);

– шлифовальные порошки (шлифпорошки);

– микропорошки.

Зернистость шлифовального круга выбирают в зависимости от свойств обрабатываемого материала и технологических требований (шероховатости

поверхности, точности).

При черновом шлифовании применяют шлифовальные круги с относительно более крупным зерном. При обработке вязких металлов выбирают шлифовальные круги также более крупнозернистые, чем при обработке твердых и хрупких металлов, во избежание «засаливания» абразивного круга.

По содержанию основной фракции абразивного порошка круги имеют индекс зернистости: В (зерен основной фракции 55…60%), П (45…55%), Н (40…45%), Д (39…41%).

***Связки абразивных инструментов***. При изготовлении шлифовальных кругов и брусков абразивные зерна соединяют связующим веществом или связкой. Связующие вещества бывают неорганические (керамическая, магнезиальная и силикатная связки), органические (бакелитовая и вулканитовая связки) и металлические.

*Керамическая связка* К приготовляется из огнеупорной глины, полевого шпата, кварца, талька, мела и жидкого стекла. Выпускаются керамические связки марок К1, К2,…К8. Круги на керамической связке имеют высокую прочность, огнеупорны, обладают химической стойкостью, не боятся влаги, хорошо сохраняют профиль, обеспечивают высокую производительность. Их недостаток – большая хрупкость.

*Бакелитовая связка* Б – искусственная смола из карболовой кислоты и формалина. Абразивные инструменты на бакелитовой связке прессуют в формах, после чего подвергают термической обработке. Круги на бакелитовой связке прочны, эластичны и могут работать при больших окружных скоростях. Их применяют при отрезании, прорезке канавок и бесцентровом шлифовании деталей. Недостаток кругов с бакелитовой связкой – разрушение от действия щелочной охлаждающей жидкости, кроме того при температуре более 180…200°С прочность связки резко уменьшается.

*Вулканитовая связка* В состоит из каучука (основа) и серы. В зависимости от содержания компонентов вулканические связки выпускают трех марок – В1, В2 и В3. Круги на вулканической связке прочны, эластичны и допускают окружные скорости до 75 м/с. Они применяются при отрезке, прорезке и бесцентровом шлифовании. Их недостаток – низкая теплостойкость. При температуре свыше 150…200°С вулканитовая связка теряет прочность. Поэтому при работе необходимо применять обильное охлаждение.

*Металлические связки* бывают порошковые и гальванические. Порошковые связки получают спеканием порошков из медных и алюминиевых сплавов. Гальванические связки (обычно на никелевой основе) выполняются способом гальванического закрепления зерен на металлическом корпусе. Металлические связки на основе бронз и алюминиево-цинковых сплавов обозначаются М1 и М5 соответственно. Металлические связки характеризуются высокой прочностью и применяются для закрепления алмазных и эльборовых зерен в кругах и брусках.

***Твердость абразивного инструмента*** характеризует сопротивляемость связки выравниванию абразивных зерен с поверхности под действием внешних сил. Ее определяют вдавливанием шарика, сверлением лунки, пескоструйной обработкой.

Абразивные инструменты на керамической связке имеют все категории твердости, инструменты на бакелитовой связке – от СМ1 до Т1. Твердость инструментов на вулканитовой связке не фиксируется.

***Выбор шлифовального круга по твердости***. Твердые материалы необходимо обрабатывать мягкими кругами (М-СМ-С). При обработке вязких материалов (цветных металлов, мягких сталей) также необходимо выбирать мягкие круги (М-СМ), но более крупнозернистые. При шлифовании фасонных поверхностей следует применять более твердые круги для сохранения фасонного профиля круга.

***Структура абразивного инструмента***. Под структурой абразивного инструмента понимают соотношение между абразивными зернами, связкой и порами. Различают четыре группы структуры (плотная, средняя, открытая, очень открытая), включающие номера от 0 до 20 в зависимости от объемного содержания абразивных зерен в инструменте.

*Плотные структуры* имеют номера 0…3 и содержат соответственно абразивных зерен (по объему) 62…56%.

*Средние структуры* имеют номера 4…8 и содержат абразивных зерен 54…46%.

*Открытые структуры* имеют номера 9…12 и содержат 44…38% абразивных зерен.

*Очень открытые структуры* имеют номера 13…20 при содержании абразивных зерен 36…22%.

Шлифовальные круги плотных структур применяют на доводочных операциях, средних – для обработки вязких материалов и финишного шлифования, открытых – для шлифования на высоких режимах резания, очень открытые – для шлифования пластмасс, дерева, кожи.

***Маркировка абразивных инструментов***. В маркировке указывают: абразивный материал, зернистость, твердость, номер структуры, связку, класс круга, допустимую окружную скорость.

Класс круга определяет допуски на его размеры, геометрическую форму и некоторые другие параметры. Круги бывают трех классов: АА, А и Б. Круги класса АА наиболее точные, а класса Б – наименее точные.

Например, маркировка 15А25НС17К1А35 м/с обозначает: электрокорунд нормальной марки 15А, зернистость 25, индекс зернистости Н, твердость средняя С1, структура №7, связка керамическая К1, класс круга А, допустимая окружная скорость 35 м/с.

Работать кругами на скоростях больших, предельно допустимых запрещается.

***Выбор, испытание и установка абразивных кругов. Техника безопасности.*** *Корундовые круги* применяют для шлифования деталей из стали, ковкого чугуна, твердой бронзы, для заточки инструментов из инструментальной стали.

*Круги из карбида кремния* применяют для шлифования деталей из серого чугуна, мягкой бронзы, латуни, алюминия и для заточки инструментов, оснащенных твердыми сплавами.

Шлифовальные круги работают при высоких окружных скоростях (до 70 м/с). Поэтому, во избежание травм при разрыве шлифовального круга, перед установкой на станок его испытывают на специальном стенде в течение 5…10 мин со скоростью, превышающей рабочую на 50…60%.

Круг устанавливается тщательно с балансировкой. Недопустимо устанавливать круг на шпиндель, имеющий радиальное биение более 0,03…0,05 мм.

Шлифовальные круги при рабочем использовании на соответствующих станках должны быть надежно защищены специальными кожухами. Необходимо установить экраны из двухслойного стекла в металлической рамке для защиты глаз рабочего от абразивной пыли. При работе применяют специальные очки для защиты глаз от пыли. Станки снабжают вентиляционными и пылеотсасывающими устройствами.

При ручной заточке инструмента на заточных станках станки снабжают подручниками для опоры инструмента.

***Алмазный инструмент*** также выпускается в виде кругов, брусков, эластичных лент, резцов и паст. Круги применяют для шлифования и заточки, бруски – для хонингования и суперфиниша, эластичные ленты – для полирования, пасты – для притирки.

Алмазное шлифование и заточка в основном применяется при обработке твердых сплавов, другие методы алмазной обработки применимы для стали и чугуна.

Алмазный круг состоит из корпуса (сталь, алюминий, пластмасса) и алмазоносного кольца (часто толщиной 1,5…3 мм).

Для изготовления алмазного инструмента типа кругов, брусков применяют связки трех видов: органические, металлические и керамические.

В органических связках в качестве связующей основы использован порошкообразный бакелит с наполнителями в виде карбида бора (Б1), железного порошка (Б2), белого электрокорунда (Б3), зеленого карбида кремния (Б4).

Металлические связки состоят из различных композиций металлов. Наиболее распространены металлические связки М1 (на бронзовой основе), МС3, МП2.

На керамической связке (К1) изготовляют круги, предназначенные для заточки твердосплавного инструмента вместе со стальной державкой.

Концентрация (содержание) алмазов в кругах – важнейшая характеристика, определяющая производительность инструмента и его стоимость. За 100%-ную концентрацию принято содержание 4,39 карата алмазов в 1 $см^3$ алмазного слоя (или 0,878 мг в 1 $мм^3$), что занимает около 25% его объема. Инструмент выпускают с концентрацией в пределах от 25 до 200% (с интервалом в 25%).

Алмазные пасты при притирке и полировании обеспечивают получение 9-14 классов шероховатости поверхности. В зависимости от процентного содержания алмазов алмазные пасты изготовляют нормальной (Н) и повышенной (П) концентраций. В зависимости от зернистости содержание по массе алмазов в пасте концентрации Н составляет от 1 до 10%, при концентрации П – от 2 дл 20%. Зернистость паст бывает от 60 до 1 мкм. По консистенции различают твердые пасты Т и мазеобразные М.

### 3. Виды шлифования. Элементы процесса резания при шлифовании

Различают наружное круглое, внутреннее круглое, бесцентровое, плоское, фасонное, резьбошлифование, зубошлифование, шлицешлифование и другие.

Наружное шлифование с продольной подачей.

Шлифование с поперечной подачей.

Круглое внутреннее шлифование.

Круглое бесцентровое наружное шлифование.

Плоское шлифование (торцом, периферией круга)

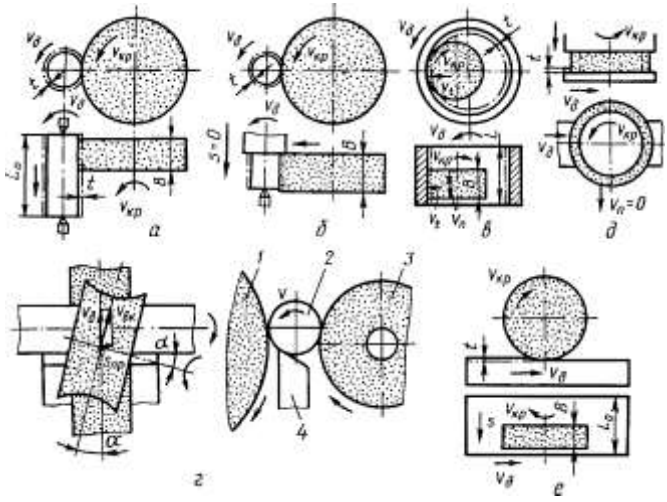


*Рис. 164 Схемы шлифования: а…е – возможные варианты*

***Элементы процесса шлифования***. Припуски (на диаметр) на шлифование валов в зависимости от диаметра, длины детали, наличия или отсутствия термообработки находятся в пределах 0,2…1,2 мм.

***Элементами режима резания*** при круглом наружном шлифовании являются:

– глубина резания (поперечная подача);

– продольная подача;

– окружные скорости круга и детали.

*Глубина резания t* – толщина срезаемого слоя металла за один проход шлифовального круга, она совпадает с поперечной подачей круга. При черновой шлифовании ее берут в пределах 0,01…0,08 мм и при чистовом – 0,005…0,015 мм.

*Продольная подача (s)* – продольное перемещение обрабатываемой детали (или круга) в мм за один оборот детали (мм/об). Подачу берут в долях от ширины В шлифовального круга. При черновом шлифовании $s$=(0,3-0,7) $B$, при чистовом $s$=(0,2…0,4) $B$, мм/об.

*Скорость резания* (м/с) – окружная скорость шлифовального круга:

$$v_K = \frac{\pi D_K \cdot n_K}{1000 \cdot 60},$$

где $D_K$ – диаметр круга, мм; $n_K$ – частота вращения круга, мин$^{-1}$. Окружную скорость кругов берут в пределах 30..35 м/с. Для специальных высокоскоростных кругов окружная скорость может доходить до 70 м/с.

Скорость вращения детали:

$$v_Д = \frac{\pi \cdot D_Д \cdot n_Д}{1000},$$

где $D_Д$ – диаметр детали, мм; $n_Д$ – чистота вращения детали, об/мин.

Обычно при шлифовании окружные скорости вращения обрабатываемой детали из стали и чугуна находятся в пределах 20…60 м/мин.

Объем металла (мм$^3$) срезаемой за один оборот обрабатываемой детали:

$$Q = \pi \cdot D_Д \cdot ts,$$

где $D_Д$ – диаметр обрабатываемой детали; $t$ и $s$ – глубина резания и продольная подача, мм.

### 4. Силы резания и мощность при шлифовании

При шлифовании радиальная сила $P_y = (1{,}5…3)\ P_z$, где $P_z$ – касательная сила.

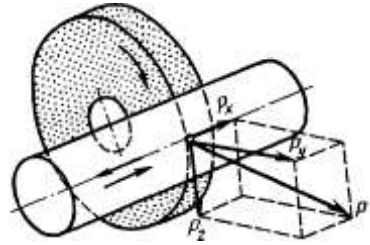


*Рис. 165. Силы, действующие при шлифовании на деталь*

Мощность резания рассчитывают по эмпирическим формулам. Для наружного и внутреннего круглого шлифования:

$$N_K = C_N \cdot S_{прод} \cdot v_Д^{0,7} \cdot S_{non}^{0,7},$$

где $S_{прод}$ – продольная подача, мм/об; $S_{non}$ – поперечная подача, мм/дв. ход; $v_Д$ – окружная скорость детали, м/мин.

Коэффициент

$$C_N = C_0 \cdot D_Д^n \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3,$$

где $C_0$ – коэффициент для наружного шлифования с продольной подачей – 0,029, с радиальной подачей (врезное шлифование) – 0,0184; внутреннего с продольной подачей – 0,0322; $D_Д$ – диаметр детали, мм; $n$ – показатель степени: для наружного шлифования – 0,2, а для внутреннего – 0,3; $k_1$ – поправочный коэффициент на твердость круга (для $M$ – $k_1$ = 0,9; $CM$ – $k_1$ = 1; С – $k_1$ = 1,16; СТ1, СТ2 – $k_1$ = 1,36; СТ3, Т1 – $k_1$ = 1,58); $k_2$ – поправочный коэффициент на ширину круга (при $B$ = 26-40 $k_2$ = 0,8, $B$ = 40-63 $k_2$ = 0,9, $B$ = 63-100 $k_2$ = 1); $k_3$ – поправочный коэффициент на материал (для серого чугуна $k_3$ = 0,9, сырой стали $k_3$ = 1, закаленной стали $k_3$ = 1,1).

Зная мощность резания $N_K$, можно определить касательную составляющую силы резания

$$P_z = 1000 \cdot N_K / v_K.$$

Мощность на вращение детали $N_Д$ примерно в 60-100 раз меньше мощности $N_K$ из-за медленного вращения детали.

### 5. Основное (машинное) время шлифования

Для круглого шлифования с продольной подачей:

$$T_M = \frac{2L \cdot h}{n_Д s t} k ,$$

где $L$ – длина продольного хода стола (круга), мм; $h$ – припуск на сторону, мм; $n_Д$ – частота вращения обрабатываемой детали, мин$^{-1}$; $s$ – продольная подача, мм/об; $t$ – глубина резания, мм (поперечная подача в мм/дв. ход); $k$ – поправочный коэффициент, учитывающий добавочное число проходов без поперечной подачи (на выхаживание): для грубого шлифования $k$ = 1,2…1,4, для чистого – $k$ = 1,25…1,7.

***Режим резания*** зависит от характеристики шлифовального круга (форма, размеры, материал абразива, зернистость, индекс зернистости, твердость, структура, связка, класс круга), глубины резания, числа проходов и продольной подачи в долях ширины круга. Затем определяют скорость и частоту вращения детали, которые корректируют по паспорту станка. По принятой фактической частоте определяют фактическую окружную скорость детали. После этого определяют (выбирают) окружную скорость вращения шлифовального круга (скорость резания), учитывая недопустимость превышения этой скорости против указанной в характеристике круга, и находят мощность, необходимую для шлифования. Эта мощность должна быть менее или равна мощности на шпинделе станка. Затем подсчитывают машинное время.

***Шлифовальные станки.*** Шлифовальные станки бывают следующих типов: круглошлифовальные, внутришлифовальные, плоскошлифовальные, специальные и заточные.

### 6. Отделочные методы абразивной обработки

Для получения особо высоких классов шероховатости обрабатываемой поверхности (7-14-й классы) и точности обработки (5-7 квалитеты) применяют отделочные методы обработки, к которым относится притирка, хонингование, суперфиниш и полирование.

***Притирка*** (или доводка) заключается в удалении обрабатываемой детали весьма незначительного слоя металла посредством применения особого мелкозернистого абразивного материала в среде смазки, нанесенного на поверхность инструмента, называемого притиром.

Притиры обычно изготовляют из серого чугуна, реже меди и свинца, а в некоторых случаях из пластмассы и даже из дерева. В качестве абразивных материалов для притиров применяют порошки алмаза, корунда, карборунда, наждака зернистостью 100…1 мкм и пасты ГОИ (76% окиси хрома, 22% стеарина, 2% керосина).

***Хонингование*** – метод отделочной обработки цилиндрических отверстий при помощи мелкозернистых абразивных брусков, совершающих вращательное движение вместе с особой державкой, называемой хоном (хонголовка). Точность обработки при хонинговании соответствует 5-7 квалитетам, шероховатость обработанной поверхности – 9-13 классам ($R_a$ = 0,32…0,125 мкм).

***Суперфинишировање*** – окончательная обработка предварительно шлифованных поверхностей (чаше наружных цилиндрических) при помощи мелкозернистых абразивных или алмазных брусков, совершающих сложное движение с целью получения высокого качества поверхности. Суперфинишировање точность размеров деталей повышает незначительно, но обеспечивает минимальную шероховатость поверхности, соответствующую 9-14-му классам ($R_a$ = 0,63-0,008 мкм). Суперфинишировање является заключительной операцией при обработке шеек коленчатых валов ДВС.

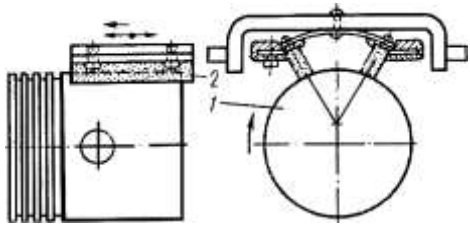



*Рис. 167. Схема суперфинишировання поршня*

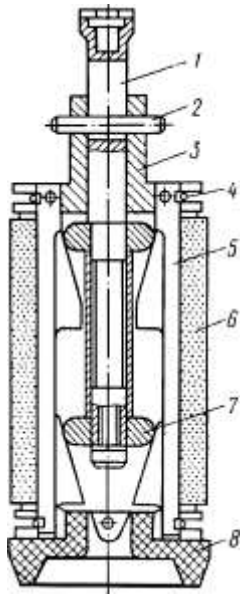



*Рис. 166. Схема хонинговальной головки*

***Полирование*** – обработка деталей при помощи особо мелкозернистой абразивной (полировальной) пасты, нанесенной на эластичный полировальный круг, изготовляемый из войлока, кожи и парусины. В качестве абразива применяют порошки окиси хрома, крокуса (окись железа), венской извести, иногда корунда и карбида кремния.

Полирование применяют в качестве декоративной отделки, а также в качестве подготовительной операции перед никелированием, хромированием и другими гальваническими покрытиями. Шероховатость поверхности после полирования соответствует 7-12-му классам ($R_a$ = 1,25…0,025 мкм).

Применяют полирование бесконечными лентами, что дает возможность обрабатывать криволинейные профили (в автоматическом или полуавтоматическом цикле).

Абразивно-жидкостное полирование: деталь обрабатывается в специальных камерах струей жидкости, насыщенной абразивом. При этом $v \approx 50$ м/с, давление 10-100 МПа, не образуется трещин, прижогов, улучшается на 30% износостойкость, увеличивается на 15% усталостная прочность.

*Лекция 11*

## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Эти методы можно разделить на 4 группы:

1. *Электроэрозионные методы обработки* токопроводящих материалов, основанные на использовании энергии электрических разрядов, разрушающих обрабатываемый материал (электроискровой и электроимпульсный методы).

2. *Способы обработки материалов концентрированными лучами* с высокой плотностью энергии (свето-лучевая и электронно-лучевая).

3. *Методы импульсного ударного воздействия* на заготовку частиц абразива с частотой ударов, соответствующей ультразвуковому диапазону (ультразвуковая обработка).

4. *Методы, основанные на явлении анодного растворения*, состоящего в том, что обрабатываемая деталь, подключенная к положительному полюсу – аноду, растворяется.

Электрофизическими и электрохимическими методами обрабатывают детали из материалов с низкой обрабатываемостью резанием (твердые и жаропрочные сплавы, молибденовые, титановые, вольфрамовые и другие специальные сплавы), а также детали с размерами и формами поверхностей, обработка которых обычными механическими методами затруднительна (детали с малыми и криволинейными отверстиями, узкими прорезями, детали с углублениями сложных форм и др.).

### 1. Электроискровая и электроимпульсная обработка

В основе методов лежит процесс электроэрозии, заключающийся в разрушении металла под воздействием электрических разрядов. Электрические разряды характеризуются малой длительностью (от долей мкс до нескольких сотен мкс), энергией 9 до 4…5 Дж) и высокой частотой (до $1{,}5 \cdot 10^6$ кГц).

***Электроискровая обработка.*** Электроды-инструменты изготовляют из латуни, медно-графитовой массы, меди и других токопроводящих материалов.

Производительность электроискровой и электроимпульсной обработки металлов, шероховатость и точность обработанных поверхностей определяются мощностью и длительностью электрических разрядов, т.е. электрическим режимом работы. Электроискровую обработку проводят на черновых, чистовых и отделочных режимах. Рабочее напряжение на электродах 70…200 В. Электроискровым методом можно обработать

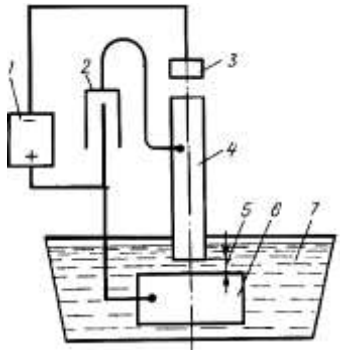



*Рис. 168. Схема электроискровой обработки металлов: 1 – источник тока; 2 – контакт; 3 – электрод-инструмент; 4 – конденсатор; 5 – электрод-деталь; 6 – зазор (0,1…1 мм); 7 – диэлектрическая жидкость (керосин, машинное масло)*

ограниченную поверхность (250…1500 мм$^2$); производительность процесса 35…1200 мм$^3$/мин.

Электроискровую обработку проводят на специальных электроискровых станках, в которых главными элементами служат генератор импульсов и следящее устройство для регулирования устойчивости и мощности разрядов, станина станка, механизмы для перемещения и установки электродов (инструмента и детали), ванна с жидкостью. Достигается относительно низкая шероховатость поверхности $R_a$ = 1-2,5 мкм, точность обработки 0,05-0,8 мм.

***Электроимпульсная обработка***. По сравнению с электроэроизной обработкой процесс характеризуется увеличением мощности одиночных разрядов, длительностью импульсов, обратной полярностью (анод – инструмент, катод – заготовка), применением пониженных напряжений и относительно большими значениями средних токов. Производительность в сравнении с электроискровой обработкой в 8-10 раз выше. Этим методом обрабатывают большие площади (до 240 см$^2$) с высокой производительностью (до 5000 мм$^3$/мин); шероховатость обработанной поверхности на один – три класса ниже.

Одна из схем электроимпульсного метода обработки металлов изображена на рис. 169:

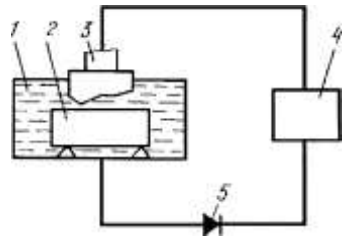



*Рис. 169. Схема электроимпульсной обработки металлов: 1 – электрод-инструмент; 2 – электрод-деталь; 3 – ванна; 4 – выпрямитель; 5 – машинный преобразователь*

Электрические режимы назначают в зависимости от характера обработки и от площади обрабатываемой поверхности. При площади обрабатываемой поверхности 20…240 см$^2$ черновая обработка производится при силе тока 50…500 А, чистовая обработка – 5…50 А. Напряжение 24…26 В, а при чистовой обработке 11…12 В.

Недостатком электроискрового и электроимпульсного методов обработки является малая стойкость инструмента (5…10 деталей).

Электроимпульсную обработку проводят на специальных электроимпульсных станках, на которых обрабатывают пресс-формы, вырубные, просечные и чеканочные штампы и прошивают отверстия любой конфигурации в закаленных деталях.

***Электроэроизное шлифование***. При данном виде шлифования металл удаляется под действием импульсных разрядов между вращающемся электродом-инструментом и заготовкой. Напряжение постоянного тока 25…30 ВЮ сила тока 5…300 А. Частота вращения инструмента 25…30 м/с.

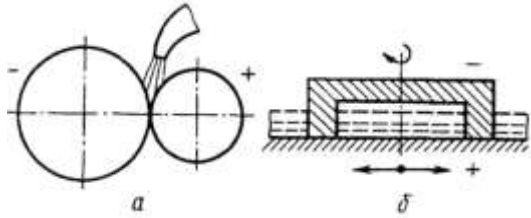



*Рис. 170. Схемы электроэрозионного шлифования: а – круглого; б – плоского*

***Обработка электродом-проволокой***. Тонкая проволока (диаметорм от нескольких мкм до 0,5 мм) из латуни, меди или вольфрама, подключается к катоду, перематывается с одной катушки на другую. Заготовка подключатся к аноду, имеет подачу на проволоку. Таким способом обрабатываются детали из твердых сплавов, полупроводниковых материалов, вольфрама, магнитных материалов. Точность обработки 0,005 мм, шероховатость обработанной поверхности $R_a$ = 0,63…1,25 мкм. Производительность процесса для цветных металлов 10…20, сталей 5…8 и твердых сплавов 6…12 мм$^2$/мин.

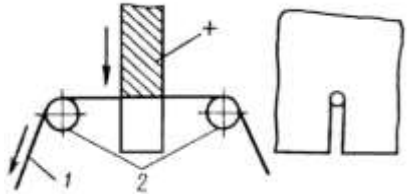


*Рис. 171. Схема обработки электродом-проволокой*

## 2. Лучевая обработка

*Лазерная обработка*: образование отверстий, резка, сварка, микрозакалка поверхности. Можно обрабатывать сверхтвердые и тугоплавкие материалы.

Лазеры бывают трех видов: твердотельные, газовые и жидкостные.

Плотность мощности в зоне облучения до $10^{10}$ Вт/см$^2$. температура в зоне воздействия луча лазера достигает 5000-9000°С. Время воздействия излучения (длительность импульса) 0,001-0,00001 с. С помощью лазерных установок получают отверстия диаметром 0,01-0,6 мм в заготовках толщиной 0,1-6 мм, режут заготовки толщиной до 9 мм из стали, тугоплавких и цветных металлов (сплавов), алмаза, рубина, керамики и др.

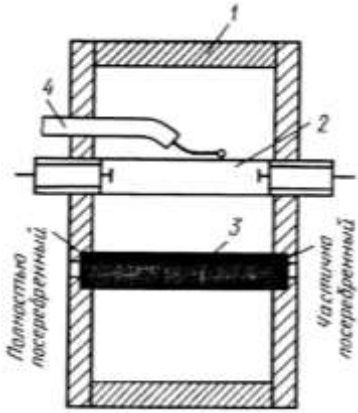


*Рис. 172. Схема лазера*

*Электронно-лучевая обработка*. Обработку ведут в глубоком вакууме (до $10^{-7}$Па). Образование потока свободных электронов происходит за счет термоэлектронной эмиссии. (Катоды из вольфрама и тантала). Рабочее напряжение в электронной пушке до 150 кВ. Плотность потока электронов – до $10^9$ Вт/см$^2$.

Обработку целесообразно применять для получения мелких отверстий в твердых труднообрабатываемых материалах и резки твердых заготовок из вольфрама, титана, твердых сплавов и синтетических камней. При этом способе обработки можно получить диаметр отвестия или ширину реза 1-2

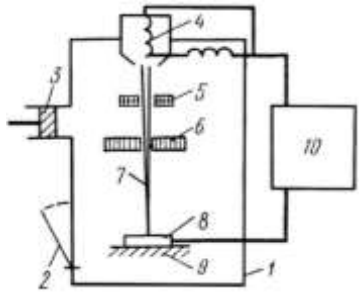


*Рис. 173. Схема установки для электронно-лучевой обработки*

мкм. Используют для сварки металлов. Недостаток метода – необходимость проведения обработки в глубоком вакууме, что усложняет процесс.

### 3. Ультразвуковая обработка

Инструменту придают колебания высокой частоты (свыше 20 кГц) с небольшой амплитудой (0,01-0,06 мм). Обработка ведется абразивом (частицами), содержащимся в жидкости, омывающей инструмент и деталь (зернистость абразива до 180 мкм). Весовое соотношение абразива к воде от 1:1 до 1:2. Абразив – кристаллы карбида бора, карбида кремния и другие материалы. Инструменты обычно изготовляют из инструментальной стали.

Для получения ультразвуковых колебаний применяют пьезоэлектрические и магнитострикционные преобразователи. Применение пьезоэлектрических преобразователей основано на способности некоторых материалов (кварца, турмалина) изменять свои геометрические размеры (сжиматься и расширяться) под действием электрических зарядов. В основу магнитострикционного преобразователя положено использование свойств некоторых материалов (никеля, кобальта, пермаллоя и др.) деформироваться (сжиматься и расширяться) под воздействием магнитного поля.

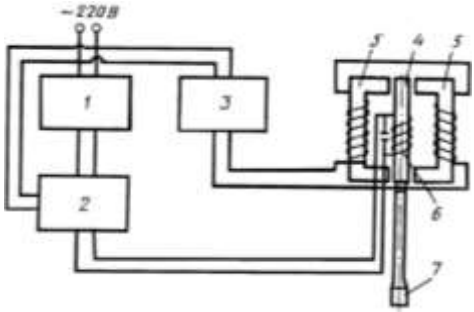


*Рис. 174. Схема ультразвуковой установки*

Метод используют при обработке сверлением и фрезерованием материалов из стекла и кварца, полупроводников, алмазов, реже из твердых сплавов и труднообрабатываемых сталей. Метод обеспечивает получение шероховатости поверхности до 9 класса ($R_a$ = 0,32 мкм) и точности до 5 мкм.

### 4. Анодно-механическая обработка

Применяется для резки металлов и заточки инструментов. Используется постоянный ток напряжением 20…30 В. Силу тока выбирают в зависимости от размеров обрабатываемой детали (80-300 А). Деталь соединяют с положительным полюсом источника тока, а обрабатывающий токопроводящий инструмент – с отрицательным. Рабочая жидкость – водный раствор жидкого стекла. Под действием электрического тока на поверхности обрабатываемой детали образуется защитная пленка с высоким электрическим сопротивлением. Обрабатывающий инструмент непрерывно удаляет значительную часть пленки с поверхности детали и тем самым открывает

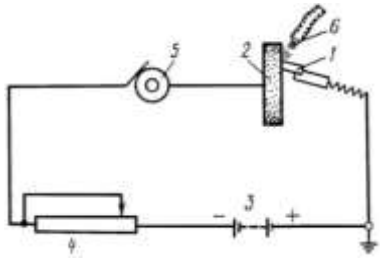


*Рис. 175. Схема анодно-механической заточки: 1 – резец; 2 – токопроводящий круг; 3 – источник питания; 4 – реостат; 5 – контакт; 6 – шланг*

возможность прохождения тока через обрабатываемую поверхность детали.

После анодно-механической обработки отсутствуют дефекты, характерные для абразивной заточки (микротрещины, прижоги и т.д.), отпадает необходимость в применении шлифовальных кругов.

***Электрообразивная обработка*** основана на электрохимическом растворении материала при одновременном механическом удалении продуктов растворения из зоны обработки. Используют электропроводный абразивный круг, который служит одновременно и катодом, и инструментом, удаляющим анодную пленку. Обработка проводится при постоянном токе при напряжении 20…32 В и силе тока до 50 А.

***Электроалмазное шлифование*** применяется для плоского и круглого шлифования, заточки инструмента.

Используют алмазные круги на металлической связке зернистостью от 10/12 до 160/125 при 100%-ной концентрации.

Хорошие результаты дает электролит, содержаший 2-3% $NaNO_3$ и 0,2-0,3 $NaNO_2$. Процесс проводиться при высокой плотности тока (70-200 А/см$^2$ и низком напряжении (4-6 В).

Достигается высокая производительность (до 900 мм$^3$/ мин), шероховатость поверхности – до 11-го класса ($R_a$ = 0,08 мкм).

## 5. Чистовая обработка деталей пластическим деформированием

Недостатки обработки металлов резанием: перевод в стружку большого количества металла, значительная трудоемкость процессов обработки.

Проводятся большие работы по замене обработки металлов резанием обработкой в холодном состоянии без снятия стружки (методом пластической деформации). Эти методы дают экономия металла, обладают высокой производительностью, обеспечивают получение высокого класса шероховатости поверхности.

Пластическим деформированием обрабатывают детали из стали и цветных металлов с твердостью до HRC 35-40. В процессе обработки уменьшается шероховатость поверхности, повышается поверхностная прочность и создаются в поверхностном слое благоприятные напряжения сжатия. Все это приводит к улучшению износостойкости поверхностного слоя деталей.

## 6. Обработка пластическим деформированием

Наружные цилиндрические поверхности обрабатываются следующими методами: прокатыванием между роликами или плоскими плашками, редуцированием, накаткой роликами, алмазным выглаживанием.

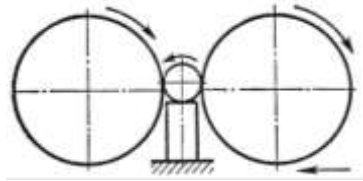


*Рис. 176. Схема прокатывания тел вращения между роликами*

***Прокатывание между роликами*** применяется для обработки мелких деталей типа тел вращения на резьбонакатных станках.

Получаемая точность обработки в пределах 7-9 квалитетов, шероховатость поверхности 8-11 квалитетов ($R_a$ = 0,63-0,08 мкм).

***Редуцирование*** – процесс периодического обжатия и вытягивания прутковой заготовки ударами двух полуматриц. Детали ∅2-15 мм и значительной длины. Частота вращения шпинделя 500-600 мин$^{-1}$. Редуцирование по сравнению с обработкой точением и шлифованием обеспечивает увеличение производительности в 5-6 раз, точность до 7 квалитета, шероховатость до 8-10 классов ($R_a$ = 0,63-0,15 мкм) и дает значительную экономию металла.

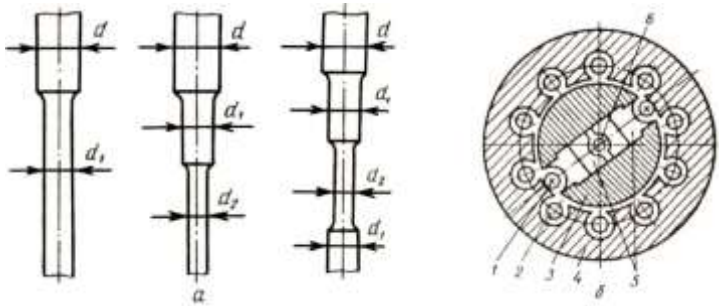



*Рис. 177. Типовые детали (а), изготовленные редуцированием, и схема редуцирования (б)*

Поверхности цилиндрических деталей накатываются с помощью одного, двух и трех роликов или многороликовых головок.

При редуцировании уменьшается шероховатость обрабатываемой поверхности и повышается усталостная прочность детали. Накатывание роликом обычно проводят после чистового точения на токарных станках. Шероховатость поверхности достигает 7 класса.

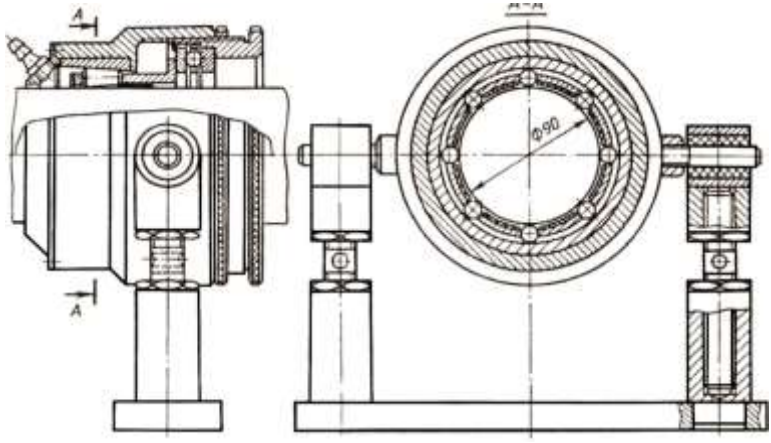



*Рис. 178. Схема многороликовой головки для накатывания валов*

Ролики могут быть установлены под углом 1-3° к оси, что сособщает самоподачу обкатки вдоль вала. Подача на ролик (в многороликовой головке) 0,3-0,6 мм. Шероховатость после обкатывания соответствует 9-11-му классам ($R_a$ = 0,32-0,05 мм).

***Алмазное выглаживание*** – процесс окончательной обработки валов, при котором алмазный инструмен прижимают к обрабатываемой поверхности детали с определенным усилием (80-450 Н) и обработку ведут без снятия стружки.

Цилиндрические поверхности выглаживают на токарных станках, а плоские – на строгальных. Выглаживающий инструмент – державка с впаянным алмазом, рабочая часть которого имеет сферическую и реже цилиндрическую форму. Радиус скругления алмазного кристалла 0,8-3,5 мм (массой до 2 карат).

Режим обработки: подача 0,03-0,08 мм/об. скорость выглаживания 200-300 м/мин. Шероховатость поверхности снижается на 2-3 класса, возрастает микротвердость на 25-80% и сопротивляемость детали ударным нагрузкам. Алмазное выглаживание во многих случаях заменяет шлифование.

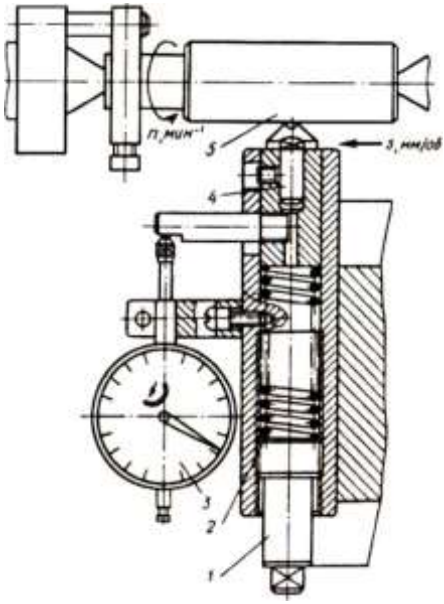



*Рис. 179. Схема алмазного выглаживания: 1 – регулировочный винт; 2 – пружина; 3 – индикатор; 4 – алмазный наконечник; 5 – деталь в центрах*

### 6. Обработка внутренних цилиндрических поверхностей

Для окончательной обработки отверстий применяю протягивание и прошивание их выглаживающими протяжками.

Обработку протягиванием выглаживающими протяжками выполняют на протяжных станках, прошиванием – на прессах, токарных станках. В качестве инструментов применяют различные конструкции протяжек и прошивок. По числу выглаживающих колец протяжки и прошивки разделяют на однокольцевые и многокольцевые.

Натяг протяжек (прошивок) зависит от диаметра отверстия и отношения длины отверстия детали к его диаметру, от жесткости и свойств обрабатываемого материала и составляет примерно 0,02-0,2 мм. Скорость протягивания и прошивки отверстий в стали 8-150 м/мин. При обработки стали применяют машинное или индустриальное масла, чугуна – керосин, дюралюминия – мыльную воду.

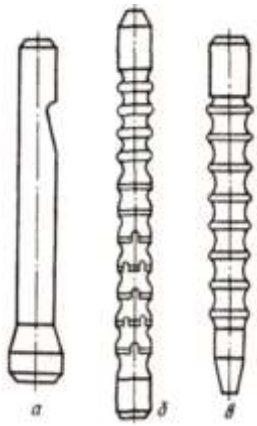



*Рис. 180. Конструкции выглаживающих прошивок: а – однокольцевая; б – комбинированная с режущими и выглаживающими кольцами; в – многокольцевая*

Один из перспективных методов обработки отверстий – раскатывание многороликовыми раскатками. Обработку отверстий раскатыванием можно выполнять на токарных и сверлильных станках. Предварительно проводят растачивание и протягивание. Натяг устанавливают опытным путем. Для отверстий диаметром 100-200 мм в стальных деталях натяг составляет 0,1-0,4 мм. Подача на ролик (осевая) при раскатывании стали 0,3-0,5 мм, окружная скорость вращения детали на токарном станке 30-80 мм/мин. Раскатывание цилиндров производительнее в несколько раз по сравнению со шлифованием и хонингованием. Однако оно не повышает точности обработки.

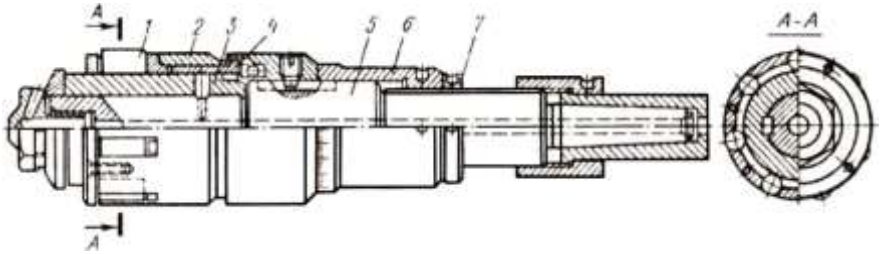



*Рис. 181. Схема многороликовой регулируемой раскатки*

### 7. Обработка плоских и профильных поверхностей

Применяют приспособление к поперечно\гальным станкам для накатывания роликом плоских поверхностей. Широко используют в промышленности накатывание резьбы, которое выполняют плоскими плашками или роликами, на рабочих поверхностях которых образован профиль накатываемой резьбы. Плоскими плашками накатывают детали диаметром в пределах 3-25 мм.

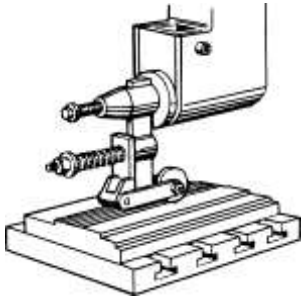


*Рис. 182. Приспособление к поперечно-строгальному станку для накатывания плоских поверхностей*

При накатывании резьбы роликом обеспечиваются большая точность и более высокий класс шероховатости обработанной поверхности, чем при накатывании плашками.

Наружный диаметр ролика $D_{нар}$ и шаг резьбы ролика $S_p$ определяют по формулам:

$$D_{нар} = d_2 i + t\ ; \quad S_p = S \cdot i,$$

где $d_2$ – средний диаметр резьбы, мм; $i$ – число заходов резьбы ролика; $t$ – полная глубина резьбы, мм; $S$ – шаг резьбы заготовки, мм.

Диаметр заготовки обычно: $d_3 = d_2$ .

Существует также несколько методов накатывания в холодном и горячем состоянии зубьев цилиндрических зубчатых колес.

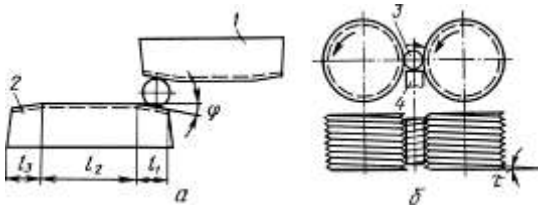



*Рис. 183. Накатывание резьбы: а – плоскими плашками; б – накатными роликами*

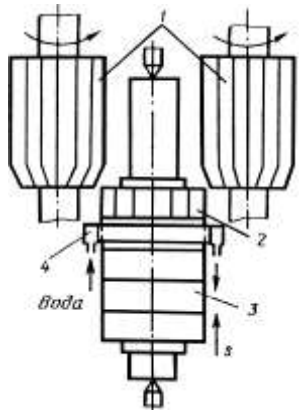



*Рис. 184. Схема накатывания зубьев цилиндрических колес*

## 8. Дробеструйная обработка

Для повышения конструкционной прочности деталей, работающих при циклических нагрузках, применяют дробеструйную обработку. Сущность ее в том, что детали после механической и термической обработки, подвергают многочисленным ударам дробинок, движущихся со скоростью 60-100 м/с. Диаметр дроби 0,1-2 мм.

Используют дробеметные аппараты механического, пневматического и гравитационного действия.

В результате дробеструйной обработки в поверхностном слое деталей глубиной до 1 мм возникает наклеп. Твердость поверхностного слоя стали 20, обработанного дробью, повышается на 40% и стали 45 – на 20%. Шероховатость поверхности находится в пределах 2-7 классаов. Обработка дробью создает в наружном поверхностном слое деталей внутренние напряжения сжатия.

Дробеструйная обработка особенно эффективно повышает усталостную прочность при деформациях изгиба и кручения, при которых в поверхностном слое деталей возникают максимальные растягивающие напряжения.

Дробеструйную обработку широко применяют для упрочения пружин, рессор, автомобильных полуосей и др. Долговечность повышается в два и более раз.

## 9. Электрохимическая обработка

ЭХО основана на анодном растворении металла обрабатываемой заготовки в среде электролита под действием электрического тока. Разделяется на отделочную и размерную обработку.

При размерной ЭХО растворение металла происходит при прохождении тока через электролит, прокачиваемый под давлением в зазоре между электродом-инструментом и заготовкой. В ходе ЭХО происходит выравнивание плотности тока в межэлектродном зазоре и, как следствие, копирование профиля электрода-инструмента на заготовке.

## Библиографический список


1. Материаловедение [Электронный ресурс]: Учебное пособие/Давыдова И. С., Максина Е. Л., 2-е изд. - М.: ИЦ РИОР, НИЦ ИНФРА-М, 2016. - 228 с. [ЭБС ИНФРА-М]

2. *Материаловедение и технология металлов* [Электронный ресурс]: Учебник / Г.П. Фетисов, Ф.А. Гарифулин. - М.: НИЦ ИНФРА-М; Мн.: Нов. знание, 2014. - 397 с. [ЭБС ИНФРА-М].

3. *Материалы и их технологии. В* 2 ч. Ч. 1. [Электронный ресурс]: Учебник / В.А. Горохов, Н.В. Беляков, А.Г. Схиртладзе; Под ред. В.А. Горохова. - М.: НИЦ ИНФРА-М; Мн.: Нов. знание, 2014. - 589 с. [ЭБС ИНФРА-М]

4. *Галимов Э.Р.* Материаловедение для транспортного машиностроения [Электронный ресурс]: учебное пособие / Э.Р. Галимов, Л.В. Тарасенко, М.В. Унчикова [и др.]. – Электрон. дан. – СПб.: Лань, 2013. – 443 с. [ ЭБС Лань]

5. *Алексеев Г.В.* Виртуальный лабораторный практикум по курсу «Материаловедение»: учебное пособие / Г.В. Алексеев, И.И. Бриденко, С.А. Вологжанина. – СПб. : Лань, 2013. – 208 с.

6. *Материалы и их технологии.* В 2 ч. Ч. 2. [Электронный ресурс]: Учебник / В.А. Горохов и др.; Под ред. В.А. Горохова. - М.: НИЦ ИНФРА-М; Мн.: Нов. знание, 2014. - 533 с. [ЭБС ИНФРА-М]

7. *Адаскин А.М.* Материаловедение (металлообработка): учеб. для нач. проф. образования / А.М. Адаскин, В.М. Зуев. – М.: ИРПО, ПрофОбрИздат, 2001. – 240 с.

8. *Материаловедение и технология конструкционных материалов.* Под редакцией В.С. Чередниченко. М.: Омега – Л. 2006 – 752с.

9. *Оськин В.А.* Материаловедение. Технология конструкционных материалов/ В.А. Оськин и др. Кн. 1 – М.: КолосС, 2008 – 447с.4.

*10. Некрасов С.С.* Обработка материалов резанием. – М., Агропромиздат, 1988. – 336 с.

*11. Гапонкин В.А.* Обработка резанием, металлорежущий инструмент и станки / В.А. Гапонкин, Л.К. Лукашев, Т.Г. Суворова. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.

*12. Схиртладзе А.Г.* Станочник широкого профиля / А.Г. Схиртладзе, В.Ю. Новиков. – М.: Высшая школа, 1989. – 464 с.

**С О Д Е Р Ж А Н И Е**

**Введение** ..... 3

**Лекция 1.** Механические, технологические и физико-химические свойства материалов ..... 4

**Лекция 2.** Основы теории сплавов ..... 14

**Лекция 3.** Основы литейного производства..... 45

**Лекция 4.** Основы термической обработки и поверхностного упрочнения сплавов ..... 71

**Лекция 5.** Обработка металлов давлением ..... 85

**Лекция 6.** Сварка и пайка металлов .....101

**Лекция 7.** Классификация и основные механизмы металлорежущих станков (МРС).....125

**Лекция 8.** Станки токарной группы .....135

**Лекция 9.** Обработка деталей на станках сверлильно-расточной, фрезерной, строгальной, долбежной и зубообрабатывающей групп....150

**Лекция 10.** Шлифование, шлифовальный и абразивный инструмент.....166

**Лекция 11.** Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов.....176

**Библиографический список** .....185

Составители:
Перфилов Михаил Евгеньевич
Агафонова Екатерина Васильевна

# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Курс лекций

Редактор
Компьютерная верстка М.Е. Перфилов

Подписано в печать
Формат 60х84. $^{1}/_{16}$ Объем уч.- изд. л., ___ усл. печ.л.
Тираж 100 экз. Бумага офсетная. Изд. № 144. Заказ №___

Отпечатано в издательстве НГАУ
630039, Новосибирск, ул. Добролюбова, 160, офис 106.
Тел. факс (383) 267-09-10. E-mail: 2134539@mail.ru