

ВЫСШЕЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Арзамасов В.Б., Волчков А.Н., Головин В.А., Кузнецов В.А., Смирнова Э.Е.,  
Черепяхин А.А., Шлыкова А.В., Шпунькин Н.Ф.

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И**

**ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

под редакцией д.т.н., профессора В.Б. Арзамасова и  
к.т.н. А.А. Черепяхина

Учебник

*Допущено*

*Учебно-методическим объединением по образованию в области автоматизированного машиностроения в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров и магистров «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств» и дипломированных специалистов «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»*

Москва

Издательский центр «Академия»

2007

УДК: 669.018.29.004.14(075.8)

Авторы:

д.т.н., проф., заведующий кафедрой «Технология конструкционных материалов» Арзамасов В.Б., к.т.н., доц. Волчков А.Н., д.т.н., проф., Головин В.А., д.т.н., проф., Кузнецов В.А., к.т.н., доц. В.А.. Смирнова Э.Е., к.т.н., доц. Черепяхин А.А., к.т.н., доц. Шлыкова А.В., к.т.н., проф. заведующий кафедрой «Кузовостроение и обработка давлением» Шпунькин Н.Ф.

**Материаловедение и Технология конструкционных материалов.** Учебник для студентов высших учебных заведений /Арзамасов В.Б., Волчков А.Н., Головин В.А., Кузнецов В.А.. Смирнова Э.Е., Черепяхин А.А., Шпунькин Н.Ф., под редакцией Арзамасова В.Б. и Черепяхина А.А. – М., Издательский центр «Академия», 2007, 446 с.,

Тираж 4000 экз. 28 усл. печ. Листов

Примечание: в 2010 г. вышло 2-е стереотипное издание, тираж – 1000 экз.

Учебник написан в соответствии с требованием государственного образовательного стандарта преподавания обще профессиональных дисциплин: «Материаловедение и технология конструкционных материалов».

В учебнике подробно рассмотрены все переделы получения машиностроительной детали (от руды до финишной обработки поверхностей).

В первой части учебника рассмотрены виды и свойства конструкционных материалов; теоретические и практические вопросы термо – химического воздействия на эти свойства.

Во второй части учебника подробно рассмотрены все переделы получения машиностроительной детали (от руды до финишной обработки поверхностей).

Для студентов машиностроительных ВУЗов конструкторских и технологических специальностей.

Посвящается памяти  
д.т.н. профессора Владимира Александровича Белова 1920...2002 г.г.  
Возглавлявшего кафедру «Технология конструкционных материалов»  
Московского Государственного технического университета «МАМИ» в 1974...1992 г.г.



## АННОТАЦИЯ

Учебник написан в соответствии с требованием государственного образовательного стандарта преподавания обще профессиональных дисциплин: «Материаловедение и технология конструкционных материалов».

Учебник предназначен для подготовки дипломированных специалистов машиностроительных специальностей, обучающиеся по направлениям: 651200 «Энергомашиностроение»; 651400 «Машиностроительные технологии и оборудование»; 651500 «Прикладная механика»; 651900 «Автоматизация и управление», 654500 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии»; 657800 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

В первой части учебника рассмотрены кристаллическое строение металла, процессы кристаллизации, пластической деформации и рекристаллизации. Изложены современные методы испытаний и критерии оценки конструктивной прочности материалов, определяющие надежность и долговечность изделий. Описаны фазы, образующиеся в сплавах, и диаграммы состояния. Описаны современные конструкционные материалы. Большое внимание уделено теории и технологии термической обработки.

Во второй части рассмотрены современные и перспективные технологические способы (применяемые в единичном, серийном и массовом производствах): получения и переработки конструкционных материалов; изготовления заготовок и деталей машин литьем, методами пластической деформации, сваркой, резанием и другими способами.

При рассмотрении каждого способа основной упор делался на: описание основных схем обработки; технологических особенностей, технологических возможностей способа; технологические требования, предъявляемые способом к заготовкам. Даны практические рекомендации по выбору способа и режима обработки.

## ЧАСТЬ 1. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Материаловедением называется комплексная наука, изучающая внутреннее строение и свойства материалов и закономерности их изменения под воздействием внешних факторов: тепловых, механических, химических, электромагнитных радиоактивных. Теоретической основой материаловедения являются соответствующие разделы физики и химии твердого тела, однако наука о материалах развивается в основном экспериментальным путем.

Условия работы современных изделий машиностроения часто требуют увеличения эксплуатационных характеристик материалов, что во многом определяется крупными достижениями в теории и практике материаловедения. В настоящее время широкое применение нашли новые высокопрочные металлические материалы различного назначения, композиционные материалы, материалы с особыми свойствами (полупроводники и жидкие кристаллы, сверхпроводники, аморфные сплавы), одновременно совершенствовались способы упрочнения деталей термической и химико-термической обработками. Работы отечественных ученых А.А. Бонвара, А.А. Байкова, Г.В. Курдюмова В.Д. Садовского, В.А. Каргина внесли огромный вклад в развитие современной науки о материалах.

Все конструкционные материалы можно разделить на следующие группы: металлические материалы – к ним относят материалы и сплавы, которые подразделяются на черные (железо и его сплавы) и цветные (все остальные металлы и сплавы на их основе); неметаллические материалы (резина, пластмассы, стекло, дерево и т.д.); композиционные материалы (могут быть на основе систем металл – металл, металл – неметалл, неметалл – неметалл).

## **ГЛАВА 1. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ**

Из известных в настоящее время элементов Периодической системы Д.И. Менделеева 76 являются металлами, которые обладают рядом характерных свойств: высокими значениями тепло- и электропроводности, положительным температурным коэффициентом электросопротивления, при этом многие металлы обладают сверхпроводимостью при температурах близких к абсолютному нулю, хорошей отражательной способностью, высокой пластичностью и термоэлектронной эмиссией.

### **1.1. Строение металлических материалов**

Атомы металлов характеризуются малым количеством (1...2) электронов на наружной электронной оболочке, поэтому их ионизационный потенциал невелик, что и объясняет легкость отрыва у них внешних электронов, при этом атомы превращаются в положительно заряженные ионы, «омываемые газом» из свободных коллективизированных электронов. Таким образом, устойчивость металла, представляющего собой ионно-электронную систему, определяется силами притяжения и отталкивания между ионами и обобщенными электронами, образуя металлическую связь. Атомы в металле располагаются на расстояниях друг от друга, соответствующих минимальной суммарной силе взаимодействия, образуя правильную кристаллическую решетку, соответствующую минимальной энергии взаимодействия.

Свойства кристаллов зависят от электронного строения атомов и характера взаимодействия их в кристалле, а так же от пространственного расположения атомов и их химического состава. Чистые металлы, как правило, обладают низкой прочностью и применяются сравнительно редко. Наиболее широко в современной технике используются сплавы, состоящие из двух или более элементов, которые называются компонентами. Компоненты образуют фазы – составные части системы, имеющие одинаковый состав и агрегатное состояние, отделенные от других фаз границей раздела, при переходе через которую свойства меняются скачком. Форма, размеры, характер взаимного

расположения фаз в металлах или сплавах описывается понятием структура.

При исследованиях кристаллической структуры металлов и сплавов изучаются макро- и микроструктуры, а также тонкая (атомная) структура.

Макроструктура изучается невооруженным глазом или при небольших увеличениях с помощью лупы и позволяет выявить характер излома, усадочные раковины, поры, размеры и форму крупных кристаллов.

Используя специально подготовленные шлифованные и травленные образцы, определяют наличие трещин, химическую неоднородность (ликвацию), волокнистость.

Несмотря на простоту, исследование макроструктуры дает общую картину кристаллического строения металла или сплава в больших объемах и позволяет выбрать характерные участки структуры для дальнейших более детальных исследований. Исследование микроструктуры проводят с помощью оптических и электронных микроскопов на специально подготовленных образцах (микрошлифах, фольгах). Микроскопические методы дают возможность определить размеры и форму кристаллов, их распределение и относительные объемные количества, форму инородных включений и микропустот, ориентирование кристаллов, наличие специальных кристаллографических признаков и другие особенности микроструктуры металлов и сплавов. Тонкую или атомную структуру изучают с помощью дифракционных методов анализа (рентгенография, электронография, нейтронография). Анализируя дифракционную картину, полученную при взаимодействии атомов кристалла с короткими волнами ( $\lambda = 10^{-10} \dots 10^{-12}$  м) рентгеновских лучей (или волн электронов, нейтронов) можно получить информацию о расположении атомов в кристаллической решетке и расстояниях между ними, т.е. определить тип кристаллической решетки материала.

Кристаллическая решетка представляет собой воображаемую пространственную сетку, в узлах которой располагаются атомы (ионы), образующие твердое кристаллическое тело (рис. 1.1). Жирными линиями

выделен наименьший параллелепипед (кристалл), последовательным перемещением которого в пространстве вдоль трех осей может быть построена вся решетка или кристалл. Наименьший параллелепипед (кристалл), дающий представление об атомной структуре металла во всем объеме, называется элементарной ячейкой. Для описания элементарной ячейки кристаллической решетки используют три отрезка ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ), равные расстояниям до ближайших соседей по осям координат, и три угла ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) между этими отрезками. Соотношения между этими величинами определяются симметрией, согласно которой все кристаллы подразделяют на семь систем – сингоний (табл. 1.1).

Большинство металлов имеют кристаллическую решетку одного из трех типов: Объемно-центрированный куб – ОЦК (рис. 1.2, а) – имеют металлы:  $K$ ,  $Na$ ,  $Li$ ,  $Ti$ ,  $Zr_{\beta}$ ,  $W$ ,  $Ta$ ,  $Fe_{\omega}$ ,  $Cr$  и др.; гранецентрированный куб – ГЦК (рис. 1.2, б) – имеют металлы:  $Fe_{\beta}$ ,  $Sr$ ,  $Tn$ ,  $Pb$ ,  $Ni$ ,  $Ag$ ,  $Au$ ,  $Pd$ ,  $Pt$ ,  $Cu$ ,  $Co_{\alpha}$  и др.; гексагональный плотноупакованная – ГПУ (рис. 1.2, в) – имеют металлы:  $Mg$ ,  $Ti_{\omega}$ ,  $Cd$ ,  $Os$ ,  $Zn$ ,  $Co_{\beta}$  и др.

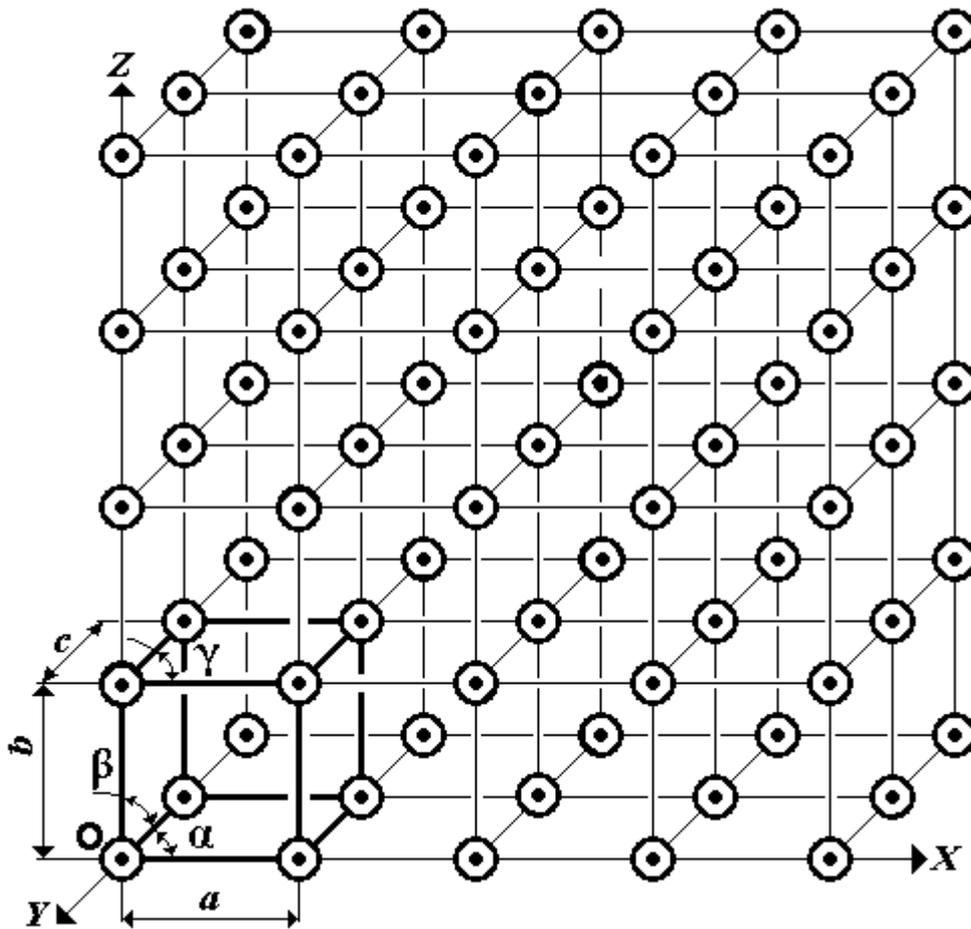


Рис. 1.1. Схема кристаллической решетки:

$OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  – координатные оси:  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – линейные и угловые характеристики решетки.

Размеры кристаллической решетки характеризуются величинами периодов, ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ), под которым подразумевают расстояние между ближайшими параллельными атомными плоскостями, образующими элементарную ячейку. Периоды решетки выражаются в нанометрах ( $1\text{нм}=10^{-11}\text{м}$ ). Для простой пространственной

Таблица 1.1.

Кристаллические системы элементов

система	Ребра	Углы
Триклинная	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma$

Моноклинная	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ \gamma \neq 90^\circ$
Ромбическая	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Ромбоэдрическая	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Гексагональная	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ = 120^\circ$
Тетрагональная	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Кубическая	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

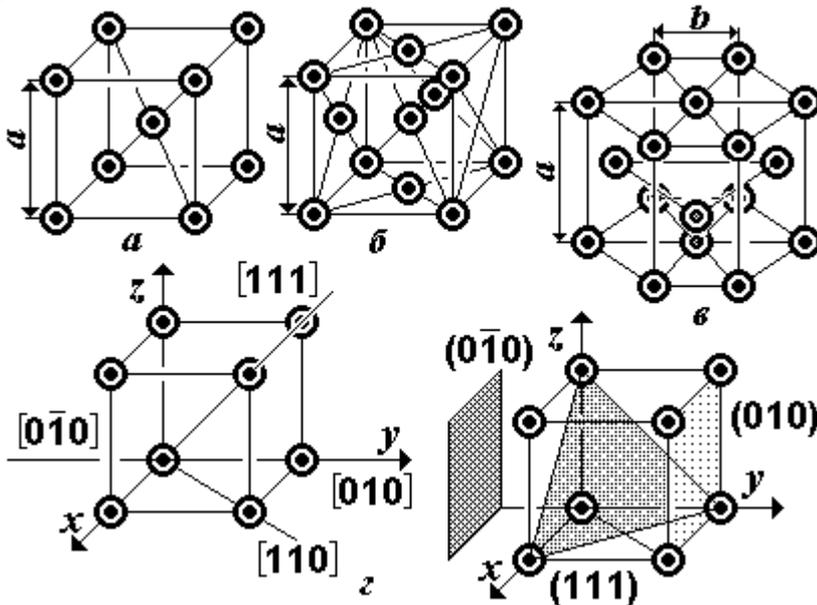


Рис. 1.2. Кристаллические решетки металлов:

а – объемно – центрированный куб; б – гранецентрированный куб; в – гексагональная плотно упакованная решетка; г - кристаллографические индексы; а, b – характеристики решетки; x, y, z – координатные оси; [010], [110], [111] – индексы направления; (010), (111) – индексы плоскости.

решетки (атомы находятся только в вершинах) на одну элементарную ячейку всегда приходится один атом. Каждая ячейка имеет восемь вершин, соответственно восемь атомов, но каждый атом относится, в свою очередь, к восьми соседним ячейкам. Таким образом, от атома на долю каждой ячейки приходится  $1/8$  объема атома, а на всю ячейку  $(1/8) \cdot 8 = 1$  атом.

Кристаллические решетки, характерные для металлов, имеют сложное строение, так как атомы (ионы) располагаются не только в узлах (вершинах), но и на гранях или в центре решетки. Так, на одну элементарную ячейку: ОЦК приходится два атома – один в центре, другой – в вершинах куба ( $1+8 \cdot 1/8$ ); на ячейку ГЦК четыре атома – один в вершинах куба и три на его гранях ( $8 \cdot 1/8+6 \cdot 1/2$ ) на ячейку ГПУ – шесть атомов ( $3+12 \cdot 1/6+12 \cdot 1/2=6$ ). Основные характеристики кристаллической решетки (тип, период, количество атомов в элементарной ячейке) определяют расположение атомов в кристалле. Плотность кристаллической решетки характеризуется координационным числом, ( $K$  - для кубической и  $\Gamma$  – для гексагональной решеток) равным числу ближайших равноудаленных соседей. В элементарной ячейке ОЦК расстояние между атомами равно:  $0,5\sqrt{3}a$ , и координационное число равно восьми –  $K8$ , для ГЦК координационное число равно  $K12$  и для ГПУ –  $\Gamma12$ . Отношение объема всех атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку ко всему ее объему, определяется коэффициентом компактности. Для ОЦК решетки он составляет 0,68, а для ГЦК и ГПУ решеток коэффициент компактности равен 0,74.

### Кристаллографические индексы

Для определения индексов направления расположения ряда атомов (рис. 1.2, *з*) в кристаллической решетке, необходимо из семейства параллельных прямых выбрать одно направление, проходящее через начало координат, которое будет первой точкой. Второй точкой является узел кристаллической решетки, занимаемый атомом. Координаты этого узла выражают целыми числами « $A, B, C$ » в единицах отрезков « $a, b, c$ » заключают в квадратные скобки [ $A, B, C$ ] и называют индексами направления. Отрицательные значения индексов обозначают знаком «минус» над ним. Положение плоскостей в пространстве определяется отрезками, отсекаемыми плоскостью по координатным осям. Эти отрезки выражаются целыми числами « $m, n, p$ » в единицах отрезков « $a, b, c$ ». За индексы плоскостей берут

обратные отрезки:  $h = 1/m$ ;  $k = 1/n$ ,  $l = 1/p$  которые заключают в круглые скобки ( $h, k, l$ ). Если плотность отсекает по осям отрицательные отрезки, то над соответствующим индексом ставят знак «минус»

### Анизотропия

В кристалле расстояние между атомами в различных кристаллографических направлениях неодинаковы, поэтому и свойства кристаллических тел зависят от направления, т.е. возникает анизотропия.

В отличие от монокристаллов технические металлы являются поликристаллами, состоящими из большого количества различно ориентированных анизотропных кристаллов. В этом случае анизотропии нет, так как среднестатистическое расстояние между атомами по всем направлениям оказывается примерно одинаковым, т.е. поликристаллическое тело является изотропным. Однако в процессе обработки давлением поликристалла возникает преимущественная ориентировка кристаллографических индексов, в каком то направлении. После такой обработки поликристалл становится текстурированным и анизотропным.

### Дефекты кристаллической решетки

Реальный кристалл отличается от идеального наличием различных структурных несовершенств - дефектов, которые могут быть точечными, линейными, поверхностными и объемными. Размеры точечных дефектов близки к межатомному расстоянию. У линейных дефектов длина на несколько порядков больше ширины, у поверхностных дефектов мала толщина, а ширина и длина больше ее на несколько порядков. Объемные дефекты (поры, трещины) имеют значительные размеры во всех трех направлениях.

К точечным дефектам относятся вакансии, межузельные атомы основного вещества, чужеродные атомы внедрения и замещения.

Вакансией называется пустой узел кристаллической решетки. Атом, перемещенный из узла в позицию между узлами, называется межузельными.

Если чужеродный атом находится между узлами или на ребрах решетки, то это атом внедрения, а в случае его расположения в свободном узле кристаллической решетки – атом замещения.

Рассмотрим механизм образования вакансий в кристалле. Вокруг узлов решетки (точек равновесия) атомы совершают колебательные движения. Чем выше температура тела, тем больше энергия атомов и амплитуда их колебаний. Отдельные атомы реального тела всегда имеют энергию и амплитуду колебаний выше средней. Эти атомы могут покинуть свои места в кристаллической решетке и перемещаться между ее узлами (рис. 1.3, а, атом 1).

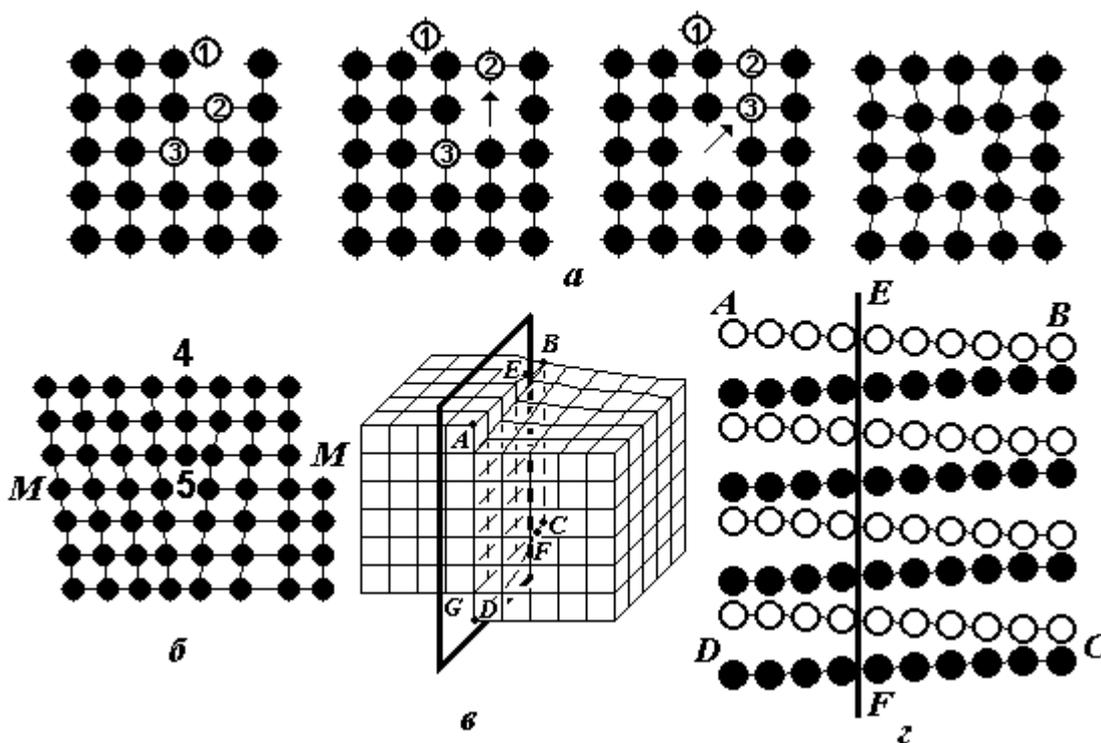


Рис. 1.3. Точечные и линейные дефекты кристаллической решетки металлов: а - механизм образования точечных дефектов; б - краевая дислокация; в - пространственная модель образования винтовой дислокации; г - расположение атомов в области винтовой дислокации: 1 –дислоцированный атом; 2, 3 – перемещающиеся атомы; 4-5 – экстраплоскость; G- плоскость сдвига кристалла; А-В – сдвинутая часть кристалла; М-М - плоскость перемещения дислокаций; С-Д – несдвинутая часть кристалла; Е-Е – винтовая дислокация.

Место, где находится атом 1 (вакансия) занимает атом 2 из более глубоких слоев, на его место перемещается атом 3 и так далее, т.е. вакансия продвигается вглубь кристалла, при этом происходит искажение кристаллической решетки. Источником тепловых вакансий являются свободные поверхности, границы и субграницы кристаллов, пустоты и трещины. При температурах, близких к температуре плавления, число вакансий может достигать 1...2% от числа атомов в теле. Также вакансии могут образоваться в результате пластической деформации, рекристаллизации и при бомбардировке металла атомами или частицами высоких энергий.

Важнейшими видами линейных несовершенств являются краевые и винтовые дислокации.

Сдвинем часть идеального кристалла на одно межатомное расстояние, например, влево (**рис. 1.3, б**). В таком случае, в верхних рядах кристалла оказалось на один атом больше, чем в нижних, и образовалась лишняя плоскость 4-5 (экстра-плоскость). Линия, перпендикулярная направлению сдвига кристалла, является краем экстраплоскости. Она называется линейной краевой дислокацией и может достигать многих тысяч межатомных расстояний.

Разрежем кристалл плоскостью  $G$  и часть его сдвинем вверх на одно межатомное расстояние (**рис. 1.3, в**). Горизонтальные атомные плоскости изогнутся, и край каждой плоскости сомкнется с краем ближайшей соседней плоскости. Расположение атомов в сдвинутой ( $AB$ ) и несдвинутой части ( $CD$ ) даст винтовую линию. На **рис. 1.3, г** белыми кружками обозначены атомы сдвинутой части, черными несдвинутой. Линия  $EF$  представляет собой винтовую дислокацию, при наличии которой кристалл как бы состоит из закрученных по винту кристаллографических плоскостей. Вокруг дислокаций решетка искажена, поэтому они служат местом концентрации примесных атомов, в особенности примесей внедрения, которые мешают движению дислокаций и упрочняют металл.

На рис. 1.4 показана зависимость предела текучести ( $\sigma_T$ ) от плотности дислокаций ( $\rho$ ). Теоретически рассчитанная прочность идеального кристалла в  $10^3$  раз выше экспериментально определенных значений для реального кристалла. Прочность практически бездефектных кристаллов (нитевидные кристаллы или «усы») приближается к теоретической. Наименьшими значениями прочности обладают отожженные металлы, при увеличении плотности дислокаций и уменьшении их подвижности путем различных видов обработки (давление, термообработка и т.д.) прочность увеличивается в несколько раз.

Реальное твердое тело имеет поликристаллическое строение, т.е. состоит из множества кристаллов, соприкасающихся между собой. Отдельные кристаллы, образованные из множества элементарных кристаллов, получили название «зерно».



Рис. 1.4. Зависимость предела текучести от плотности дислокаций:

$\sigma_T$  – предел текучести;  $\rho$  – плотность дислокаций.

На границах соседних зерен и образуются поверхностные дефекты, представляющие собой переходную область шириной 3...4 межатомных расстояний. В этой области решетка одного кристалла переходит в решетку другого, имеющего иную кристаллографическую ориентацию (рис. 1.5, а), образуя большеугловые границы зерен (углы разориентировки составляют десятки градусов) Каждое зерно, в свою очередь, состоит из субзерен

(блоков), которые представляют собой часть кристалла относительно правильного строения, а его границы – стенки дислокаций. Угол взаимной разориентировки между соседними субзернами невелик (менее  $5^\circ$ ), поэтому такие границы называются малоугловыми или субграницами (рис. 1.5, б). В результате реальный металл имеет сложную дислокационную структуру, называемую мозаичной или блочной (рис. 1.5, в), которая определяет его свойства.

Поверхностные дефекты влияют на свойства металлов. Так, предел текучести  $\delta_T$  связан с размером зерен  $d$  зависимостью  $\delta_T = \delta_0 + kd^{-1/2}$ , где  $\delta_0$ ,  $k$  – постоянные для данного материала. Чем мельче зерно, тем выше предел текучести, вязкость и меньше опасность хрупкого разрушения. Под влиянием внешних факторов (механические нагрузки, тепловое воздействие) меняется количество и плотность дефектов, что отражается на свойствах металлов и имеет большое практическое значение.

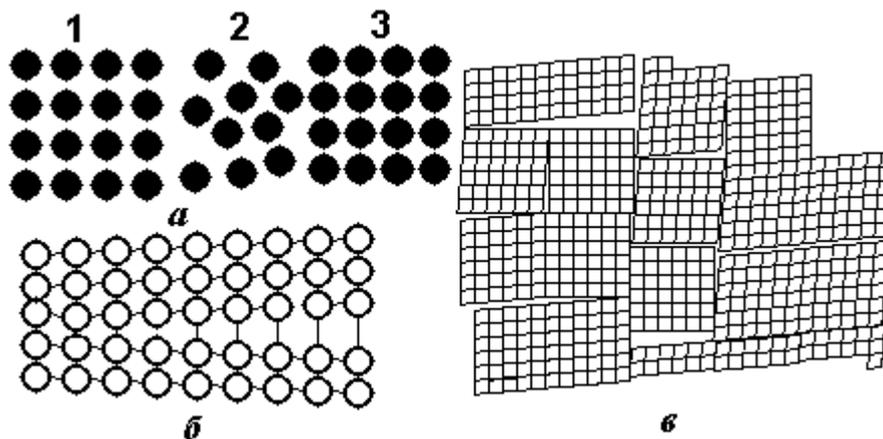


Рис. 1.5. Схемы строения границ и блочной (мозаичной) структуры кристаллов:

а - схема размещения атомов в области границ зерен металла: 1- зерно № 1; 2 - граница; 3 – зерно № 2; б - малоугловая граница; в - блочная структура кристалла

### Диффузия

Под диффузией понимают перемещения атомов в кристаллическом теле на расстояния, превышающие средние межатомные данного вещества.

Перемещения атомов, не связанных с изменением концентрации в различных объемах, называется самодиффузией. Диффузия, сопровождающаяся изменением концентрации, происходит в сплавах или в металлах с повышенным содержанием примесей и называется диффузией или гетеродиффузией.

В основе процесса диффузии в кристаллах лежит атомный механизм, при котором каждый атом совершает ряд перемещений между различными равновесными положениями в кристаллической решетке. Для описания процесса диффузии в твердом кристаллическом теле предложено несколько возможных механизмов: циклический; объемный, вакансионный и межузельный.

При циклической диффузии (рис. 1.6, а) совместно перемещаются группы атомов (атомы 1-4). Такая диффузия не требует больших затрат энергии, но маловероятна. При обменном механизме диффузия (рис. 1.6, б) атомы меняются местами (атомы 1-2). В металлах и сплавах диффузия преимущественно осуществляется по вакансионному механизму (рис. 1.6, в), при этом происходит замещение вакансий и их перемещений вглубь металла. При диффузии в металле элементов с малым атомным радиусом (углерод, азот, водород, кислород) происходит диффузия по межузельному механизму (рис. 1.6, г).

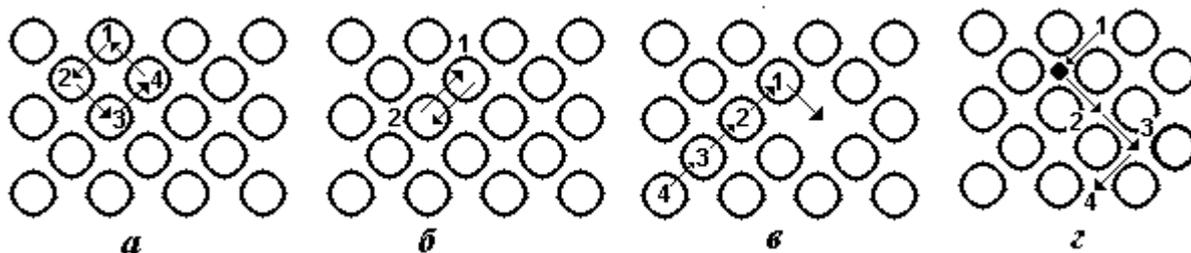


Рис. 1.6. перемещение атомов в кристаллической решетке металлов:  
 а - циклическая диффузия; б - обменный механизм диффузии; в -  
 вакансионная диффузия; г - межузельная диффузия; 1, 2, 3, 4 –  
 перемещающиеся атомы.

Наиболее легко диффузия протекает по поверхности и границам зерен, где сосредоточены дефекты кристаллического строения (вакансии, дислокации). Скорость диффузии определяется количеством вещества « $m$ », продиффундировавшего через единицу площади поверхности раздела за единицу времени. Количество диффундирующего вещества в единицу времени « $m$ », зависит от градиента концентраций « $dc/dx$ » элемента в направлении, нормальном к поверхности раздела и пропорционально коэффициенту диффузии « $D$ » м<sup>2</sup>/сек:  $m = - D dc/dx$ , где  $dc$  – концентрация;  $dx$  – расстояние в выбранном направлении. Знак «минус» указывает, что диффузия (самодиффузия) протекает в направлении от объемов с большей концентрацией к объемам с меньшей концентрацией. Коэффициент диффузии, т.е. количество вещества, продиффундировавшего через единицу времени при перепаде концентраций, равной единице, зависит от природы сплава, размеров зерна и особенно сильно от температуры. Температурная зависимость коэффициента диффузии описывается экспоненциальным уравнением:  $D = D_0 e^{-Q/RT}$ , где  $D_0$  – множитель, величина которого определяется типом кристаллической решетки;  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – температура,  $Q$  – энергия активации диффузии. Энергия активации диффузии характеризует энергию связи атомов в кристаллической решетке и очень сильно влияет на коэффициент диффузии.

Диффузия лежит в основе большинства фундаментальных процессов, протекающих в металлах и сплавах, таких как кристаллизация, фазовые превращения, рекристаллизация, деформация, химико-термическая обработка и других

## 1.2. Кристаллизация чистых металлов

Переход металла из жидкого или парообразного состояния в твердое с образованием кристаллической структуры называется первичной кристаллизацией. Образование новых кристаллов в твердом кристаллическом теле называется вторичной кристаллизацией. Кристаллы могут зарождаться

самопроизвольно – гомогенная кристаллизация, или за счет роста на уже существующих центрах кристаллизации – гетерогенная кристаллизация.

### Гомогенная кристаллизация.

Гомогенная (самопроизвольная) кристаллизация происходит в условиях, когда расплав переходит к термодинамическим более устойчивому состоянию с меньшей свободной энергией, которая характеризуется термодинамическим потенциалом  $G$ . С повышением температуры термодинамический потенциал металла как в твердом ( $G_T$ ), так и жидком ( $G_{ж}$ ) состояниях уменьшается, и становятся равными при определенной температуре  $T_n$  – равновесная температура кристаллизации (рис. 1.7, а). При равновесной температуре  $T_n$  жидкая и твердая фазы существуют одновременно, т.е.  $G_{ж} = G_T$ . Кристаллизация протекает в том случае, когда термодинамический потенциал металла в твердом состоянии будет меньше термодинамического потенциала в жидком состоянии, т.е. при переохлаждении металла ниже равновесной температуры  $T_n$ . Величина  $\Delta T = T_n - T_k$  называется степенью переохлаждения и зависит от природы металла. Она увеличивается с повышением чистоты металла и ростом скорости охлаждения.

Плавление – процесс обратный кристаллизации, протекает при температуре выше равновесной, т.е. при перегреве. Разница между реальными температурами кристаллизации и плавления называется температурным гистерезисом. Термические кривые, характеризующие процесс кристаллизации чистых металлов при охлаждении с различными скоростями ( $V$ ), приведены на рис. 1.7, б ( $V_1 < V_2 < V_3$ ). Температура жидкого металла при охлаждении уменьшается плавно. При достижении реальных температур кристаллизации ( $T_1, T_2, T_3$ ) на кривых охлаждения появляются горизонтальные площадки, т.к. отвод тепла в окружающую среду компенсируется выделяющейся скрытой теплотой кристаллизации. По окончании кристаллизации температура уже затвердевшего металла опять

понижается плавно. При медленном охлаждении ( $V_1$ ) степень переохлаждения ( $\Delta T_1$ ) мала и кристаллизация протекает при температуре, близкой и равновесной. С увеличением скоростей охлаждения кристаллизация протекает при более низких температурах, при этом степень переохлаждения увеличивается.

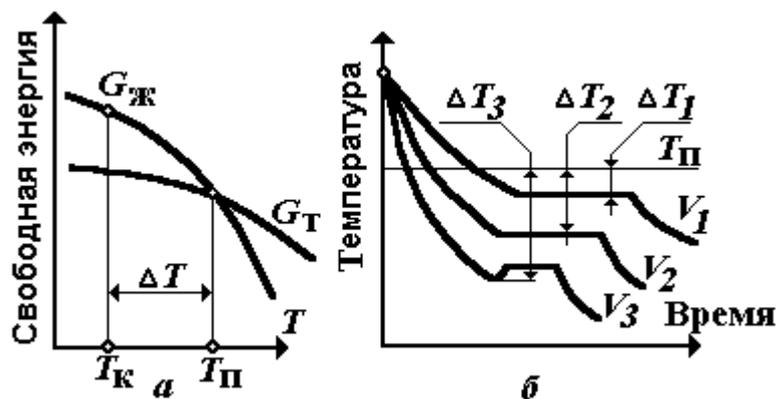


Рис. 1.7. Охлаждение расплава и начало кристаллизации:

а - изменение свободной энергии ( $G$ ) в жидком ( $G_{ж}$ ) и твердом ( $G_{т}$ ) состоянии в зависимости от температуры; б - кривые охлаждения металлов при кристаллизации:  $T_{к}$  – температура начала кристаллизации;  $T_{п}$  – температура, при которой жидкая и твердая фазы существуют одновременно;  $\Delta T$  – степень переохлаждения;  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$ ,  $\Delta T_3$  – степень переохлаждения при скорости охлаждения соответственно  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ .

В жидком состоянии атомы металла вследствие теплового движения перемещаются беспорядочно. В то же время в жидкости имеются микрообъемы, в пределах которых расположение атомов металла аналогично их расположению в решетке кристалла. Такие группировки называются фазовыми флуктуациями. Микрообъемы с привычным расположением атомов неустойчивы, они рассасываются и вновь возникают в другом элементарном объеме жидкости. При переохлаждении жидкого металла наиболее крупные из них становятся устойчивыми и способными к росту. Эти устойчивые группировки атомов называют центрами кристаллизации или зародышами. Зародыши, возникающие в процессе кристаллизации, могут быть различной величины. Рост зародыша возможен только при условии,

если он достиг определенного размера ( $r_{кр}$ ), начиная с которого его рост ведет к уменьшению свободной энергии (рис. 1.8).

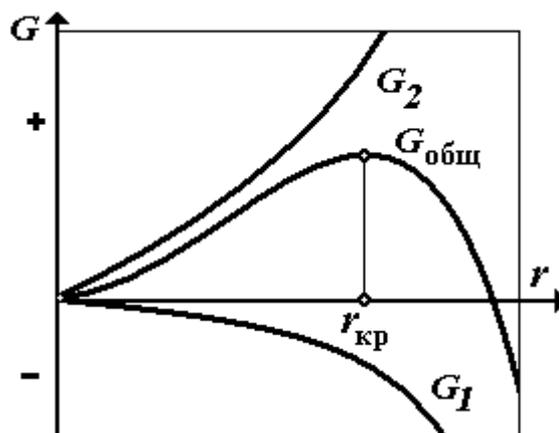


Рис. 1.8. Изменение термодинамического потенциала (энергии Гибса) при образовании зародышей в зависимости от их размера:

$G$  – термодинамический потенциал;  $r$  – размер зародыша;  $r_{кр}$  – критический размер зародыша;  $G_{общ}$  – потенциал системы;  $G_1$  – уменьшение энергии Гибса за счет перехода части жидкого объема металла в твердый;  $G_2$  – избыточная поверхностная энергия.

Рост кристаллов заключается в присоединении к зародышам все новых атомов из жидкой фазы. Скорость процесса кристаллизации и окончательный размер кристаллов при затвердевании определяется соотношением между скоростью образования центров кристаллизации, которая измеряется числом зародышей, образующихся в единицу времени в единице объема и скоростью их линейного размера растущего кристалла в единицу времени. Чем больше скорости образования зародышей и их роста, тем быстрее протекает процесс кристаллизации. При равновесной температуре кристаллизации ( $T_n$ ), число зародышей и скорость их роста равны нулю, и кристаллизация не происходит (рис.1.9, а). При увеличении степени переохлаждения скорость образования зародышей и скорость их роста возрастают и достигают максимума, а затем снижаются. Это объясняется тем, что с повышением степени переохлаждения разность термодинамических потенциалов жидкого и твердого металлов ( $\Delta G$ ) возрастает, что приводит к увеличению числа зародышей (ч.з.) и скорости их

роста (с.р.). Но при этом также требуется диффузия атомов металла к центрам кристаллизации. При небольших степенях переохлаждения диффузия протекает интенсивно, размер кристаллического зародыша велик, а скорость образования зародышей мала, и при затвердевании формируется крупнокристаллическая структура. При больших степенях переохлаждения диффузия атомов (коэффициент диффузии  $D$ ) уменьшается и образование зародышей, и их рост затруднены (рис. 1.9, б), но поскольку скорость образования зародышей увеличивается более интенсивно, чем скорость их роста, при затвердевании формируется мелкозернистая структура.

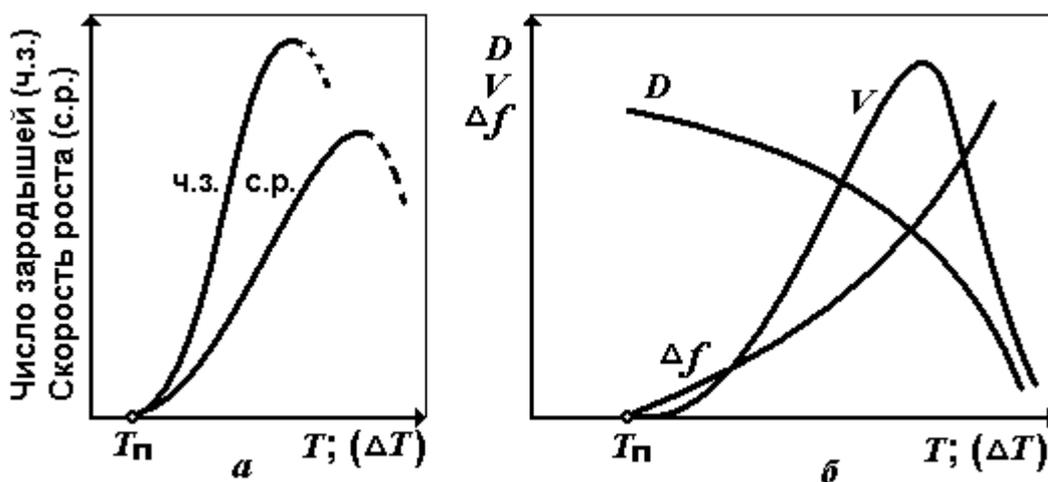


Рис.1.9. Зависимость числа зародышей (ч.з.), скорости роста зародышей (с.р.), разности свободных энергий ( $\Delta f$ ) жидкой и твердой фаз, коэффициента диффузии ( $D$ ) и средней скорости кристаллизации от степени переохлаждения ( $\Delta T$ ):  $T_{\text{п}}$  – равновесная температура кристаллизации.

Размер зерна металла сильно влияет на его свойства и зависит не только от степени переохлаждения, но и от температур нагрева и разливки жидкого металла, его химического состава и особенно от чистоты металла, т.е. наличия в нем посторонних примесей. Как правило, чем мельче зерно, тем выше его механические свойства, особенно характеристики прочности и пластичности.

### Гетерогенная кристаллизация

Гомогенное или самопроизвольное образование зародышей на основе фазовых и энергетических флуктуаций может происходить только в высокочистом жидком металле.

В технических металлах и в сплавах процессы кристаллизации и характер образующейся структуры в значительной мере зависит от уже имеющихся в жидком растворе готовых центров кристаллизации. Такими центрами могут быть частицы тугоплавких соединений (оксиды, нитриды, карбиды и т.д.), образуемых примесями. Чем больше этих частиц тугоплавких соединений в жидком металле, тем больше центров кристаллизации (зародышей) и тем мельче размер образующихся кристаллов. Такая кристаллизация называется не самопроизвольной или гетерогенной.

Измельчение структуры способствует улучшению механических свойств металла. С целью регулирования размеров зерен широко применяют искусственное введение в расплав перед разливкой специальных добавок – модификаторов, создающих дополнительные центры кристаллизации. В качестве модификаторов используют поверхностно-активные вещества (бор, магний, церий и другие), а также элементы, образующие тугоплавкие соединения (карбиды, оксиды, нитриды, интерметаллиды и т.д.). Перегрев жидкого металла приводит к растворению или дезактивации примесей, играющих роль дополнительных центров кристаллизации и способствует образованию крупных зерен. Для измельчения их проводят подстуживание перегретого расплава до температуры чуть выше температур плавления и выдержку при этих температурах. При этом происходит выделение из жидкого раствора примесей, которое становится дополнительными центрами кристаллизации и измельчают зерно.

### Строение металлического слитка

Температура жидкого металла, скорость его охлаждения, направление отвода теплоты, содержание примесей оказывают определяющее влияние на форму

и размер зерен, образующихся при кристаллизации. В большинстве случаев кристаллизация металлов протекает с большой скоростью (кристаллизация при заливке жидкого металла в изложницу, кристаллизация расплава при литье в металлические формы, кристаллизация при непрерывной разливке) При ускоренном охлаждении расплава кристаллы растут неравномерно. Рост зародышей по одной из осей в направлении наибольшего градиента температур значительно опережает рост по другим осям, и происходит так называемая дендритная кристаллизация. Российский ученый Д.К. Чернов, описывал рост дендрита, ввел понятие «порядок осей кристаллизации» (рис. 1.10, а).

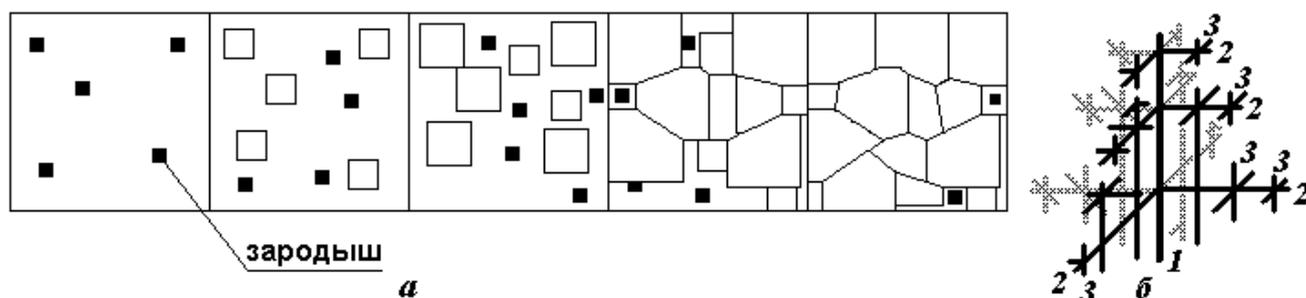


Рис. 1.10. Схема кристаллизации металла:

а - схема роста кристаллов; б - структура дендрита; 1, 2, 3 - оси кристаллизации.

После образования зародыша его развитие в первую очередь идет в направлении наибольшего градиента температур – ось первого порядка (рис. 1.10, б). Увеличение размеров осей первого порядка происходит не только в длину, но и в ширину. В дальнейшем от осей первого порядка под определенными углами начинают расти новые оси, называемые осями второго, третьего и более высоких порядков. По мере их роста постепенно заполняются все промежутки, ранее занятые жидким металлом и дендритная кристаллизация замедляется. Дендритная кристаллизация отчетливо выражена при недостатке жидкого металла для заполнения междуосных пространств (на поверхности слитка или в усадочной раковине) и при наличии примесей и посторонних атомов в расплаве.

Структура слитка зависит от количества и свойств чужеродных компонентов в металле, температуры разливки и скорость охлаждения расплава, формы и шероховатости внутренней поверхности литейной формы, а также от ее теплопроводности. Типичная структура слитка состоит из трех зон и усадочной раковины (рис. 1.11, а). В начальный момент разливки при соприкосновении жидкого раствора с относительно холодными стенками изложницы металл подвергается интенсивному переохлаждению, что приводит к образованию большого числа центров кристаллизации. Из-за большой скорости охлаждения рост образовавшихся кристаллов затруднен и поэтому поверхность слитка имеет мелкозернистую структуру (зона 1). После образования первой зоны условия кристаллизации изменяются – снижение температуры заливаемого металла, и повышение температуры стенок изложницы приводит к уменьшению скорости охлаждения. Для этой стадии кристаллизации характерен направленный отвод тепла перпендикулярно стенкам изложницы. Кристаллы растут к центру слитка внутрь жидкого расплава и имеют столбчатую форму (зона 2). В процессе дальнейшей кристаллизации исчезает направленность отвода тепла, скорость охлаждения значительно уменьшается, и в центральной части слитка образуются крупные различно ориентированные кристаллы (зона 3) .

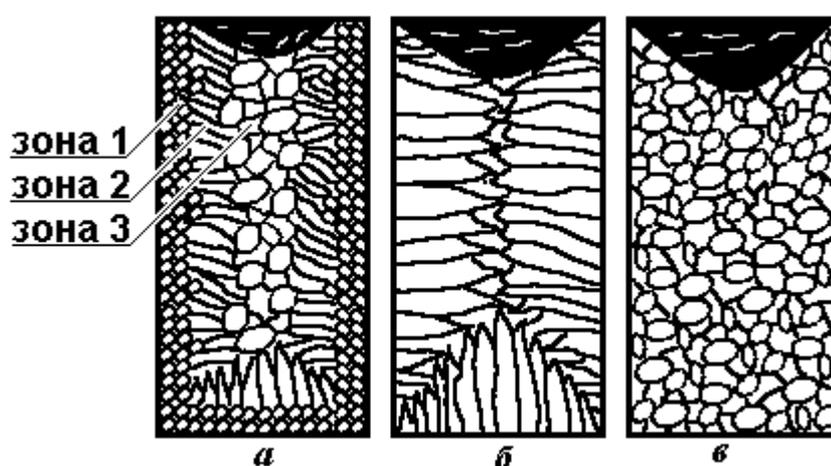


Рис. 1.11. Схемы микроструктуры слитков:

а – типичная; б – транскристаллическая; в – однородная мелкозернистая.

По мере охлаждения слитка легкоплавкие примеси (сера, фосфор и другие элементы) все более обогащают оставшуюся жидкую часть слитка, что приводит к образованию химической неоднородности состава как в пределах одного кристалла (дендритная ликвация), так и в различных зонах слитка (зональная ликвация). Части кристалла, образующиеся в первые моменты их формирования (оси первого порядка), обогащены тугоплавкими компонентами, а те части, которые кристаллизуются позже (оси второго, третьего и т.д. порядков) и междуосные пространства, все более обогащаются легкоплавкими соединениями. Вследствие неодинакового химического состава в пределах микрообъемов, т.е. в связи с дендритной ликвацией, имеет место неодинаковая степень травимости различных участков кристаллов. По мере затвердевания слитка жидкая часть, обогащенная легкоплавкими примесями, смещается к центру, что и приводит к зональной ликвации. Так как объем жидкого металла больше объема затвердевшего в верхней части затвердевшего слитка образуется так называемая усадочная раковина, около которой сосредоточены различные пустоты. Для получения в дальнейшем качественного проката верхнюю часть слитка отрезают и направляют на переплав, а оставшуюся часть подвергают обработке давлением. Кроме дендритной и зональной ликвации различают также химическую неоднородность, образующуюся в результате затвердевания несмешивающихся жидкостей различной плотности (гравитационная ликвация). Для ее предотвращения применяют большие скорости охлаждения, а также литье в невесомости.

На структуру и соответственно свойства слитка большое влияние оказывает технология его получения. Так, перегрев металла и его быстрое охлаждение при кристаллизации приводит к образованию преимущественно столбчатых кристаллов (рис. 1.11, б), в зоне которых наблюдается наибольшая плотность. Это так называемая транс кристаллическая структура. При непрерывной разливке стали, жидкий металл поступает в водоохлаждаемый кристаллизатор, затвердевает и вытягивается с противоположного конца. В

этом случае литой металл обладает мелкозернистой структурой и высокой пластичностью, при этом не образуется усадочной раковины (рис. 1.11, в).

### Полиморфные превращения

Полиморфные превращения происходят при вторичной кристаллизации, когда новые кристаллы образуются из твердой фазы. Термодинамические аспекты вторичной кристаллизации (термодинамический потенциал реакции, число центров кристаллизации, скорость роста кристаллов) принципиально не отличаются от уже рассмотренных при первичной кристаллизации, за исключением явления, которое называется полиморфизмом.

Полиморфизм – способность твердого металла при различных температурах или давлениях иметь различные кристаллические структуры, которые называются аллотропическими формами или модификациями.

Низкотемпературную форму обычно обозначают буквой  $\alpha$ , а высокотемпературные соответственно буквами  $\beta$ ,  $\gamma$  и т.д.

В интервале температур  $910 \dots 1392^\circ\text{C}$  устойчивым является  $Fe_\gamma$  (к12) с кристаллической решеткой, имеющей меньший термодинамический потенциал, чем  $Fe_\alpha$ , а при температурах ниже  $910^\circ\text{C}$  и выше  $1392^\circ\text{C}$  устойчиво  $Fe_\alpha$  (К8), так как его термодинамический потенциал ниже, чем у  $Fe_\gamma$ .

Кроме железа полиморфизмом обладают также металлы как кобальт, титан, цирконий, марганец и другие (всего около 30 металлов). Полиморфные превращения происходят не только в чистых металлах, но и в сплавах, а также в химических соединениях и сопровождаются скачкообразным изменением всех свойств металлов или сплавов.

### 1.3. Кристаллизация сплавов

#### Фазы в металлических сплавах

В сплавах в зависимости от природы компонентов их атомы по-разному взаимодействуют друг с другом и образуют следующие фазы: жидкие растворы, твердые растворы, химические соединения.

Твердый раствор – фаза, в которой один из компонентов сплава (растворитель) сохраняет свою кристаллическую решетку, а другой или другие компоненты располагаются в решетке растворителя, изменяя ее периоды. Различают твердый раствор замещения и твердый раствор внедрения.

При образовании твердого раствора замещения атомы растворенного компонента замещают часть атомов растворителя в его кристаллической решетке (рис. 1.12, а). Твердые растворы замещения могут образоваться в том случае, когда атомные радиусы растворителя и растворенного элемента отличаются не более чем на 15% (размерный фактор). Растворимость компонентов в твердом состоянии уменьшается при увеличении различия в атомных радиусах сплавленных элементов и их валентности. При соблюдении размерного фактора и одинаковом типе кристаллической решетки образуются твердые растворы с неограниченной растворимостью компонентов.

При образовании твердых растворов внедрения атомы растворенного в порах кристаллической решетки растворителя (рис. 1.12, б). Основным условием возможности образования твердого раствора внедрения является размерный фактор – размер межузельного атома должны быть меньше размера поры. Такие твердые растворы возникают при сплавлении переходных металлов с неметаллами (водород, кислород, азот, бор), имеющими малый радиус. Твердые растворы внедрения всегда имеют ограниченную растворимость.

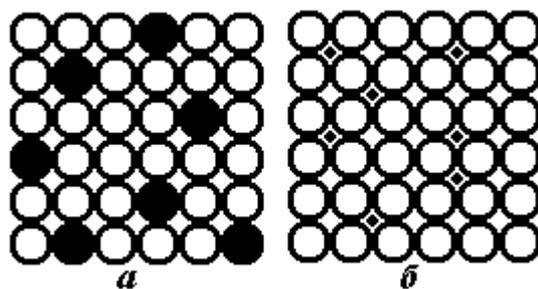


Рис. 1.12. Схема атомно–кристаллической структуры твердого раствора:  
 а – твердый раствор замещения; б – твердый раствор внедрения.

Элементарное строение и размеры атомов компонентов различны, поэтому при образовании твердых растворов кристаллическая решетка растворителя искажена. Атомы растворенного вещества преимущественно скапливаются у дислокаций, снижая их упругую энергию, поскольку при этом затрачивается минимальное количество энергии. Искажения решетки растворителя также будут минимальны, что определит ее устойчивость. Искажения решетки при образовании твердых растворов внедрения больше, чем при образовании твердых растворов замещения, но в обоих случаях увеличение концентрации растворенного вещества приводит к возрастанию электрического сопротивления, твердости и прочности сплавов и снижению пластичности и вязкости.

В многокомпонентных сплавах, содержащих более двух элементов, возможно растворение в одном и том же растворителе и путем замещения, и путем внедрения. Так, при сплавлении железа с марганцем и углеродом получается твердый раствор, в котором марганец растворяется путем замещения, а углерод – путем внедрения.

Необходимо отметить, что твердые растворы на основе металлов сохраняют высокую технологическую пластичность и составляют основу большинства промышленных конструкционных сплавов.

Кристаллы, образование различными компонентами сплава и имеющие отличный от них тип кристаллической решетки, называются химическими соединениями. В химических соединениях всегда сохраняется кратное

соотношение компонентов, которое выражается формулой  $A_mB_n$ , где « $A$ » и « $B$ » – компоненты сплава, а  $m$  и  $n$  – простые числа ( $Al_2O_3$ ,  $Cu-Al_2$ ,  $Fe_3C$  и т.д.).

Химические соединения, так же как и чистые металлы, имеют постоянную температуру плавления (диссоциации) и их свойства значительно отличаются от свойств, составляющих их компонентов. Образование химического соединения сопровождается значительным тепловым эффектом.

### Процесс кристаллизации сплавов

В жидком состоянии большинство металлов неограниченно растворяются друг в друге, образуя однофазный жидкий раствор. Исключения составляют такие пары как  $Fe-Pb$ ,  $Cu-Pb$ , которые почти полностью не растворимы в жидком состоянии и разделяются по плотности, образуя два несмешивающихся жидких слоя. Переход из жидкого состояния в твердое протекает, как и при кристаллизации чистых металлов, при наличии некоторого переохлаждения в результате образования центров кристаллизации (зародышей) и последующего их роста в виде дендритных кристаллов. Материаловедение позволяет предвидеть характер твердофазного взаимодействия компонентов в сплаве. Если атомные размеры и температуры плавления компонентов с одинаковым типом кристаллических решеток отличаются незначительно, то образуются твердые растворы с неограниченной растворимостью ( $Fe-Ni$ ,  $Fe-Co$ ,  $Nb-Mo$ ,  $W-Ta$ ). Ограниченную растворимость имеют металлы со значительной разницей атомных размеров и температур плавления ( $Al-Bi$ ,  $Zn-Pb$ ,  $Cu-Sn$ ), причем, чем больше разница, тем меньше растворимость. При очень большой разнице в атомных размерах и различном типе кристаллических решеток растворимость может быть очень малой и образуется механическая смесь. Таким образом, свойства сплава определяются расположением составляющих его компонентов в Периодической таблице Д.И. Менделеева, типом и размером их кристаллических решеток и размерами атомов. Однако

для каждого конкретного набора компонентов существует множество вариантов. Поэтому в материаловедении экспериментальным путем определяют взаимодействие компонентом в сплаве, характер образовавшейся структуры и свойства сплава. С этой целью для конкретных сплавов строят экспериментальные кривые охлаждения и нагрева сплавов в координатах температура – время.

Точки нагрева на кривых охлаждения характеризуют температуры, при которых начинаются или заканчиваются физико-химические изменения в сплавах. Эти точки называются критическими точками или критическими температурами. Соединяя критические точки, получают линии диаграммы состояния. Геометрическое место всех точек, которые определяют температуру начала кристаллизации, называют линией ликвидус ( $L$ ), конца кристаллизации – линией солидус ( $S$ ).

Изучение полученных микроструктур, определение типа и параметров кристаллической решетки, а также свойств сплавов наряду с кривыми охлаждения позволяют построить диаграмму состояния (диаграмму равновесия) для изучаемой системы. Диаграмма состояния в удобной графической форме показывает фазовое состояние сплава в зависимости от температуры и концентрации компонентов. По ней можно установить, какие превращения происходят в сплаве при нагреве (охлаждении), определить температуры плавления или затвердевания сплава, выбрать рациональный режим термической обработки, прогнозировать поведение сплава в заданном интервале температур.

При построении диаграммы состояния используют правило фаз, которое устанавливает возможное число фаз и условия, при которых они могут существовать в конкретной системе:  $C=K+B-\Phi$ , где  $C$  – число степеней свободы, определяет количество независимых переменных (температура, концентрация, давление), которое можно изменить не нарушая равновесия в системе, т.е. не изменяя числа фаз;  $K$  – число компонентов;  $B$  – число внешних переменных факторов;  $\Phi$  – число фаз.

Для металлических сплавов можно принять  $V=1$  (в качестве внешних факторов учитывается только температура) и таким образом правило фаз запишется в виде:  $C=K+1-F$ .

Рассмотрим равновесие однокомпонентной системы (чистый металл). Если в системе существует только одна фаза (жидкая или твердая), то  $K=1$ ,  $F=1$  и  $C=1+1-1=1$ , т.е. имеется лишь одна степень свободы. Это значит, что в определенном температурном интервале металл можно нагревать или охлаждать, сохраняя однофазное состояние. Если в момент затвердевания или плавления в системе существует две фазы (жидкая и твердая), то  $K=1$ ,  $F=2$  и  $C=1+1-2=0$  – степеней свободы нет. Такое равновесие возможно только при постоянной температуре и пока одновременно существуют две фазы, температура превращения не изменится. Для двухкомпонентной системы при наличии двух фаз в процессе затвердевания системы  $K=2$ ,  $F=2$  и  $C=2+1-2=1$  имеется одна степень свободы и равновесие в системе сохраняется в интервале температур (температуры начала и конца кристаллизации).

#### Диаграммы состояния сплавов, образующих механическую смесь

Компоненты данных сплавов неограниченно растворяются в жидкой фазе и практически не растворимы в твердой. Смесь кристаллов в сплаве называют эвтектической или эвтектикой, если она кристаллизовалась из жидкости при постоянной температуре более низкой, чем температуры плавления отдельных компонентов, образующих сплав.

На **рис.1.13** приведена диаграмма состояния сплава, образующих механическую смесь и эвтектику, построенная по кривым охлаждения. Как видно из приведенных данных температуры начала кристаллизации ( $L_0, L_{20}, L_{40}, L_{60}, L_{80}, L_{100}$  – точки ликвидуса) зависят от концентрации компонентом. Температура конца кристаллизации ( $S_0, S_{20}, S_{40}, S_{60}, S_{80}, S_{100}$  – точки солидуса) не зависят от концентрации и постоянны. Для чистых металлов разница температур начала и конца кристаллизации равна нулю (для

компонента «А» – точки  $L_0$  и  $S_0$ , для «В» – точки  $L_{100}$  и  $S_{100}$ ). При перенесении с кривых охлаждения значения критических температур на сетку с координатами температура – концентрация, получим линии ликвидуса –  $KCN$  и солидуса –  $DCE$ , т.е. построим диаграмму состояния, в которой различают шесть зон: Зона выше линии  $KCN$  – жидкий раствор, зона  $KCD$  - жидкий раствор и кристаллы компонента «А», зона  $NCE$  - жидкий раствор и кристаллы «В». По линии  $CT$  выделяется эвтектика, состоящая из кристаллов «А» и «В». Кристаллизация эвтектического сплава носит особый характер. Температуры начала и конца кристаллизации совпадают, одновременно выделяются оба кристалла («А» и «В»), основная масса которых обирается в своих определенных местах (восходящая диффузия), но в отдельных объемах возможны отклонения от среднего состава (флуктуации). Эти флуктуации и являются центрами кристаллизации. Кристаллизация эвтектики происходит одновременно на многих центрах, поэтому эвтектическая смесь состоит из множества мелких кристаллов. Вновь образованный кристалл одного компонента является центром кристаллизации другого компонента (идет наслаивание кристаллов), поэтому эвтектика имеет пластинчатое строение. Чем больше поверхностное натяжение в сплаве, тем более округлыми получаются кристаллы. Влево от эвтектики (зона  $DCT$ ) существует структура, состоящая из механической смеси кристаллов «А» и эвтектики ( $A+B$ ), а вправо (зона  $ECT$ ) находится механическая смесь из эвтектики ( $A+B$ ) и кристаллов «В».

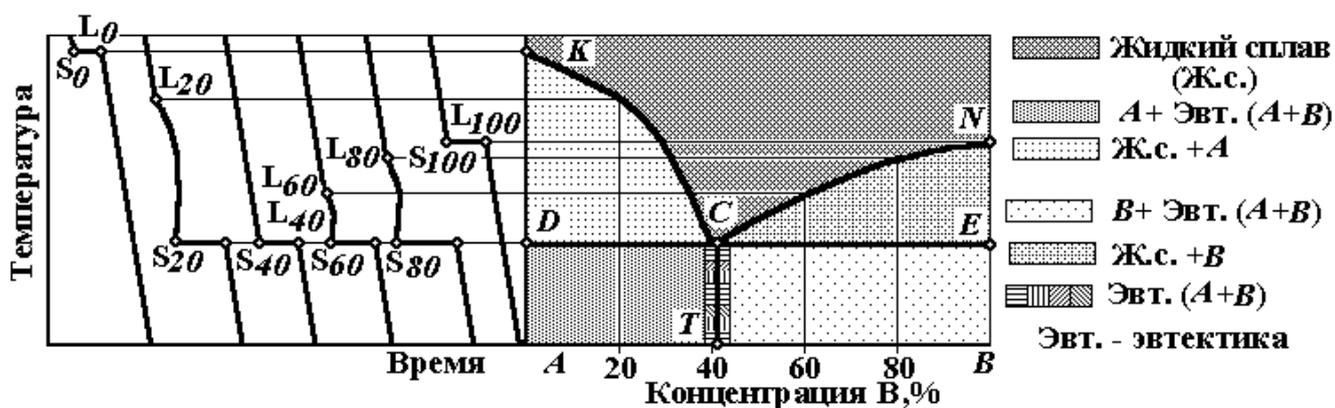


Рис. 1.13. Сплавы, образующие механическую смесь компонентов;

А, В - компоненты сплава; Эвт. – эвтектика; L0, L20, L40, L60, L80, L100 - температура начала затвердевания раствора при концентрации компонента «В» соответственно 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%; S0, S20, S40, S60, S80, S100 - температура конца затвердевания раствора при концентрации компонента «В» соответственно 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%; С - Т – ордината эвтектики; К-С-N – линия ликвидуса; D-С-Е – линия солидуса.

Диаграмма состояния сплавов компоненты, которых полностью растворимы в жидком и твердом состояниях

Полная взаимная растворимость в твердом состоянии возможна тогда, когда оба компонента имеют одинаковые кристаллические решетки и атомные диаметры компонентов мало отличаются по размерам. Такая диаграмма имеет простой вид (рис. 1.14, а) и состоит из двух линий – ликвидус и солидус, пересекающихся между собой в точках кристаллизации чистых компонентов «А» и «В». Такие сплавы затвердевают и плавятся в интервале температур ( $C=1$ ). Диаграммы такого типа имеют системы Ag-Au, Mo-W, Fe-Ni и др.

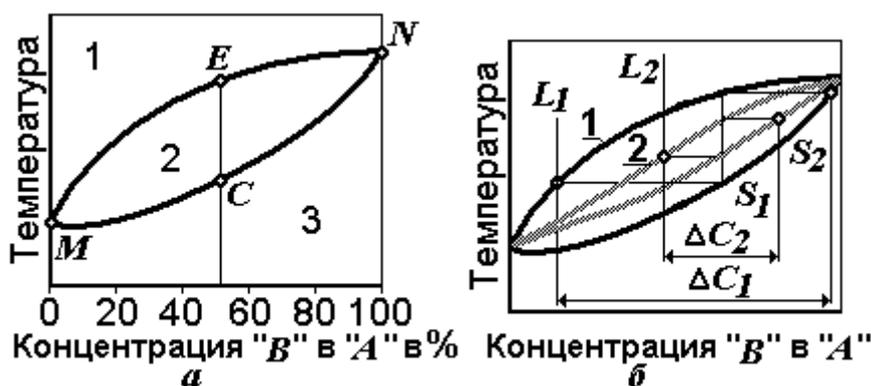


Рис. 1.14. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых полностью растворимы в жидком и твердом состояниях: а – диаграмма состояния; б - диаграмма состояния при разных скоростях охлаждения сплава; А, В - компоненты сплава; MEN – линия ликвидуса; MCN – линия солидуса; 1 – зона жидкой фазы; 2 – зона кристаллизации сплава; 3 – зона твердой фазы; L1, L2; S1, S2;  $\Delta C_1, \Delta C_2$  - точки ликвидуса; солидуса и степень дендритной ликвации для большей (1) и меньшей (2) скорости охлаждения сплава.

Твердые растворы обозначают буквами греческого алфавита ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и т.д.) или сначала ставят химический символ компонента растворителя, а затем в скобках химический символ растворенного вещества, например  $Fe (Ni)$ ,  $Mo (W)$ ,  $Au (Ag)$  и т.д.

В процессе кристаллизации таких сплавов из жидкого раствора выделяются кристаллы твердого раствора. После полного затвердевания структура сплава будет однофазной.

На диаграмме состояния можно выделить три зоны. Первая зона – выше линии ликвидуса, сплав находится в жидком состоянии. Вторая зона – между линиями ликвидуса ( $MEN$ ) и солидуса ( $MCN$ ), в которой происходит кристаллизация сплава в интервале температур и при изменении состава фаз. С понижением – температуры в этой зоны химический состав твердых кристаллов меняется по линии солидус, а состав жидкой фазы по линии ликвидус. Третья зона – ниже линии солидус, сплав представляет собой твердый раствор компонента « $B$ » в « $A$ ». Кристаллы сплава однородны и имеют одинаковый химический состав. Выравнивание состава сплава происходит за счет диффузии и частично путем диффузии более тугоплавкого компонента из внутренних областей кристаллов и внешним зонам (внутрикристаллическая диффузия).

При кристаллизации твердых растворов отчетливо виден рост дендритов. Оси первого порядка образуются при более высокой температуре, поэтому концентрации тугоплавкого компонента в них выше. Оси второго, третьего и более высоких порядков образуются при меньших температурах, поэтому с увеличением номера порядка концентрация тугоплавкого компонента в них уменьшается. При медленном охлаждении состав дендритов выравнивается за счет диффузии. При высоких скоростях охлаждения химическая неоднородность в различных объемах кристаллов сохраняется, что приводит к дендритной или внутрикристаллической ликвации.

Степень дендритной ликвации при быстром охлаждении можно определить по диаграмме состояния (рис. 1.14, б). Оси первого порядка, которые кристаллизуются в начале процесса, будут иметь состав, соответствующий точке  $S_1$ , а последние оси – точки  $L_1$ . Максимальное различие по составу (степень дендритной ликвации) будет  $\Delta C_1$ . При уменьшении скорости охлаждения диаграмма состояния сужается и степень дендритной ликвации станет равной  $\Delta C_2$  ( $\Delta C_2 < \Delta C_1$ ) т.е. степень дендритной ликвации будет меньше. Кроме того, из диаграммы следует, что дендритная ликвация исправима, если сплав в твердом состоянии нагреть до температур несколько ниже линии солидуса и выдержать при этой температуре в течение времени, необходимого для выравнивания состава за счет диффузии.

Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых ограниченно растворимы в твердом состоянии и образуют эвтектику.

Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых ограниченно растворимы в твердом состоянии и образуют эвтектику

Сплавы, составы которых расположены в областях твердых растворов  $\alpha$  и  $\beta$  (рис. 1.15).

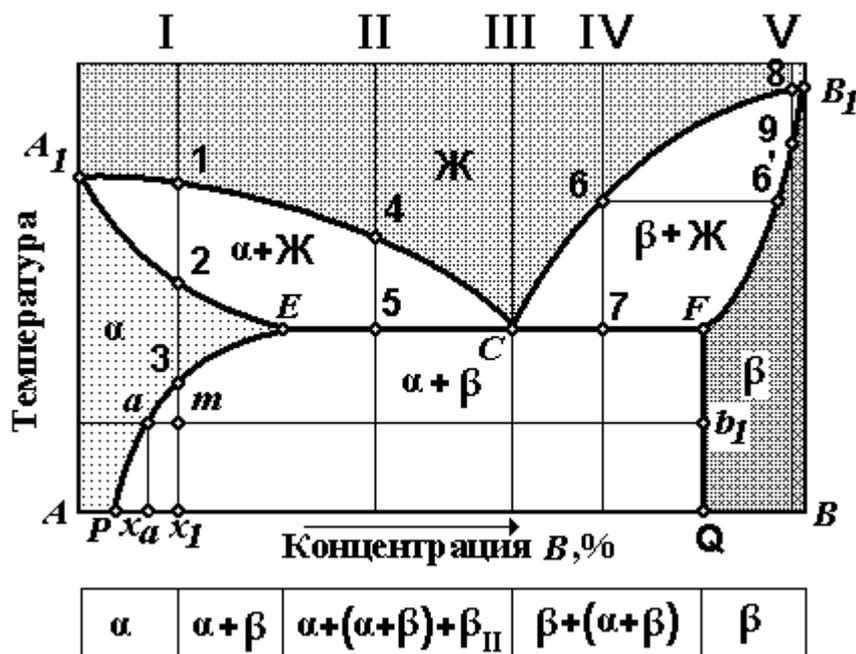


Рис. 1.15. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых ограничено растворимы в твердом состоянии и образуют эвтектику (растворимость двусторонняя, переменная, увеличивающаяся с повышением температуры): I, II, III, IV, V – сплавы; Ж – жидкость;  $\alpha$ ,  $\beta$  – твердые фазы; A, B, C, E, P, Q – точки диаграммы состояния;  $x_a$ ,  $x_1$  – состав сплава I.

Кристаллизуются точно так же, как и сплавы предыдущей диаграммы состояния, т.е. в этих областях образуются однородные твердые растворы:  $\alpha$ , на базе компонента «A», с атомной решеткой, характерной для этого компонента, и  $\beta$  с атомной решеткой компонента «B». Предельная концентрация компонента «A» в фазе  $\beta$  определяется линией  $FQ$  и практически не изменяется. Твердый раствор компонента «B» в «A» является ограниченным раствором с переменной растворимостью, которая меняется по линии  $EP$  в зависимости от температуры. Максимальное содержание компонента «B» в  $\alpha$  - фазе определяется точкой «E» и при охлаждении снижается до точки «P». Рассмотрим превращения сплава I состава  $x_1$ . После полного затвердевания в точке 2 кристаллы имеют состав  $x_1$  и сохраняют его до точки 3. При дальнейшем охлаждении концентрация компонента «B» в твердом растворе уменьшается до состава, соответствующего точке «P». Определим фазовое состояние сплава I для какой либо температуры, например для  $t_1$ . Проверим через точку  $m$  горизонтальную линию до пересечения с ближайшими линиями диаграммы состояния ( $EP$  и  $FQ$ ); проекции точки пересечения ( $a$ ,  $b$ ) на ось концентраций укажут состав фаз, находящихся в равновесии при температуре  $t_1$ . Таким же образом можно определить состав фаз, находящихся в равновесии для любой температуры – правило определения состава фаз. Количественное соотношение  $\beta$  и  $\alpha$  - фаз при  $t_1$  определяется соответственно отрезками  $am$  и  $mb_1$  (в масштабе всего отрезка  $ab_1$ ) – правило отрезков. По мере уменьшения концентрации в твердом растворе компонент «B» выдает в виде твердого раствора  $\beta$  состава, соответствующего точке Q.

Выпадающие кристаллы твердого раствора  $\beta$  называются вторичными (т.к. они выпали из твердого раствора, а не из жидкого) и обозначаются  $\beta_{II}$ .

Конечная структура сплава I будет состоять из двух фаз  $\alpha + \beta_{II}$ . Сплавы III называются эвтектическими (наиболее легкоплавкими). Он кристаллизуется с одновременным выделением двух твердых фаз определенной концентрации: твердого раствора  $\alpha$  состава точки «E» и твердого раствора  $\beta$  состава точки «F». Эвтектическая реакция протекает по схеме:  $J_c \rightarrow \leftarrow \alpha_E + \beta_F$ , где:  $J_c$  – жидкая фаза в точке «C».

При эвтектической реакции одновременно существуют три фазы – жидкая и два твердых раствора, поэтому степень свободы равна нулю и реакция протекает изотермически и при постоянном составе реагирующих фаз.

Эвтектические кристаллы  $\alpha$  и  $\beta$  имеют форму пластин и равномерно чередуются между собой, образуя колонии.

В доэвтектическом сплаве II эвтектическому превращению предшествует выделение кристаллов  $\alpha$  из жидкого раствора в интервале температур точек 4-5. В результате жидкая фаза обогащается компонентом «B» и охлаждение до температур точки 5 приводит к образованию в сплаве двух фаз определенного состава

$\alpha_E + J_c$ . Количество жидкой фазы выражается отрезком 5-E, а количество твердой фазы – отрезком 5-C.

При эвтектической температуре (точка 5) жидкий раствор превращается в эвтектику состава ( $\alpha_E + \beta_C$ ). По мере охлаждения из твердого раствора  $\alpha$  выделяются кристаллы  $\beta$  и при комнатной температуре структура сплава запишется в виде:  $\alpha_P + \text{эвт.}(\alpha_P + \beta_Q)$ .

Для заэвтектического сплава IV кристаллизация в интервале температур точек 6-7 сопровождается выделением  $\beta$  - фазы, богатой компонентом «B», что приводит к обеднению жидкого раствора этим элементом. Состав выделяющихся кристаллов  $\beta$  изменяется от точки б' до точки «F», а состав жидкой фазы – от точки б до точки «C». При охлаждении до температур

точки 7 произойдет эвтектическое превращение: Жс  $\leftrightarrow$  эвт. ( $\alpha_E + \beta_F$ ). При комнатной температуре структура сплава будет иметь вид:  $\beta_Q + \text{эвт.}(\alpha_P + \beta_Q)$ . Все сплавы составов от точки «P» до точки «Q» содержат структурную составляющую эвтектику, количество ее тем больше, чем ближе состав сплава и эвтектическому.

Диаграмма состояния сплавов с полиморфным превращением компонентов и эвтектоидным превращением

Полиморфные превращения компонентов сплава изменяют его структуру и свойства, что позволяет путем термической обработки получать материалы с новыми свойствами.

На **рис. 1.16, а** показана диаграмма состояния сплава с полиморфным превращением одного из компонентов (компонента «А»). Сплав I после полного затвердевания при температуре точки 2 при дальнейшем охлаждении в интервале температур точек 3-4 изменяет свою кристаллическую структуру за счет полиморфного превращения  $\gamma \rightarrow \alpha$ . Таким образом до температур точки 4 сплав I будет иметь кристаллическую решетку  $A_\alpha$ , а выше температуры точки 3 -  $A_\gamma$ , причем кристаллическая решетка  $A_\gamma$  такая же, что и у компонента «В», поэтому они образуют непрерывные ряды твердых растворов. При комнатной температуре в зависимости от состава сплава могут иметь однофазные структуры ( $\alpha$ - левее точки  $x_a$ ,  $\gamma$ - правее точки  $x_b$ ) или двухфазную – между точками  $x_a$  и  $x_b$ .

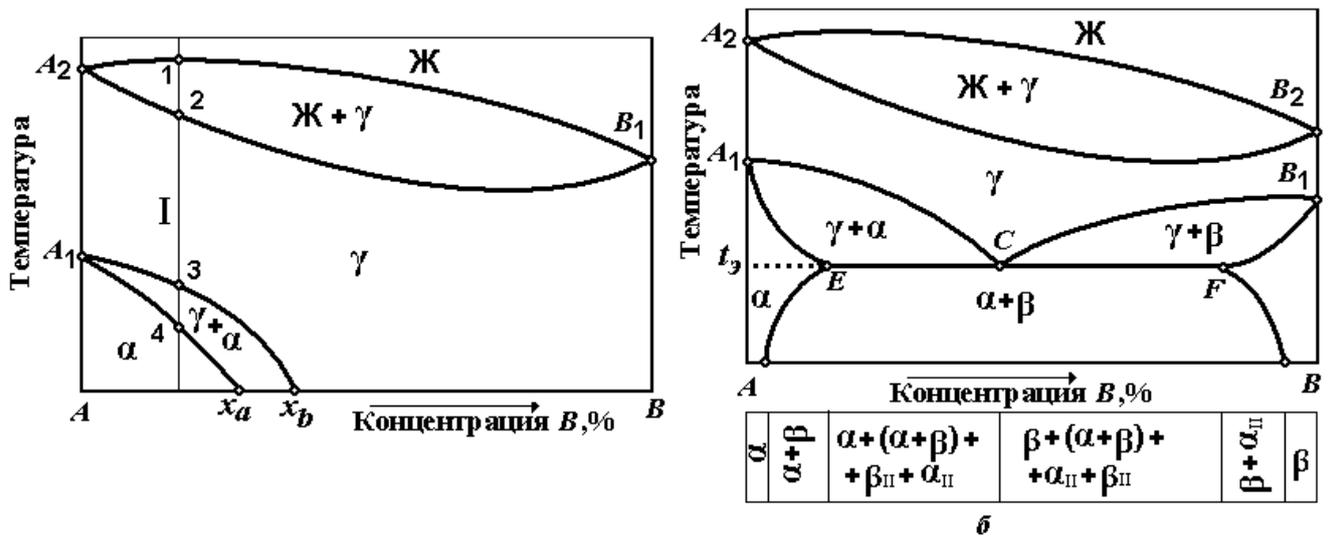


Рис. 1.16. Диаграммы состояния сплавов: а – с полиморфным превращением компонента «А»; б - с полиморфным превращением двух компонентов и образованием эвтектоида; А, В – компоненты сплавов; Ж – жидкая фаза;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – однофазные сплавы; I – сплав;  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ , C, E, F – точки диаграммы состояния;  $t_e$  – температура эвтектоидного превращения;  $x_a$ ,  $x_b$  – концентрация.

На рис. 1.16, б представлена диаграмма состояния сплавов с полиморфным превращением двух компонентов и образованием эвтектоида. Ниже линии солидуса ( $A_2B_2$ ) до линии  $A_1CB_1$  сплавы представляют собой твердый раствор  $\gamma$ , который при понижении температуры ниже  $t_e$  испытывает эвтектоидное превращение с образованием смеси двух твердых фаз (эвтектоид):  $\gamma_C \rightarrow \alpha_E + \beta_F$ . При дальнейшем охлаждении до комнатной температуры взаимная растворимость компонентов уменьшается (линии  $AE$  и  $BF$ ) и происходит вторичные выделения твердых растворов  $\beta_{II}$  и  $\alpha_{II}$ , что показано на структурной схеме сплавов.

Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью  
компонентов в твердом состоянии и с перитектикой

В сплавах с содержанием компонента «В» меньше  $x_C$  или больше  $x_F$  кристаллизация приводит к образованию однофазных сплавов  $\alpha$  и  $\beta$  соответственно (рис. 1.17).

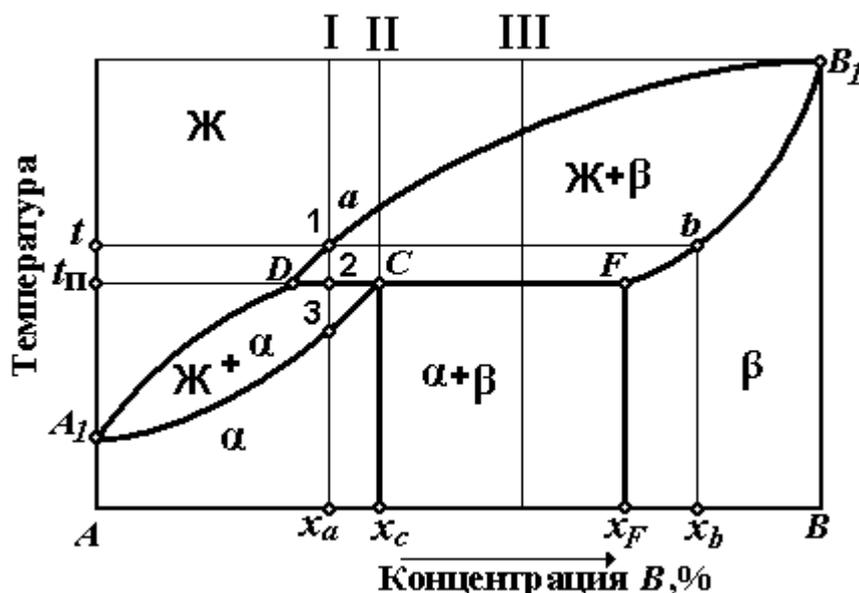


Рис. 1.17. диаграммы состояния сплавов, компоненты которых ограничено растворимы в твердом состоянии и образуют перитектику: А, В – компоненты сплавов; Ж – жидкая фаза;  $\alpha$ ,  $\beta$  – однофазные сплавы; I, II, III – номера сплавов;  $A_1$ ,  $B_1$ , C, D, F – точки диаграммы состояния;  $t_p$  – температура перитектической реакции;  $x_a$ ,  $x_b$ ,  $x_C$ ,  $x_F$  – концентрация.

Сплав II называют перитектическим. После предварительного выделения  $\beta$ -кристаллов из жидкой фазы сплав при температуре  $t_p$  испытывает перитектическое превращение, в результате которого жидкая фаза ( $Ж_D$ ) и твердая фаза ( $\beta_F$ ) реагируют между собой, образуя новую твердую фазу  $\alpha_C$ :  $Ж_D + \beta_F \rightarrow \alpha_C$ . При температуре  $t_l$  фазовый состав сплава II определяется точками  $x_a$  и  $x_b$ . По мере понижения температуры до  $t_p$  состав жидкой фазы меняется по линии  $aD$ , а твердой – по линии  $bF$ .

В сплавах до – и заперитектических при температуре перитектической реакции имеется избыток жидкой или твердой фазы соответственно. В связи

с этим для сплава III перитектическая реакция заканчивается образованием новой  $\alpha$  - фазы, но при этом остается избыток фазы  $\beta$ :  $J_{D} + \beta_{F} \rightarrow \alpha_{C} + \beta_{F}$ . В результате образуется смесь, состоящая из кристаллов  $\alpha_{C}$  и  $\beta_{F}$ , причем фаза  $\beta$ , которая выделилась раньше, окружена фазой  $\alpha$ .

Для доперитектических сплавов (сплав I) перитектическая реакция не приводит к полному затвердеванию сплава, так как наряду с вновь образовавшейся фазой  $\alpha_{C}$  сохраняется жидкая фаза:  $J_{D} + \beta_{F} \rightarrow \alpha_{C} + J_{D(\text{ост})}$ . В интервале точек 2-3 из оставшейся жидкой фазы выделяются кристаллы фазы  $\alpha$ , и ниже точки 3 структура сплава будет однофазной, где практически невозможно отличить кристаллы  $\alpha_{C}$ , выделявшиеся при перитектической реакции, от кристаллов  $\alpha$ , выпавших из оставшейся жидкой фазы.

### **Контрольные вопросы**

Каким образом вакансии перемещаются в глубь кристаллической решетки?

Почему в зоне дислокаций кристаллическая решетка упруго искажена?

Опишите происхождение винтовой дислокации.

Почему на границах зерен атомы располагаются иначе, чем в глубине зерна?

Что такое самодиффузия атомов?

Как происходит кристаллизация: чистых металлов; сплавов?

Что означает термин «фаза»?

Что означают термины «точка ликвидуса» и «точка солидуса»?

Опишите зоны, наблюдаемые на диаграмме состояния сплавов, образующих механическую смесь?

## ***ГЛАВА 2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ***

Механические свойства материалов определяют их поведение под воздействием приложенных внешних нагрузок. К ним относятся: Прочность – сопротивление материала деформации и разрушению. Упругость – свойство материала восстанавливать первоначальную форму после снятия нагрузки. Твердость – свойство материала сопротивляться проникновению в него другого более твердого тела. Хрупкость - свойство материала разрушаться без заметного поглощения механической энергии в необратимой форме. Вязкость - свойство материала, не разрушаясь, поглощать в заметных количествах механическую энергию в необратимой форме. Изнашиваемость - свойство материала подвергаться поверхностному разрушению или повреждению под воздействием внешнего трения. Износостойкость – сопротивление материалов деталей машин и других трущихся изделий износу. Выносливость - свойство материала выдержать, не разрушаясь, большое число повторно- переменных напряжений. Постепенное разрушение материала при большом числе повторно- переменных напряжений называется усталость. Ползучесть – способность материала медленно и непрерывно деформироваться при постоянном напряжении и повышенной температуре.

Количественные (числовые) характеристики прочностных параметров определяются стандартными испытаниями. Различают испытания: статические на растяжение, сжатие, изгиб, кручение; динамические на ударную вязкость; на усталость при цикловых нагрузках; технологические.

### ***2.1. Статические испытания***

Статические испытания осуществляются при медленном возрастании нагрузок. Основным видом испытаний является испытание на растяжение (ГОСТ 1497-84\*) позволяющее определить прочность материала и его склонность к упругим и пластическим деформациям. При испытаниях, на

специальных разрывных машинах растягивают стандартный образец. При этом измеряют силу сопротивления созданной деформации (рис. 2.1).

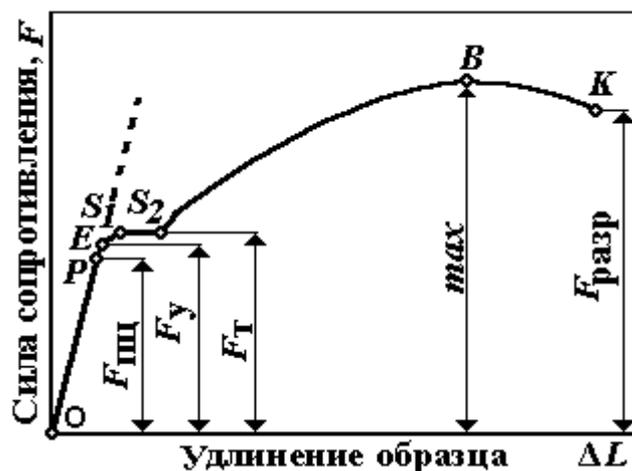


Рис. 2.1. Диаграмма растяжения металлов:

OP – участок упругой деформации; E – точка удлинения образца на 0,05%;  
 $S_1, S_2$  – площадка текучести; B – наибольшая нагрузка на образец; K –  
 разрушение образца;  $F_{пц}$  – наибольшее усилие упругой деформации;  $F_y$  –  
 усилие предела упругости;  $F_{max}$  – усилие предшествующее разрушению  
 образца;  $F_{разр}$  – усилие истинного сопротивления разрушению.

По полученному графику определяют напряжения при различных параметрах деформирования образца:  $\sigma = F/A_0$ , где:  $F$  – усилие в Н;  $A_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца в  $m^2$  или в  $mm^2$ . В технической литературе используется размерность  $MPa - 1N/mm^2 = 1 MPa$ . Этими параметрами являются: Предел пропорциональности  $\sigma_{пц}$  – напряжение, при котором зависимость «нагрузка-удлинение» перестает быть пропорциональной. Участок  $OP$  показывает предел упругой деформации материала, т.е. деформации, после снятия которой, образец возвращается в первоначальное положение.  $\sigma_{пц} = F_{пц} / A_0$  Предел упругости  $\sigma_{0,05}$  – напряжение, при котором остаточное удлинение образца достигает 0,05% его расчетной длины ( $l_0$ ).  $\sigma_{0,05} = F_y / A_0$  Предел текучести  $\sigma_T$  – наименьшее напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,2%  $l_0$ .  $\sigma_T = F_T / A_0$  точка «P» показывает начало пластических деформаций образца. Временное

сопротивление  $\sigma_b$  – напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке  $F_{max}$ , предшествующей разрушению образца. Истинное сопротивление разрыву – напряжение, определяемое отношением нагрузки  $F_{разр}$  к фактической площади поперечного сечения образца в месте разрыва. Относительное удлинение (в %) после разрыва « $\delta$ » - отношение приращения длины образца после разрыва к его первоначальной длине.

## 2.2. Испытания на твердость

Испытание на твердость. Вследствие его простоты и производительности, это наиболее распространенный метод испытаний. При этих испытаниях, в поверхность образца (детали или заготовки) внедряют стандартные наконечники из недеформируемых материалов (методы Бринелля, Роквелла, Виккерса).

Сущность метода Бринелля заключается во вдавливании в образец стального закаленного шарика в образец (рис. 2.2, а).

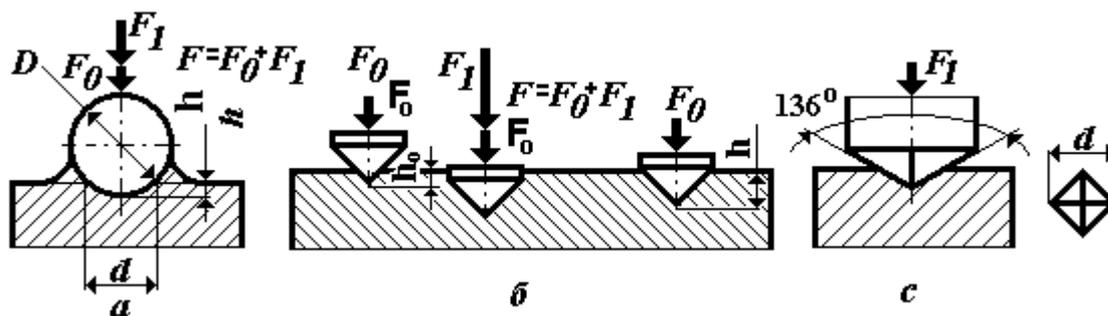


Рис. 2.2. Схемы определения твердости образца методами:

а – Бринелля; б – Роквелла; в – Виккерса;  $F_0$  – предварительная нагрузка;  $F_1$  – основная нагрузка;  $D$  – диаметр шарика;  $d$  – диаметр или длина диагонали отпечатка;  $h_0$  – глубина предварительного вдавливания наконечника;  $h$  – глубина вдавливания шарика или наконечника.

По диаметру полученного отпечатка определяют твердость образца. Диаметр шарика – 2,5; 5; 10 мм. Нагружение – ступенчатое: предварительная нагрузка –  $F_0 = 980\text{Н}$ ; основная нагрузка:  $F_1 = 2943\text{Н}$  (стальной или чугунный образец); 9800Н (образец из алюминия, меди, никеля и их сплавов); 2450Н (образцы из

мягких сплавов). Твердость по Бринеллю определяется по формуле:

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

где:  $d$  – диаметр отпечатка. Твердость по Бринеллю обозначается: соответствующим числом ( $HB200$ ); или диаметром отпечатка (чем меньше диаметр, тем больше твердость). Между числом твердости и временным сопротивлением существуют следующие зависимости: для стали -  $\sigma_B = 0,34 HB$ ; для медных сплавов -  $\sigma_B = 0,45 HB$ ; для алюминиевых сплавов -  $\sigma_B = 0,35 HB$ .

Не рекомендуется применять метод Бринелля для сталей с твердостью более  $HB450$  и для цветных сплавов с твердостью более  $HB200$ .

Сущность метода Роквелла (рис. 2.2, б) заключается во вдавливании в образец алмазного наконечника с углом при вершине  $120^\circ$  (шкала «А» или «С») или стального шарика диаметром 1,5875 мм (шкала «В») в образец. По глубине вдавливания  $h$  определяют твердость. Нагружение – ступенчатое: предварительная нагрузка  $F_0 = 98\text{Н}$ ; основная нагрузка  $F_1$  зависит от применяемой шкалы («А» – 588 Н; «В» – 980 Н; «С» – 1470Н). Твердость определяется: шкалы «А и С»  $HRA(HRC) = 100 - (h - h_0)/0,002$ ; шкала «В»  $HRB = 130 - (h - h_0)/0,002$ . Шкала «А» используется для испытания твердых сплавов, твердого тонкого листового материала. Предельные числа твердости  $HRA$  70...85. Шкала «С» используется для испытания сплавов, прошедших термическую обработку. Предельные числа твердости  $HRC$  20...67. Шкала «В» используется для испытания металлов средней твердости. Предельные числа твердости  $HRB$  20...100.

Для испытаний листовых материалов, тонких деталей используется метод супер-Роквелла. В отличие от Роквелла, данный метод использует малые нагрузки.  $F_0 = 29,4\text{ Н}$ ;  $F_1 = (147; 294; 441\text{ Н})$ . Шкала «N» – алмазный наконечник. Шкала «T» – стальной шарик. Твердость определяется: шкала «N»

$HRN = 100 - (h - h_0)/0,001$ ; шкала «Т»  $HRT = 130 - (h - h_0)/0,001$ . Обозначение: 75 HRN 147 (твёрдость 75 единиц, шкала N, нагрузка 147Н).

Сущность метода Виккерса (рис. 2.2, в) заключается во вдавливании в образец правильной четырехгранной алмазной пирамидки с квадратным основанием и углом между противоположными гранями  $136^\circ$ . Под действием статической нагрузки (49...980Н) за 10...60с пирамидка внедряется в образец. Твёрдость определяют по величине диагонали отпечатка ( $d$ ).

$HV=1,8544F/d^2$ . Метод позволяет определить как самые высокие твёрдости (при нагрузке 980 Н), так и самые низкие твёрдости (при нагрузке 49 Н).

### 2.3. Динамические испытания

Динамические испытания проводятся при скоростях деформирования больших, чем при статических испытаниях. Динамические испытания на ударный изгиб выявляют склонность материала к хрупкому разрушению. Испытания основаны на ударном разрушении образца с концентратором напряжений на маятниковом копре (рис. 2.3). На основании 6 установлена стойка 2 с качающимся ножом 1. Угол поворота ножа вокруг горизонтальной оси отмечается по шкале 3.

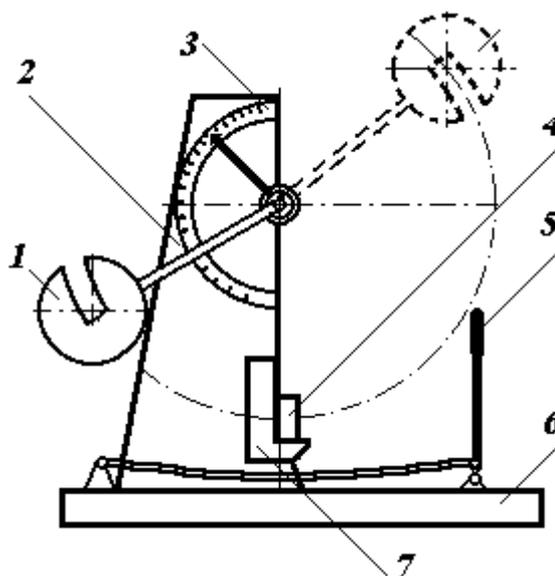


Рис. 2.3. Схема маятникового копра:

1 – нож; 2 – стойка; 3 – шкала; 4 – образец; 5 – ручной тормоз; 6 – основание;  
7 – опоры.

При обратном ходе, нож тормозится ручным тормозом 5. Образец 4 установлен на опорах 7. При прямом ходе, нож разрушает образец, затрачивая часть накопленной потенциальной энергии. Ударная вязкость ( $KC$ ) - отношение работы разрушения образца ( $E$ ) к площади его поперечного сечения ( $S_0$ ):  $KC = E/S_0$ . Стандартные испытания предусматривают применение образцов с тремя видами концентраторов напряжений: пропил с радиусом 1 мм ( $KCU$ ); пропил с радиусом 0,5 мм ( $KCV$ ); образец с усталостной трещиной ( $KCT$ ).

### ***Контрольные вопросы***

1. Что такое прочность?
2. Что такое предел пропорциональности?
3. Что такое твердость?
4. Как определить твердость сырой стали?
5. Как определить ударную вязкость образца?

### ГЛАВА 3. ЖЕЛЕЗО И СПЛАВЫ НА ЕГО ОСНОВЕ

Сплавы на основе железа и углерода (стали и чугуны) наиболее широко применяются в технике. Так в современном машиностроении доля деталей из железоуглеродистых сплавов составляет 80% по массе и 60% по номенклатуре.

Имеются две диаграммы состояния железоуглеродистых сплавов: метастабильная, характеризующая превращения в системе  $Fe - Fe_3C$  (цементит) и стабильная  $Fe - C$  (графит), которая получается при нагреве до высоких температур, когда цементит распадается на железо и графит.

#### 3.1. Компоненты и фазы в системе железо-углерод

Железо и углерод – элементы полиморфные.

Железо – серебристо-белый металл, находится в восьмой группе Периодической таблицы Д.И. Менделеева, его атомный номер 26, атомная масса 55,8, атомный радиус  $1,27 \cdot 10^{-10}$  м (0,127 нм), температура плавления  $1539^\circ\text{C}$ . При температуре выше  $768^\circ\text{C}$  (точка Кюри) железо теряет свои магнитные свойства. Чистое железо содержит порядка 0,0001% примесей, а техническое 0,1...0,2%. Железо имеет два типа кристаллических решеток: ОЦК и ГЦК. В интервале температур  $1539-1392^\circ\text{C}$  железо имеет полиморфную модификацию  $Fe_\alpha$  с ОЦК решеткой, в интервале температур  $1392-911^\circ\text{C}$  – модификацию  $Fe_\gamma$  с решеткой ГЦК, а ниже  $911^\circ\text{C}$  – модификацию  $Fe_\beta$  с решеткой ОЦК.

На кривой охлаждения железа (рис. 3.1) приняты следующие обозначения:  $A_3$  – точка превращения  $Fe_\beta \leftrightarrow Fe_\gamma$ ;  $A_4$  – точка превращения  $Fe_\gamma \leftrightarrow Fe_\alpha$ ;  $A_2$  – точка Кюри (изменение магнитных свойств железа). Горизонталь при температуре  $1539^\circ\text{C}$  связана с началом кристаллизации  $Fe_\alpha$ , а изотермы при температурах  $1392$  и  $911^\circ\text{C}$  обусловлены полиморфными превращениями железа.

Остановка при  $768^\circ\text{C}$  указывает на изменение магнитных свойств железа.

Углерод существует в двух модификациях: графита и алмаза. При нормальных условиях стабилен графит, но при высоких давлениях и

температурах его метастабильная модификация (алмаз) становится стабильной. Графит – углерод, выделяющийся в железоуглеродистых сплавах в свободном состоянии имеет гексагональную решетку. Графит электропроводен, химически стоек, мягок, малопрочен.

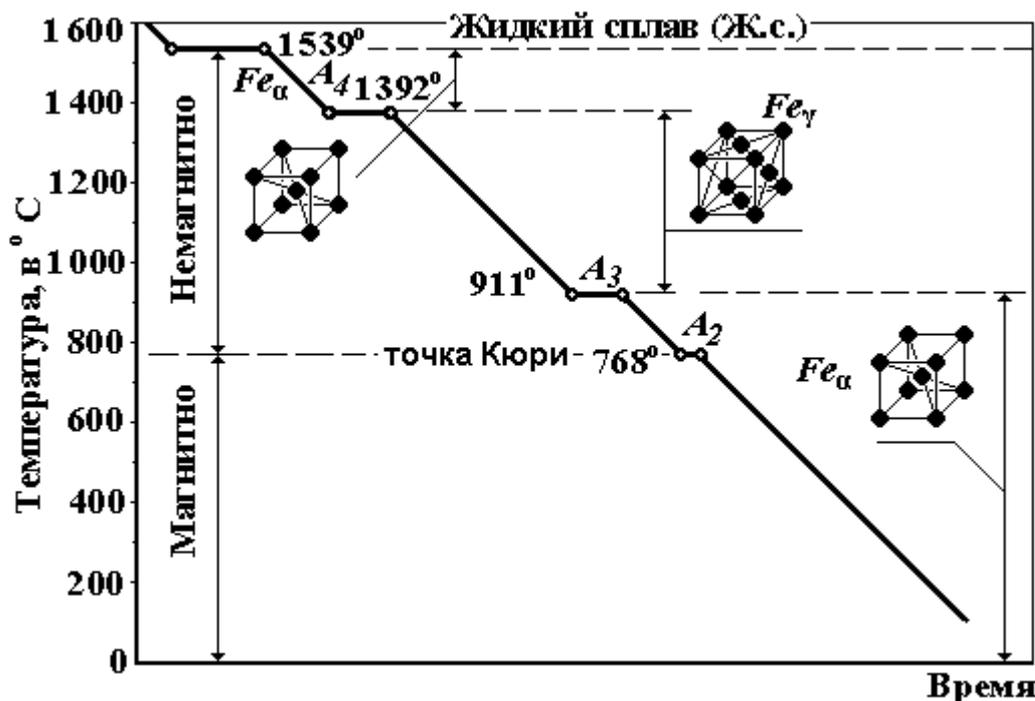


Рис. 3.1. Кривая охлаждения железа: A2 – точка Кюри; A3 – точка превращения Fe<sub>β</sub> ↔ Fe<sub>γ</sub>; A4 – точка превращения Fe<sub>γ</sub> ↔ Fe<sub>α</sub>.

Фазы в сплавах железа с углеродом представляют собой: жидкий раствор (Ж), феррит, аустенит, цементит и свободный углерод в виде графита.

Феррит (Ф<sub>α</sub>) – твердый раствор углерода в Fe<sub>α</sub>. Различают низкотемпературный феррит с растворимостью углерода до 0,02% и высокотемпературный с предельной растворимостью 0,1%. Аустенит (A<sub>γ</sub>) – твердый раствор внедрения углерода в Fe<sub>γ</sub>, предельная растворимость углерода составляет 2,14%. Цементит (Ц, F<sub>3</sub>C) – карбид железа Fe<sub>3</sub>C, содержит 6,67%С. Графит (Гр) – углерод, выделившийся в железоуглеродистых сплавах в свободном состоянии.

### 3.2. Превращения в сплавах железо – цементит

Диаграмма состояния Fe - Fe<sub>3</sub>C (рис. 3.2) характеризует фазовый состав и структуру сталей и белых чугунов.

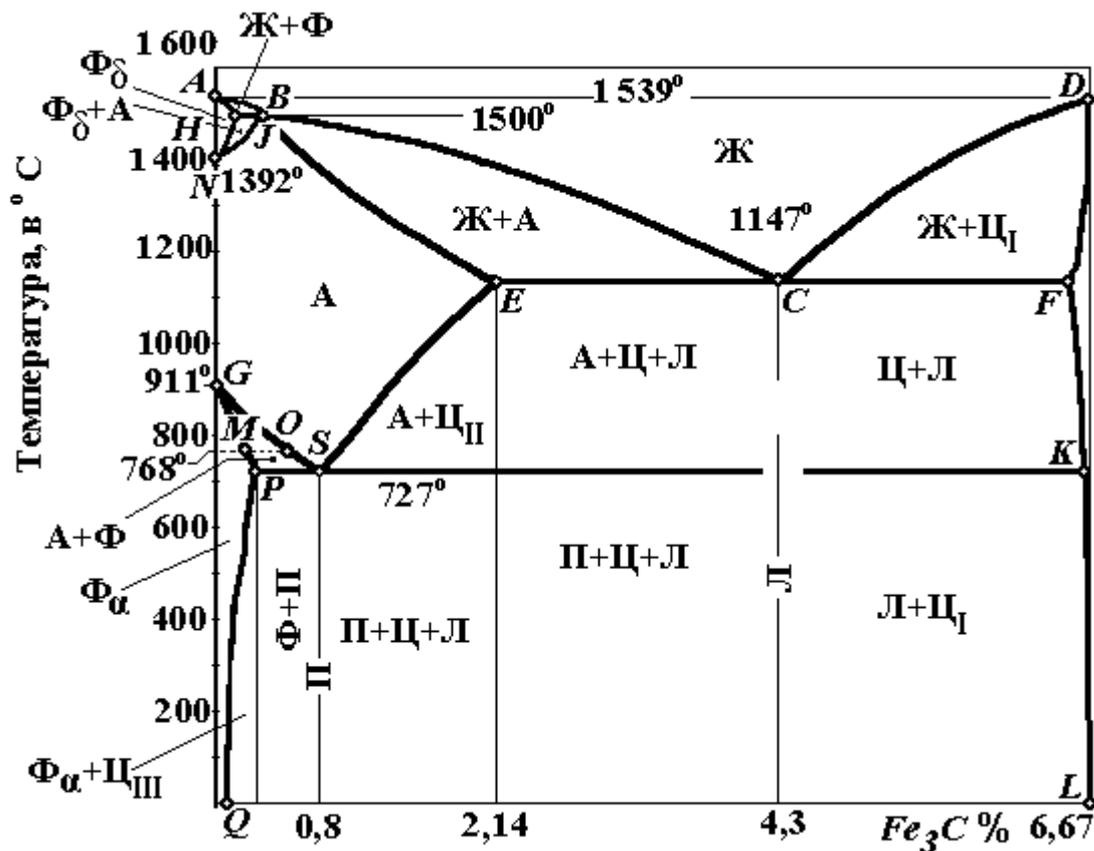


Рис. 3.2. Диаграмма состояния Fe – Fe<sub>3</sub>C: A...L – характерные точки диаграммы; А – аустенит; Ф – феррит; П – перлит; Л – ледебурит; Ж - жидкость.

В системе  $Fe - Fe_3C$  происходят первичная и вторичная кристаллизация. Первичная кристаллизация идет в интервале температур, определяемых на линиях ликвидус ( $ABCD$ ) и солидус ( $AHJECF$ ). Вторичная кристаллизация происходит в результате превращения железа из одной модификации ( $Fe_\gamma$ ) в другую ( $Fe_\alpha$ ). Растворимость углерода в аустените ( $Fe_\gamma$ ) и в феррите ( $Fe_\alpha$ ) с понижением температуры уменьшается (линии  $ES$  и  $PQ$  соответственно), а избыток углерода выделяется из твердых растворов в виде цементита, содержащего 6,67% углерода (линия  $DFKL$ ). Принято обозначать цементит, выделившийся из жидкости по линии  $CD$  – первичным ( $Ц_I$ ), из аустенита по линии  $ES$  – вторичным ( $Ц_{II}$ ) и из феррита по линии  $PQ$  – третичным ( $Ц_{III}$ ).

В диаграмме железо-цементит происходят три изотермических превращения. Перитектическое превращение происходит при 1499°C (линия  $HJB$ ):  $Ф_H + Ж_B \rightarrow A_J$ . Эвтектическое превращение при 1147°C (линия  $ECF$ ):

$J_C \rightarrow [A_E + \text{Ц}_I]$  - фазы обозначают квадратными скобками. Полученная эвтектическая смесь аустенита, называется ледебуритом ( $\Lambda$ ). Эвтектоидное превращение при  $727^\circ$  (линия  $PSK$ ):  $A_S \rightarrow [\text{Ф}_P + \text{Ц}_{II}]$ . Эвтектоидная смесь феррита и цементита называется перлитом ( $\Pi$ ). Ледебурит (4,3% углерода) и перлит (0,8% углерода) являются структурными составляющими и оказывают большое влияние на свойства железоуглеродистых сплавов. Перлит, как правило, имеет пластинчатое строение и является прочной структурной составляющей.

Ниже линии  $SK$  аустенит, входящий в состав ледебурита распадается на перлит и цементит, причем цементит представляет собой сплошную матрицу, в которой расположены колонии перлита и это определяет большую твердость ледебурита и повышенную его хрупкость. Наличие ледебурита в структуре сплавов делает невозможным обработку их давлением или резанием.

В зависимости от содержания углерода железоуглеродистые сплавы в соответствии с диаграммой  $Fe - Fe_3C$  подразделяют на: стали (меньше 2,14% углерода) и чугуны (свыше 2,14% углерода).

### ***3.3. Превращения сталей в твердом состоянии***

Основные виды технологических операций (термическая обработка, деформация, резание и другие) проводят в твердом состоянии, поэтому рассмотрим превращения, происходящие в сталях при температурах ниже линии солидус.

На **рис. 3.3, а** представлена часть диаграммы  $Fe - Fe_3C$  для сплавов, не испытывающих эвтектоидного превращения.

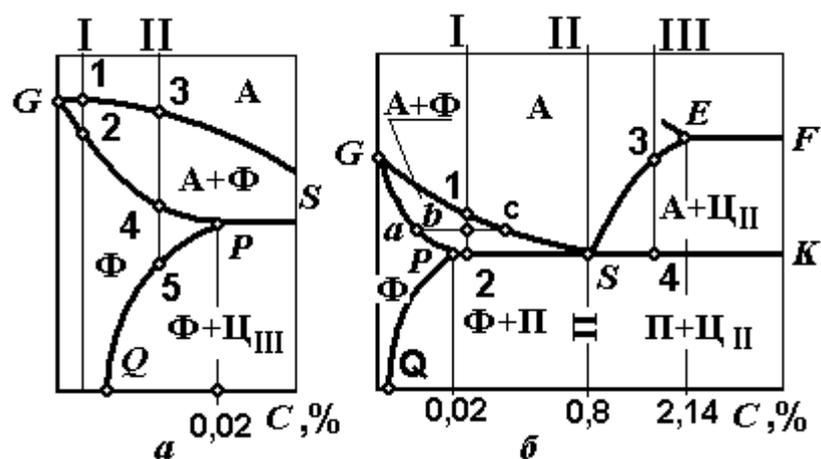


Рис. 3.3. Часть диаграммы состояния Fe – Fe<sub>3</sub>C для сплавов, не испытывающих (а) и испытывающих (б) эвтектоидное превращение: I, II, III – сплавы; А - аустенит; Φ – феррит; Π – перлит; ЦII – цементит вторичный; ЦIII – цементит третичный.

Сплавы с содержанием углерода при комнатной температуре менее 0,0002% (точка Q) имеют однородную структуру феррита, которая получается в результате распада аустенита от температуры точки 1 до температуры точки 2 (сплав I). В интервале концентраций углерода 0,0002 до 0,02% после образования феррита (сплав II, точка 5), из него начинает выделяться третичный цементит и при комнатной температуре образуется двухфазная структура – феррит и третичный цементит. Цементит располагается по границам зерен в виде прослоек, что несколько снижает технологичность этих сплавов. Все сплавы с содержанием углерода до 0,02% называются техническим железом.

Сплавы I (рис. 3.3, б) содержащий менее 0,8% углерода при температурах ниже линии PSK имеют структуру феррита и перлита, и называются доэвтектоидными сталями. Сплав II с содержанием углерода 0,8% при температуре точки «S» испытывает эвтектоидное превращение аустенита в смесь феррита и цементита, образующих структурную составляющую – перлит. Такой сплав называется эвтектоидной сталью. Увеличение содержания углерода свыше 0,8% приводит, при охлаждении в интервале

температур, соответствующих точкам 3-4, к выделению цементита вторичного из аустенита.

Ниже температур линии *PSK* структура будет представлять собой смесь перлита, полученного в результате эвтектоидного распада аустенита и вторичного цементита расположенного в виде сетки по границам зерен перлита. Такие сплавы ( $0,8\% < \text{углерода} < 2,14\%$ ) называются заэвтектоидными сталями.

### 3.4 Превращения чугунов

Сплавы системы *Fe - Fe<sub>3</sub>C* с содержанием углерода свыше 2,14% называются белыми чугунами (рис. 3.4). Эти сплавы при температурах линии *ECF* испытывают эвтектическое превращение с образованием структурной составляющей ледебурит, который представляет собой смесь аустенита и цементита.

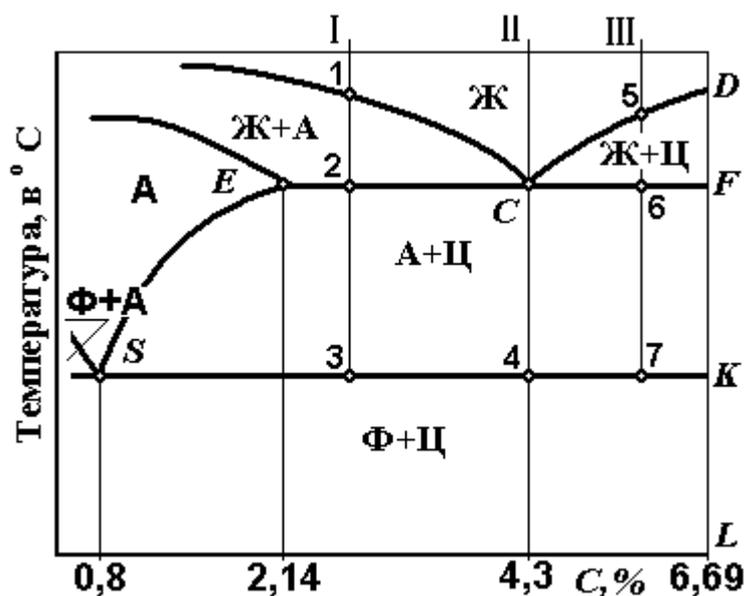


Рис. 3.4. Часть диаграммы состояния Fe – Fe<sub>3</sub>C для высокоуглеродистых сплавов (чугунов): I, II, III – сплавы; А - аустенит; Ф – феррит; П – перлит; Ц – цементит Ж - жидкость.

В зависимости от содержания углерода различают доэвтектические (углерода <4,3%), эвтектические (углерода = 4,3%) и заэвтектические (углерода > 4,3%) белые чугуны.

В доэвтектических белых чугунах (сплав I) кристаллизация начинается с выделения из жидкого раствора аустенита в интервале температур точек 1-2. В точке 2 происходит эвтектическое превращение и при температурах соответствующих точкам 2-3, структура состоит из аустенита и вторичного цементита. На линии *PSK* происходит эвтектоидный распад аустенита на феррит и цементит (перлит).

Конечная структура доэвтектических белых чугунов будет представлять собой ледебурит и цементит вторичный. В эвтектических белых чугунах (углерода 4,3%) кристаллизация начинается при температуре точки «С», с эвтектической реакции и образования смеси аустенита и цементита – ледебурита (сплав II). На линии *PSK* (точка 4) эвтектический ледебурит меняет свой фазовый состав в результате эвтектоидного превращения и конечная структура будет представлять собой смесь перлита и цементита – ледебурит видоизмененный. В заэвтектических белых чугунах (сплав III) кристаллизация начинается с выделения из жидкого раствора кристаллов первичного цементита (точки 5-6). На линии *ECF* происходит эвтектическое превращение, и структура представляет собой смесь ледебурита и цементита первичного. На линии *PSK* (точка 7) аустенит, входящий в состав ледебурита, испытывает эвтектоидное превращение и образуется перлит, т.е. конечная структура будет состоять из ледебурита (состава перлит и цементит) и цементита первичного.

В ледебурите доля цементита превышает 50%, поэтому белые чугуны обладают большой твердостью и хрупкостью, что не позволяет применять изделия из них в машиностроении. Введение в чугуны различных графитизирующих добавок (кремния, никеля др.) и изменение технологического процесса (увеличение времени выдержки, уменьшение скорости охлаждения) приводит к распаду ледебурита и образованию

свободного углерода – графита, т.е. к получению чугунов с графитом в соответствии с диаграммой состояния железо – графит.

### 3.5. Чугуны со свободным графитом

На рис. 3.5 изображены диаграммы состояния  $Fe - C$  (графит) и  $Fe - Fe_3C$ . Обе диаграммы принципиально не отличаются друг от друга, но во всех случаях из сплавов в процессах первичной и вторичной кристаллизаций выпадает не цементит, а графит.

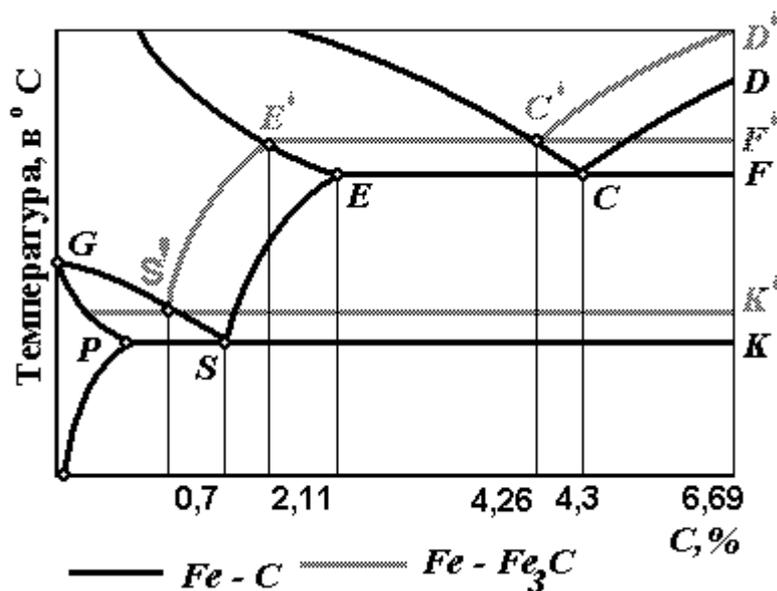


Рис. 3.5. Диаграммы состояния  $Fe - C$  (графит) и  $Fe - Fe_3C$ :

А...L – характерные точки диаграммы; А – аустенит; Ф – феррит; П – перлит; Л – ледебурит; Ж - жидкость.

Первичный графит и графит в эвтектике (графитная эвтектика) кристаллизуется путем образования и роста зародышей в виде лепестков, выходящих из одного центра. Вторичный графит и графит эвтектоида (графитный эвтектоид) выделяется на лепестках первичного и эвтектического графита.

Легирование и термическая обработка позволяет получать чугуны с различной формой графита, которые широко используются для изготовления изделий в машиностроении.

В машиностроении широко применяются чугуны с графитом – серые, высокопрочные и ковкие, которые различаются условиями образования графитных включений и их формой. Углерод в чугунах находится в связанном (в виде цементита) и свободном (в виде графита) состояниях:

$$C_{\text{общее}} = C_{\text{связанное}} + C_{\text{свободное}}$$

В зависимости от концентрации связанного углерода в металлооснове различают ферритные ( $C_{\text{связанное}} < 0,02\%$ ), ферритно-перлитные ( $0,02\% < C_{\text{связанное}} < 0,8\%$ ) и перлитные ( $C_{\text{связанное}} = 0,8\%$ ) чугуны.

Количество графита в чугунах зависит от содержания компонентов и скорости охлаждения.

Углерод и кремний способствуют графитизации, а марганец, хром и сера ее затрудняют. С уменьшением скорости охлаждения отливки, количество графита увеличиваются, а при увеличении скорости охлаждения возрастает количество связанного углерода.

Серый чугун содержит свободный углерод в виде пластинок. Серый чугун обозначается числом, показывающим уменьшенный в 10 раз предел прочности на растяжение, в МПа, например СЧ21 ( $\sigma_{\text{в}} = 210$  МПа).

Ферритный (СЧ10) и ферритно-перлитный (СЧ15) чугуны обладают невысоким пределом прочности на растяжение и применяются для изготовления малоответственных деталей машиностроения. Более прочные перлитные серые чугуны марок СЧ21 – СЧ35 содержат графит в виде мелких равномерно рассеянных пластинок и применяются для изделий, работающих при высоких нагрузках или в условиях повышенного изнашивания.

Высокопрочный чугун содержит графит в виде шаровидных включений, полученных путем введения в жидкий чугун специальных добавок – модификаторов (магний, селен или их соединения). Шаровидный графит значительно меньше ослабляет механические свойства металлической основы чем пластинчатый, поэтому чугуны с шаровидным графитом обладают высокой прочностью и некоторой пластичностью. Марка

высокопрочного чугуна состоит из букв ВЧ и числа в 10 раз меньшего значения его прочности (ВЧ 100,  $\sigma_{\text{в}}=1000$  МПа).

При модифицировании чугуна магнием и редкоземельными металлами свободный графит приобретает шаровидную (до 40%) и вермикулярную (в виде мелких прожилок) форму - чугун с вермикулярным графитом. Эти чугуны производятся четырех марок: ЧВГ30, ЧВГ35, ЧВГ40, ЧВГ45. по механическим свойствам эти чугуны занимают промежуточное место между серыми и высокопрочными чугунами. Эти чугуны хорошо заменяют серые чугуны в отливках подвергаемых циклическим нагрузкам: блоки цилиндров, поршни, гильзы, изложницы, кокили.

Для повышения прочности и получения специальных чугунов (жаростойких, коррозионно-стойких) высокопрочные чугуны легируют (хромом, никелем, титаном, марганцем, алюминием и др.) и в ряде случаев подвергают термической обработке.

Ковкий чугун получают длительным отжигом отливок из белого чугуна.

Графит в ковких чугунах имеет хлопьевидную форму. По своим свойствам ковкий чугун занимает промежуточное положение между серым и высокопрочным чугунами. По ГОСТ 1215-79\* ковкий чугун обозначается двумя цифрами: пределом прочности на растяжение (МПа/10) и относительным удлинением (в %), например КЧ 35-10 ( $\sigma_{\text{в}}=350$  МПа,  $\delta=10\%$ ).

Антифрикционные чугуны получают добавлением фосфидной эвтектики в чугуны с графитом. Они маркируются следующим образом: к буквенному обозначению соответствующего чугуна добавляют букву «А», в конце ставят порядковый номер АЧС-1...АЧС-6; АЧВ-1, АЧВ-2, АЧК-1, АЧК-2).

Антифрикционные чугуны применяются для изготовления подшипников скольжения, в которых графит выполняет роль мягкой составляющей.

В табл. 3.1 приведены механические свойства чугунов с графитом и примеры изготовленных из них деталей.

### **3.6. Влияние углерода и технологических примесей на свойства**

#### **стали**

Сталь - многокомпонентный сплав, содержащий углерод и ряд постоянных примесей, влияющих на ее свойства. Наличие этих примесей обусловлено трудностью удаления их из расплава (сера, фосфор), переходом их в сталь в процессе раскисления (марганец, кремний, алюминий) или из шихты (хром, никель).

Марганец вводится в сталь для раскисления и остается в ней в количестве 0,3...0,8%. Марганец уменьшает вредное воздействие серы и кислорода.

Кремний также вводится в сталь в качестве активного раскислителя и остается в ней в количестве до 0,4%, оказывая упрочняющее действие.

Повышение концентрации углерода в стали приводит к увеличению количества цементита, при этом вырастают значения твердости, пределы прочности и текучести, но уменьшаются характеристики пластичности (относительное удлинение и сужение, ударная вязкость и другие). Также с увеличением содержания углерода в стали снижаются показатели электропроводности, магнитной проницаемости и остаточной индукции.

Неметаллические примеси (сера, фосфор, кислород, водород, азот) относятся к вредным примесям. Сера образует с железом химическое соединение  $FeS$ , которое при  $988^{\circ}C$  образует с железом эвтектику по границам зерен. При нагреве стали до  $1000...1200^{\circ}C$  (температуры горячей деформации) эвтектика расплавляется, и в структуре деформированного металла появляются надрывы и трещины – красноломкость.

В зависимости от качества стали содержание серы не должно превышать 0,035...0,06%. Фосфор, растворяясь в феррите, искажает кристаллическую решетку и увеличивает показатели прочности, но сильно снижает значения пластичности и вязкости. Кроме того, располагаясь по границам зерен, фосфор сильно охрупчивает сталь. Допустимое содержание фосфора в стали не должно превышать 0,025...0,045%.

Таблица 3.1

## Механические свойства чугунов и области их применения.

Марка чугуна	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	<i>НВ</i>	Назначение
Серые чугуны				
СЧ10	100	-	190	Крышки, фланцы, маховики, корпуса редукторов, подшипников редукторов, подшипников насосов, суппорты и т.д.
СЧ15	150	-	163-210	
СЧ25	250	-	180-245	Блоки цилиндров, картеры двигателей, барабаны сцепления, станины станков, зубчатые колеса и т.д.
СЧ35	350	-	220-275	
Высокопрочные чугуны				
ВЧ35	350	22	140-170	Оборудование прокатных станков,
ВЧ45	450	10	140-225	К кузнечно-прессовое оборудование.
ВЧ60	600	3	192-227	Корпуса паровых турбин, лопатки направляющего аппарата, коленчатые валы, поршни и др.
ВЧ80	800	2	248-351	
ВЧ100	1000	2	270-360	
Ковкие чугуны				
КЧ30-6	300	6	100-163	Картеры редукторов, ступицы, фланцев, муфты, вилки карданных валов, втулки, муфты, тормозные колодки и т.д.
КЧ35-8	350	8	100-163	
КЧ37-12	370	12	110-163	
КЧ45-7	450	7	150-207	
КЧ60-3	600	3	200-269	
КЧ80-1,5	800	1,5	270-320	

Азот и кислород присутствуют в стали в виде неметаллических включений, в твердом растворе (растворы внедрения) или в свободном виде, располагаясь в дефектных местах металла (раковинах, трещинах). Примеси внедрения (азот, кислород), образуя по границам зерен выделения оксидов и нитридов, повышают порог хладноломкости и снижают ударную вязкость стали. Очень вредным является растворенный в стали водород, который сильно охрупчивает ее. Поглощенный при выплавке водород в ряде случаев приводит к образованию в структуре стали тонких трещин – флокенов, что не позволяет использовать полученный металл в промышленности. Кроме того, все газы в свободном состоянии образуют в слитках множество мелких пустот (пор), что снижает практически все показатели механических свойств.

### 3.7. Влияние легирующих элементов на структуру и свойства сталей

Для придания сталям необходимых свойств в нее специально вводят различные добавки – легирующие элементы, а стали в таком случае называются легированными. Наиболее часто добавляют такие элементы как хром, никель, марганец, кремний, молибден, вольфрам, титан, ниобий, кобальт, алюминий, медь, азот, бериллий и другие.

Практически все легирующие элементы изменяют температуры полиморфных превращений железа, температуры эвтектической и эвтектоидной реакций и влияют на растворимость углерода в железе.

Некоторые легирующие элементы активно взаимодействуют с углеродом, азотом, бором, а также друг с другом и с железом, образуя соответственно карбиды, нитриды, бориды или интерметаллиды (промежуточные фазы).

Температуры фазовых превращений в железе и сталях принято обозначать буквой «*A*» с соответствующим индексом: эвтектоидная температура (линии *PSK*) –  $A_1$ ; температура магнитного превращения (линия *MO*) –  $A_2$ ; температуру линии *GS* –  $A_3$ ; температуру полиморфного превращения (линия *NJ*) –  $A_4$ ; температуру линии *SE* –  $A_m$  (рис. 3.2).

Вследствие гистерезиса температуры превращений введены дополнительные индексы «*r*» – при охлаждении, «*c*» – при нагреве ( $A_r, A_{c1}, A_{r3}, A_{c3}$ ) Магнитное превращение не имеет гистерезиса.

### 3.8. Влияние легирующих элементов на полиморфные превращения

Легирующие элементы, растворяясь в железе, по-разному влияют на температурные области существования модификаций  $Fe_\alpha$  и  $Fe_\gamma$  (температуры  $A_3$  и  $A_4$ ).

Такие компоненты как кобальт, никель, марганец, углерод, азот понижают температуру  $A_3$  и повышают температуру  $A_4$ , т.е. расширяют температурный интервал устойчивости  $Fe_\gamma$ . В сплавах с концентрацией легирующих элементов превышающих концентрацию, соответствующую точке «*B*» диаграммы  $Fe - Fe_3C$  (рис. 3.6, а), модификация  $Fe_\gamma$  с ГЦК решеткой

устойчива при температурах 20...25°C и ниже. Такие стали называются аустенитными.

К элементам расширяющим температурный интервал устойчивости  $Fe_\alpha$  (повышают температуру  $A_3$  и понижают  $A_4$ ) относятся хром, молибден, вольфрам, кремний, титан и др. (рис. 3.6, б). Однофазные сплавы с ОЦК решеткой устойчивые при всех температурах вплоть до солидуса, называются ферритными сталями.

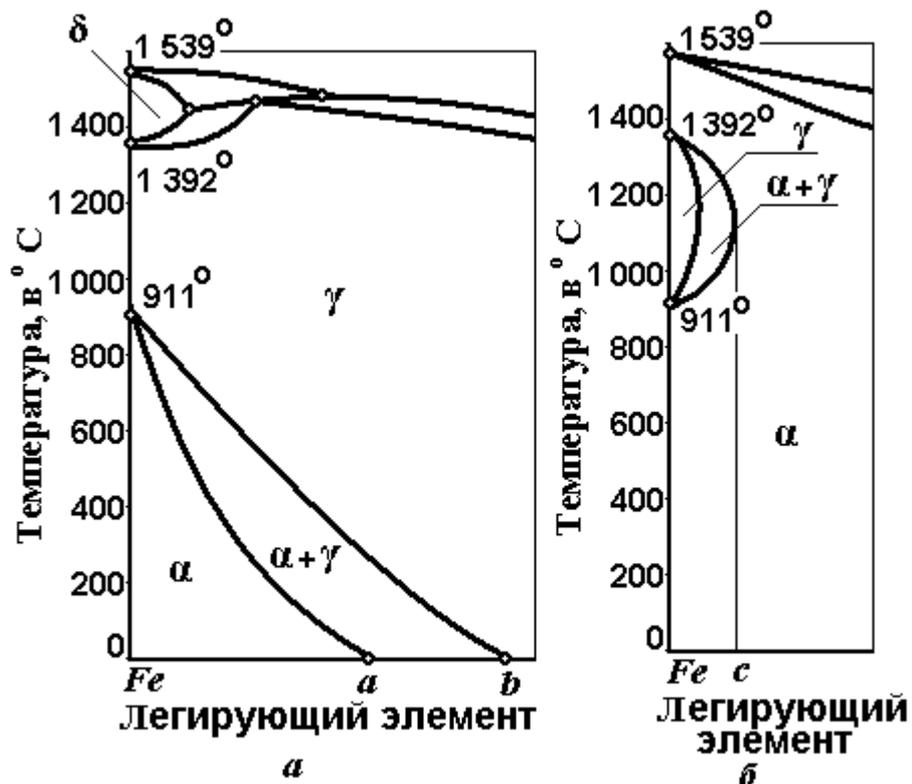


Рис. 3.6. Диаграмма состояния железо – легирующий элемент:  
а - с открытой  $\gamma$  – областью; б - с замкнутой  $\gamma$  – областью.

### 3.9. Влияние легирующих элементов на фазовые превращения сталей

Легирующие элементы расширяющие  $\gamma$  - область (марганец, никель и др.), смещают линии  $PSK$ ,  $GS$  и  $SE$  диаграммы  $Fe - Fe_3C$  в сторону более низких температур, а легирующие элементы, расширяющие  $\alpha$ - область наоборот, смещают эти линии в сторону более высоких температур. На рис. 3.7, а показано влияние легирующих элементов на температуру эвтектоидного превращения при нагреве (линия  $PSK - A_{C1}$ ) диаграммы  $Fe - Fe_3C$ .

Большинство легирующих элементов уменьшает растворимость углерода в аустените при всех температурах, т.е. происходит сдвиг линии SE в сторону меньших концентраций углерода и соответственно уменьшается содержание углерода в эвтектоиде (рис. 3.7, б).

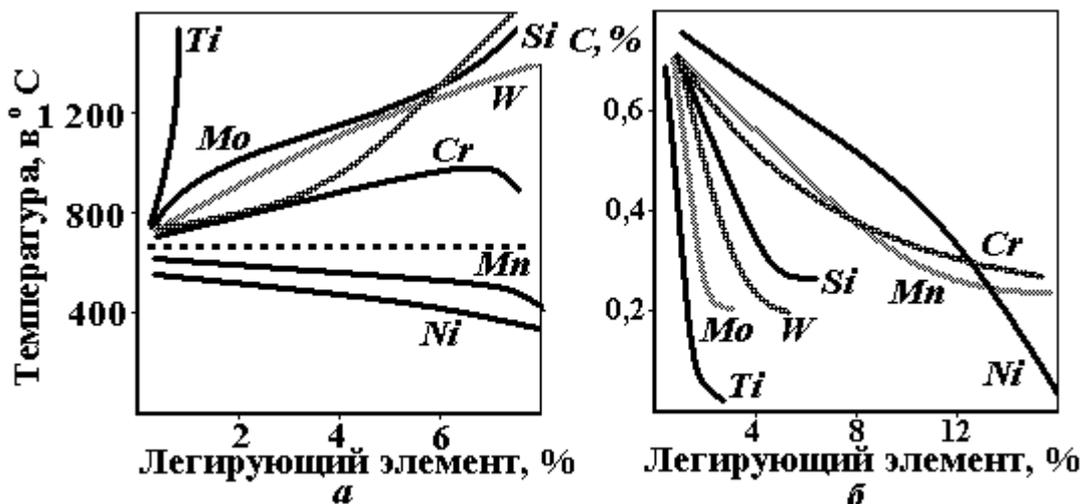


Рис. 3.7. Влияние легирующих элементов на температуру Ac1 (а) и на содержание углерода в эвтектоиде (б).

### 3.10. Карбиды и интерметаллиды в легированных сталях

В сталях карбидообразующими являются следующие элементы: железо, марганец, хром, вольфрам, молибден, ниобий, титан, цирконий (элементы перечислены в порядке их карбидообразующей способности). При небольших концентрациях карбидообразующих элементов они замещают атомы железа в решетке цементита состава  $(Fe, Me)_3C$ , где Me – легирующий металл. Сильные карбидообразующие элементы – молибден, вольфрам, ванадий, ниобий, титан, цирконий могут образовывать самостоятельные карбиды состава MeC или  $Me_2C$ , которые тугоплавки и практически нерастворимы в аустените. Относительно слабый карбидообразующий марганец самостоятельных карбидов в сталях не образует при любых его концентрациях, он легирует цементит  $(Fe, Mn)_3C$ . Промежуточное положение по карбидообразующей способности занимает хром, который образует карбид  $Cr_7C_3$  в низко- и среднелегированных сталях (суммарное содержание

легирующих элементов меньше 10%) или карбид  $Cr_{23}C_6$  в высоколегированных сталях.

Таким образом в зависимости от легирующего элемента и его количества в структуре легированных сталей могут присутствовать следующие типы карбидов: хорошо растворимые в аустените карбиды типа  $Me_3C$ , труднорастворимые карбиды типа  $Me_7C_3$ ,  $M_{23}C_6$ , и почти нерастворимые в твердом состоянии карбиды типа  $MeC$  и  $Me_2C$ .

При высоком содержании легирующие элементы могут образовать с железом или друг с другом интерметаллиды, например  $Fe_7Mo_6$ ,  $Fe_7W_6$ ,  $F_3Nb_2$ ,  $Fe_3Ti$ ,  $Fe_3Cr$ ,  $Mo$  и др.

### **3.11 Структурные классы легированных сталей**

В условиях равновесия легированные стали по структуре делят на следующие классы: доэвтектоидные стали, содержащие в структуре эвтектоид и легированный феррит, эвтектоидные стали и заэвтектоидные, структура последних состоит из эвтектоида и избыточных карбидов  $Me_3C$ . Все эти стали объединяют в один класс – перлитные стали.

Карбидные стали (ледебуритные) имеют в литом состоянии эвтектику типа ледебурит. Хотя по структуре эти стали больше соответствуют белым чугунам, но относительно небольшое количество углерода (менее 2%) позволяет подвергать их пластической деформации (ковке) и отнести их к сталям ледебуритного класса.

При низком содержании углерода и большом количестве легирующего элемента, ограничивающего область существования аустенита структура состоит из легированного феррита с небольшим количеством карбидов – сталь ферритного класса. При высоком содержании легирующего элемента, расширяющего  $\gamma$  - область можно при нормальной температуре получить чисто аустенитную структуру – стали аустенитного класса.

В сталях с частичным превращением  $Fe_\alpha \rightleftharpoons Fe_\gamma$  можно получить полуферритную или полуаустенитную структуры.

Таким образом, основываясь на фазовом равновесии, легированные стали подразделяют на перлитный, ферритный, аустенитный, полуферритный, полуаустенитный и ледебуритный классы.

### 3.12. Влияние легирования на свойства феррита и аустенита

Основой большинства современных сталей является легированный феррит, прочность и твердость которого, как правило, выше, чем у нелегированного. Наиболее сильно повышают прочность и твердость марганец и кремний (рис.3.8, а). Чем мельче зерно феррита, тем выше его прочность. Все легирующие элементы, за исключением никеля, при содержании их в стали выше определенной концентрации (1% хрома, 0,8% кремния, 1,5% марганца и т.д.) снижают значения ударной вязкости (рис. 3.8, б) и трещиностойкости. Легирующие элементы существенно влияют на температуру перехода феррита в хрупкое состояние (порог хладноломкости). Большинство легирующих элементов, кроме никеля, повышают порог хладноломкости. Никель существенно его снижает (рис. 3.8, в).

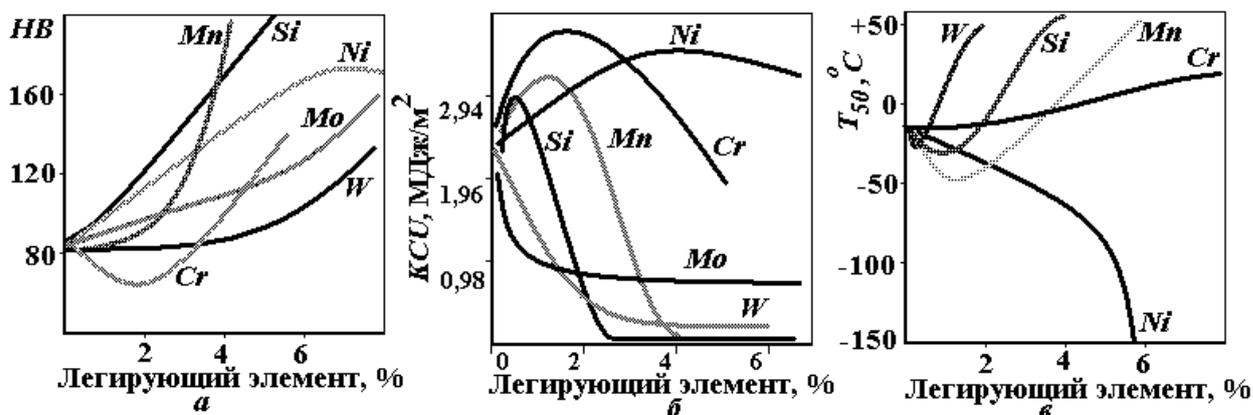


Рис. 3.8. Влияние легирующих элементов на твердость феррита (а); на ударную вязкость феррита (б) и на хладноломкость стали (в):

T<sub>50</sub> – середина температурного интервала хрупкости (50% хрупкой составляющей в изломе).

При высоком содержании в стали никеля или марганца (являющихся основой многих коррозионностойких жаропрочных и немагнитных сталей) аустенит устойчив. Наибольшее упрочнение аустенита наблюдается при легировании

его азотом и углеродом, а кобальт практически не влияет на упрочнение. Аустенит легко упрочняется под действием холодной деформации (наклеп), он парамагнитен и имеет высокий коэффициент теплового расширения.

### ***Контрольные вопросы***

1. Что характеризует диаграмма состояния  $Fe - Fe_3C$ ?
2. Какую структуру имеют сплавы с содержанием углерода 0,002...0,02%?
3. Как называются сплавы с содержанием углерода 0,02...0,8%?
4. Что такое серый чугун?
5. Какие детали изготавливают из ковкого чугуна?
6. Что такое «графитная эвтектика»?
7. Как маркируются высокопрочные чугуны?
8. Как влияет углерод на свойства стали?
9. Как влияют легирующие элементы на структуру стали?
10. Какие элементы являются для стали карбидообразующими?
11. Какие структурные классы стали Вы знаете?

## **ГЛАВА 4. ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ДЕФОРМИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

Деформацией называется изменение размеров и формы материала под действием приложенных сил, которые могут быть как внешними, приложенными к телу, так и внутренними, вследствие физико-механических процессов в самом теле (изменение объема отдельных кристаллов при фазовых превращениях или вследствие температурного градиента). Деформации подразделяют на упругие, исчезающие после снятия нагрузки и пластические, которые остаются после окончания действия приложенных сил. Способность металла пластически деформироваться называется пластичностью. Пластичность обеспечивает конструкционную прочность деталей под нагрузкой и устраняет влияние концентраторов напряжений.

### ***4.1. Механизм пластического деформирования***

При возрастании касательных напряжений в металле выше определенной величины ( $\tau > \tau_k$ , где  $\tau_k$  – критическое напряжение) деформация становится необратимой и после снятия нагрузки устраняется лишь упругая составляющая деформации, а пластическая составляющая остается, т.е. происходит сдвиг одной части металла относительно другой.

Сдвиг может осуществляться скольжением и двойникованием. При скольжении одна часть кристалла смещается параллельно другой части вдоль плоскости, которая называется плоскостью скольжения или сдвига.

Двойникование сводится к переориентировке части кристалла в положение, зеркально симметричное к его недеформированной части. По сравнению со скольжением двойникование имеет второстепенное значение и возникает в случае, когда скольжение затруднено.

Скольжение в кристаллической решетке протекает по плоскостям и направлениям с наиболее плотной упаковкой атомов там, где величина сопротивления сдвигу ( $\tau_k$ ) наименьшая. Плоскость скольжения вместе с

направлением скольжения, принадлежащим этой плоскости, образуют систему скольжения.

Чем больше в металле возможных плоскостей и направлений скольжения, тем выше его способность к пластической деформации. Металлы с кубической кристаллической решеткой обладают высокой пластичностью, так как скольжение в них может происходить по многим направлениям.

Металлы с гексагональной плотноупакованной решеткой менее пластичны и труднее поддаются деформации.

При скольжении не происходит одновременного передвижения одной части кристалла относительно другой. Такой синхронный сдвиг потребовал бы напряжений в тысячи раз превышающих те, при которых в действительности протекает процесс деформации.

Скольжение осуществляется в результате перемещения в кристалле дислокаций (рис. 4.1, а). При действии вдоль плоскости скольжения касательных напряжений в направлении, указанном стрелкой, атомы вблизи ядра дислокаций перемещаются справа налево на расстояния (позиции: 1→2; 3→4; 5→6; 7→8; 9→10; 11→12; 13→14; 15→16; 17→18), значительно меньшие межатомных. Смещение атомов происходит не только в плоскости чертежа, но и во всех атомных слоях, параллельных этой плоскости.

Перемещение дислокаций в плоскости скольжения ММ через весь кристалл приводит к сдвигу соответствующей части кристалла на одно межплоскостное расстояние (рис. 4.1, а, б, ..., д) с образованием на поверхности кристалла ступеньки.

В процессе деформации возникают новые дислокации по механизму Франка-Рида (рис. 4.2). Под действием касательных напряжений закрепленная дислокация выгибается (рис. 4.2, позиции 1-3). Затем происходит самопроизвольное распространение изогнутой дислокации в две спирали, при встрече которых возникает расширяющаяся дислокационная петля и отрезок дислокации (рис. 4.2, позиции 4-6). Отрезок распрямляется, занимает исходное положение (рис. 4.2, позиция 7) и цикл образования дислокаций

повторяется. Один источник Франка-Рида может образовать сотни дислокаций.

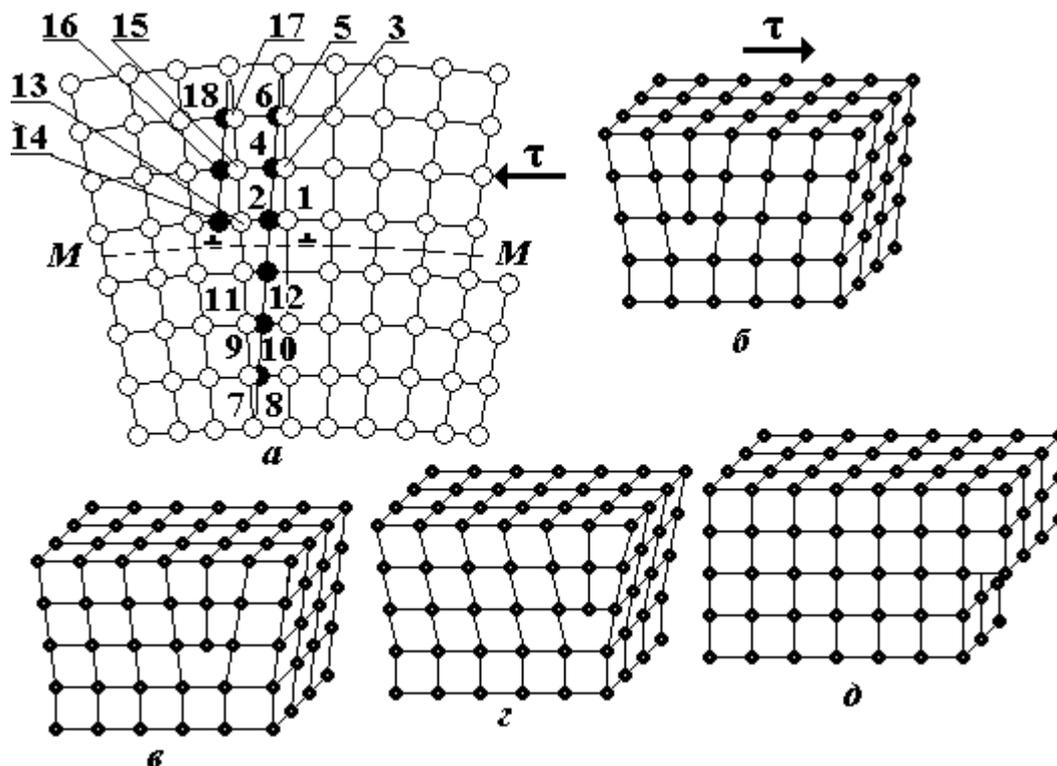


Рис. 4.1. Движение краевой дислокации, приводящее к образованию ступеньки единичного сдвига на поверхности кристалла:

а – схема движения дислокации; б – краевая дислокация в кристаллической структуре; в, г – перемещение дислокации на одно и два межатомных расстояния в решетке под воздействием влияния приложенного напряжения ( $\tau$ ); д - выход дислокации на поверхность и появление сдвига; 1- 18 – позиции атомов. М-М – плоскость скольжения.

Таким образом, упрочнение металлов при деформации определяется повышением плотности дислокаций до  $10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$  вместо  $10^6 \dots 10^8 \text{ см}^{-2}$  до деформации.

Упругие поля дислокаций взаимодействуют между собой, при этом расположенные в одной плоскости скольжения дислокации одного знака отталкиваются одна от другой, а дислокации разного знака – притягиваются и при сближении взаимно уничтожаются (аннигиляция).

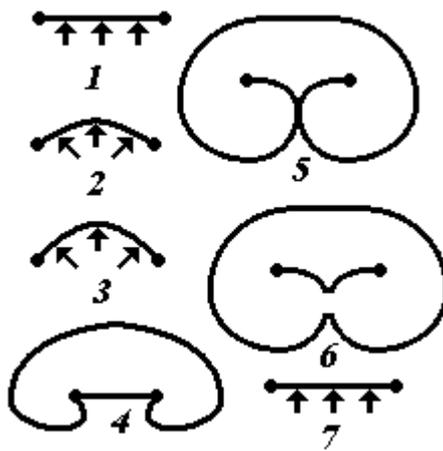


Рис. 4.2. Последовательность образования (этапы 1-7) новой дислокации при действии источника Франка – Рида.

#### 4.2. Изменение структуры металла при пластической деформации

Большинство металлов имеют поликристаллическую структуру, в которой зерна ориентированны не одинаково. Пластическая деформация в этом случае не может протекать одновременно и одинаково во всем объеме металла. На рис. 4.3 представлена схема изменения микроструктуры поликристаллического металла при деформировании.

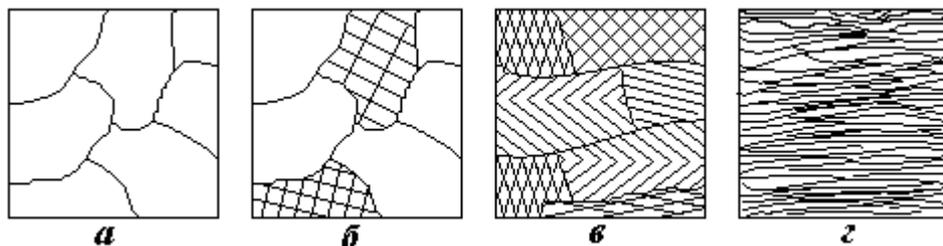


Рис. 4.3. Изменение микроструктуры поликристаллического металла при деформации: а – исходное состояние ( $\epsilon=0$ ); б -  $\epsilon=1\%$ ; в -  $\epsilon=40\%$ ; г -  $\epsilon=80-90\%$ ;  $\epsilon$  – степень деформации.

Пока общая деформация мала ( $\sim 1\%$ ), зерна, вследствие различной ориентации их по отношению к приложенной нагрузке, деформируются неоднородно (рис. 4.3, б). С ростом степени деформации в результате процессов скольжения зерна вытягиваются в направлении приложенных сил,

образуя волокнистую или слоистую структуру, при этом внутри самих зерен происходит дробление блоков и увеличение угла разориентировки между ними (рис. 4.3, в). При очень больших степенях деформации (80...90%) возникает преимущественная кристаллографическая ориентировка зерен – текстура деформации (рис. 4.3, г). Характер текстуры зависит от вида деформации, природы металла, наличия примесей и условий деформации. Образование текстуры приводит к анизотропии механических и физических свойства металла.

### ***4.3. Деформирование двухфазных сплавов***

Для каждой фазы, присутствующей в сплаве имеются свои системы скольжения и значения критических напряжений сдвига, что приводит к образованию в двухфазных сплавах более сложных текстур деформации. Процесс деформирования в таких сплавах определяется свойствами второй фазы, ее количеством, а также распределением частиц в основе. Хрупкая вторая фаза, расположенная по границам зерен, приводит к охрупчиванию сплава, если же частицы второй фазы размещены равномерно по зерну пластичной основы, то прочность сплава увеличится при сохранении его пластичности.

При встрече движущейся дислокации с когерентными частицами она перерезает последние (рис. 4.4, а), а в случае некогерентных частиц вокруг них возникают дислокационные петли (рис. 4.4, б). В обоих случаях наблюдается упрочнение сплава, но если в первом случае при перерезании когерентных частиц множеством дислокаций напряжение течения остается постоянным, то в случае некогерентных частиц оно будет нарастать по мере увеличения дислокационных петель вокруг каждой частицы.

### ***4.4. Наклеп и разрушение***

При холодном пластическом деформировании металл запасает 5...10% энергии, затраченной на деформирование. Увеличивается плотность дислокаций в сплаве (до  $10^{12}$  см<sup>-2</sup>), что приводит к увеличению прочностных

характеристик сплава и уменьшению его пластичности и ударной вязкости. Это явление получило название наклепа. Свойства наклепанного металла изменяются тем сильнее, чем больше степень деформации. При очень больших степенях деформации предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) растет быстрее временного сопротивления ( $\sigma_b$ ), и при достижении их равенства пластичность практически становится равной нулю. Дальнейшее деформирование сплава приводит к его разрушению.

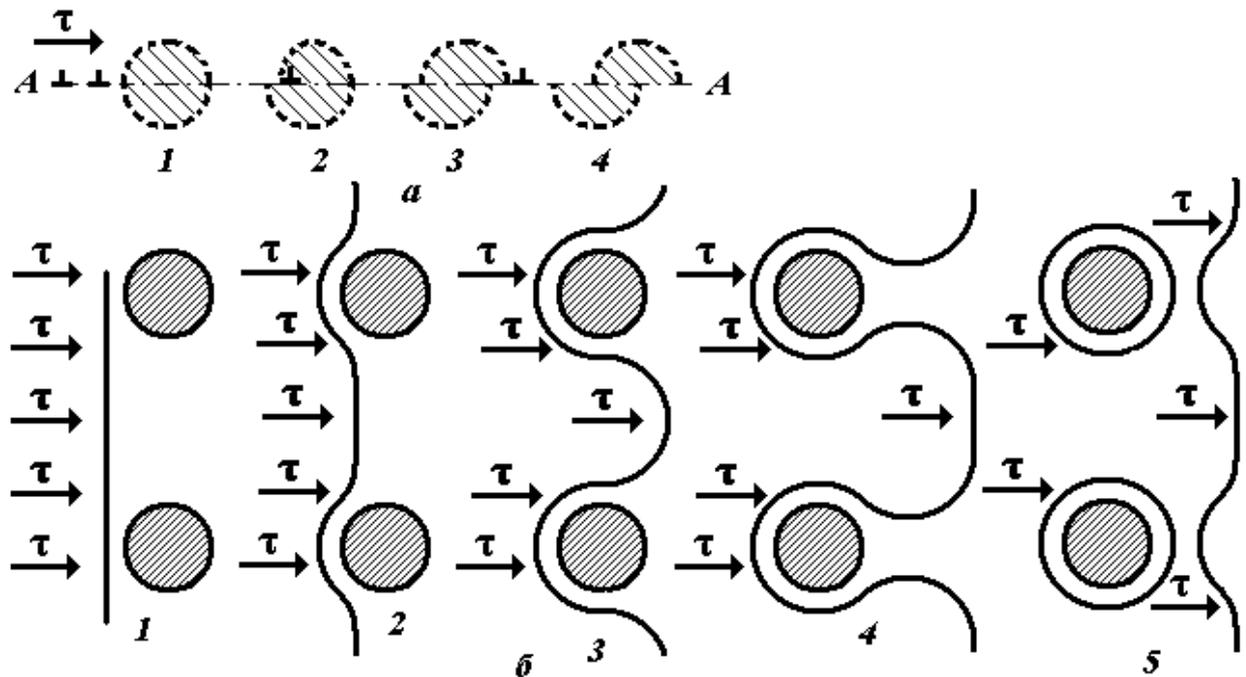


Рис. 4.4. Схемы перемещения дислокаций в двухфазном сплаве:  
 а – при перерезании частиц второй фазы; б – при образовании дислокационных петель; А-А – плоскость движения дислокаций; 1-5 – последовательные стадии перемещения дислокаций;  $\tau$  – касательные напряжения.

Процесс разрушения состоит из двух стадий – зарождения трещины и ее распространения через все сечение детали, при этом разрушение может быть хрупким и вязким. Независимо от характера разрушения возникновения микротрещин связано с образованием скоплений дислокаций перед каким-либо препятствием (барьерный механизм) или в результате взаимодействия дефектов кристаллической решетки (бубарьерный механизм).

Скорость распространения трещины в хрупком теле, ее скорость достигает скорости звука (2500 м/с), а для вязкого тела скорость распространения трещины невелика.

При прохождении трещины по телу зерна разрушение может быть как вязким, так и хрупким.

При прохождении трещины по телу зерна – транскристаллитное разрушение – оно может быть как вязким, так и хрупким, и характерно для металлов с ОЦК и ГПУ решетками (высокопрочные стали, титановые сплавы и другие). Если трещина распространяется по границам зерен (интеркристаллитное или межзеренное разрушение) – оно всегда является хрупким. К типично хрупким материалам относятся чугуны, многие литые сплавы, закаленные стали и другие.

С увеличением деформации повышается удельное электросопротивление (до 6%), у ферромагнетиков (большинство сталей) понижается магнитная проницаемость и остаточная индукция. Наклеп понижает плотность сплава из-за нарушения порядка размещения атомов при увеличении плотности дефектов и образования микропор. Это уменьшение плотности используется для увеличения долговечности деталей подверженных знакопеременным нагрузкам (используется поверхностное пластическое деформирование). Механизм увеличения долговечности следующий: В результате наклепа поверхностного слоя в нем возникают напряжения сжатия. Под этими слоями появляются напряжения растяжения. Сжимающие напряжения в поверхностном слое замедляют зарождение усталостной трещины. Снижение пластичности при наклепе улучшает обрабатываемость резанием мягких и пластичных сплавов.

#### ***4.5. Возврат и рекристаллизация***

Состояние деформированного (наклепанного) сплава термодинамически неустойчиво даже при комнатных температурах. При нагреве ускоряется перемещение точечных дефектов и создаются благоприятные условия для

перераспределения дислокаций и уменьшения их количества. В процессе нагрева деформированного металла в нем протекают процессы возврата и рекристаллизации при этом происходит возвращение всех свойств сплава к их значениям до деформации.

Нагрев деформированного металла до относительно невысоких температур ( $(0,2 \dots 0,35) T_{\text{плавления}}$ ) инициирует процесс возврата, в результате которого изменяется тонкая структура и свойства деформированного металла без изменения его микроструктуры. Таким образом, размеры и форма зерен при возврате не меняются.

В процессе возврата различают две стадии – отдых и полигонизацию.

При температуре порядка ( $(0,2 \dots 0,3) T_{\text{плавления}}$ ) в деформированном металле протекает процесс отдыха, при котором уменьшается количество точечных дефектов и перераспределение дислокаций без образования новых малоугловых границ – субграниц.

Вторая стадия возврата – полигонизация ( $(0,30 \dots 0,35) T_{\text{плавления}}$ ) приводит к образованию субзерен (полигонов), разделенных малоугловыми границами.

В процессе нагрева деформированного металла избыточные дислокации в результате самодиффузии атомов выстраиваются в дислокационные стенки и образуют в зернах субзерен, свободных от дислокаций (рис. 4.5).

Образование субзеренной структуры, практически не уменьшая прочность наклепанного металла, заметно снижает остаточные напряжения в структуре и повышает сопротивление коррозионному растрескиванию. Укрупнение субзерен при увеличении времени выдержки или повышении температуры приводит к снижению прочности. Как правило, в процессе возврата комплекс механических свойств практически не изменяется.

Рекристаллизацией называется процесс зарождения и роста новых равноосных зерен. В зависимости от температуры нагрева различают первичную, вторичную и собирательную рекристаллизации. При первичной рекристаллизации старое зерно наклепанного металла не восстанавливается, а образуются новые зерна округлой формы вместо ориентированной

структуры деформации (рис. 4.6, а, ..., в). В результате рекристаллизации практически полностью снимается наклеп, свойства рекристаллизованного металла становятся сопоставимыми со свойствами отожженного.

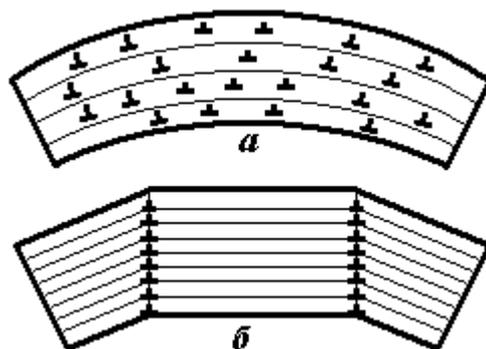


Рис. 4.5. Схема стабилизирующей полигонизации:

а – хаотическое распределение дислокаций в изогнутом кристалле; б – стенки дислокаций после полигонизации.

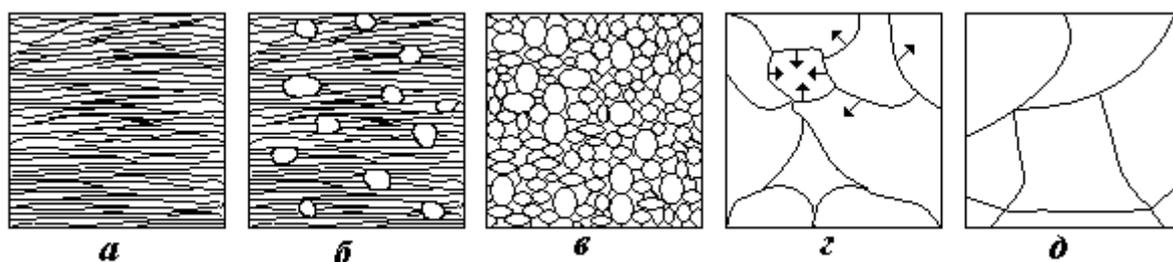


Рис. 4.6. Схема изменения микроструктуры наклепанного металла при нагреве:

а – наклепанный металл; б – начало первичной рекристаллизации; в – завершение первичной рекристаллизации; г – рост зерен; д – образование равновесной структуры.

Наименьшую температуру рекристаллизации, при которой происходит разупрочнение металла, называют температурным порогом рекристаллизации ( $T_{рек}$ ).  $T_{рек}$  тем ниже, чем выше степень деформации, больше длительность нагрева или меньше величина зерна до деформации и количество примесей в металле. По А.А. Бочвару температура начала рекристаллизации определяется соотношением:  $T_{рек} = \alpha T_{плавления}$ , где:  $\alpha$  - безразмерный коэффициент, учитывающий чистоту металла и степень

деформации. Для чистых металлов, подвергнутых значительному деформированию ( $\epsilon \approx 90\%$ ) коэффициент  $\alpha$  составляет порядка  $0,1 \dots 0,2$ , для технически чистых металлов он увеличивается до  $0,3 \dots 0,4$ . У сплавов на основе твердых растворов  $\alpha = 0,5 \dots 0,6$ , а для многокомпонентных сплавов, упрочненных тугоплавкими частицами второй фазы, значения коэффициента  $\alpha$  может достигать  $0,7 \dots 0,8$ .

После завершения первичной рекристаллизации в процессе последующего нагрева происходит рост одних рекристаллизованных зерен за счет других – собирательная рекристаллизация (рис. 4.6, з). Рост зерен происходит в результате перехода атомов от одного зерна к соседнему через границу раздела. При этом границы растущих зерен перемещаются к центру кривизны. Термодинамически этот процесс выгоден, так как благодаря уменьшению протяженности границ при росте зерен, уменьшается поверхностная энергия металла и увеличивается стабильность системы. Стадия собирательной рекристаллизации завершается образованием зерен – многогранников с углами разориентировки между соседними гранями порядка  $120^\circ$  (рис. 4.6, д).

При более высоких температурах наклепанного металла происходит неравномерный рост одних зерен за счет других – вторичная рекристаллизация и структура представляет собой смесь очень мелких и крупных зерен – гигантов. Возникшая разнотернистость структуры отрицательно сказывается на всех механических свойствах металла. Размер рекристаллизованного зерна оказывает большое влияние на свойства металлов и сплавов. С уменьшением размера зерна повышаются характеристики прочности и пластичности, увеличивается вязкость металла. Размер зерен, образовавшихся в результате рекристаллизации, зависит в основном от степени деформации и температуры рекристаллизации и в меньшей степени от времени выдержки при нагреве. При небольших степенях деформации ( $\epsilon = 3 \dots 15\%$ ) нагрев не вызывает рекристаллизации.

Такую степень деформации называют критической ( $\epsilon_{кр}$ ), увеличение степени деформации выше  $\epsilon_{кр}$  приводит к первичной кристаллизации.

На рис. 4.7, а приведена зависимость размера зерна рекристаллизованного металла от степени деформации, а на рис. 4.7, б представлена диаграмма рекристаллизации железа.

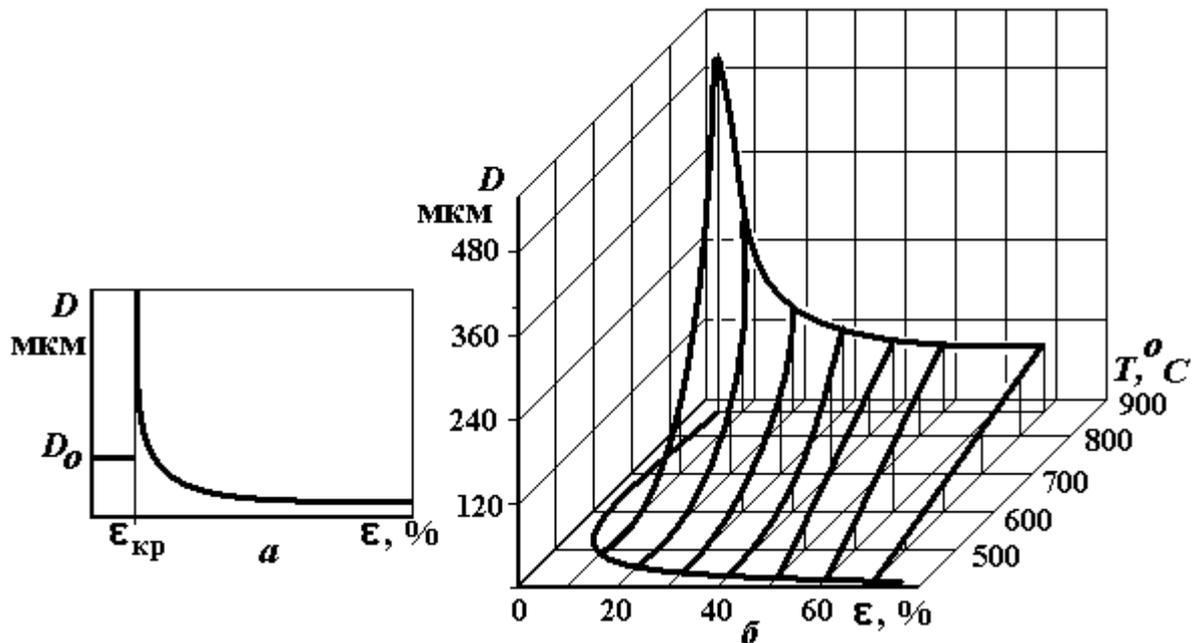


Рис. 4.7. Зависимость размера зерна ( $D$ ) рекристаллизованного металла от деформации (а) и диаграмма рекристаллизации технически чистого железа (б):

$D_0$  – размер исходного зерна.

#### 4.6. Холодная и горячая деформации. Сверхпластичность

В зависимости от соотношения температур деформации и плавления различают холодную и горячую деформации.

При холодной деформации температура нагрева не превышает температуру рекристаллизации, поэтому холодная деформация сопровождается упрочнением за счет образования наклепанной структуры.

Горячей называют деформацию с нагревом до температур, превышающих температуру рекристаллизации. При этих температурах в металле также возникает упрочнение, которое полностью или частично снимается одновременно протекающими процессами рекристаллизации.

Обработка, при которой металл имеет частично рекристаллизованную структуру, называется теплой деформацией, и процесс деформации больших сечений такого металла с большими обжатиями затруднен.

При горячем деформировании металлов с очень мелким зерном ( $0,5 \dots 10 \mu\text{м}$ ) и низких скоростях деформирования ( $10^{-5} \dots 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ) материал течет равномерно без упрочнения. Такое явление называется сверхпластичностью, при этом относительные удлинения в отдельных случаях достигают 1000%. Явление сверхпластичности широко применяется на практике и в ряде случаев является единственным способом получения изделий сложной формы, когда металл нужно деформировать без разрушения на 200...300% и выше.

### ***Контрольные вопросы***

1. Что такое пластическая деформация?
2. По каким плоскостям кристаллической решетки протекает сдвиг скольжением?
3. Что происходит с зёрнами при больших деформациях?
4. Как происходит деформирование двухфазных сплавов?
5. Что такое наклеп?
6. Что такое возврат?
7. Что такое первичная рекристаллизация?
8. Что такое сверхпластичность?

## **ГЛАВА 5. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СПЛАВОВ**

Термической обработкой называют технологические процессы, представляющие собой совокупность операций нагрева, изотермической выдержки и охлаждения с целью изменения структуры сплава и обеспечения необходимых его свойств (механических, технологических, эксплуатационных и др.).

Термическая обработка применяется как промежуточная операция для улучшения технологических свойств полуфабрикатов (отливки, поковки, прокат и т.д.), так и окончательная операция для получения необходимых эксплуатационных свойств готовых изделий.

### **5.1. Виды термической обработки**

Основными операциями термической обработки являются отжиг, закалка, отпуск и старение. В зависимости от температуры нагрева и скорости охлаждения каждая из перечисленных операций имеет несколько разновидностей. Выбор оптимального режима и вида термической обработки для каждого сплава определяют на основании анализа диаграмм фазового равновесия, что позволяет выделить следующие группы сплавов: сплавы, не имеющие фазовых превращений в твердом состоянии; сплавы с переменной растворимостью компонентов в твердом состоянии; сплавы с эвтектоидным превращением.

Отжиг – термическая обработка, в результате которой сплавы приобретают структуру, близкую к равновесной. Отжиг снимает остаточные напряжения в материале, увеличивает его пластичность и уменьшает химическую неоднородность (ликвацию) в слитках. Различают следующие разновидности отжига: отжиг для уменьшения внутренних напряжений, рекристаллизационный отжиг и диффузионный отжиг (гомогенизация). Отжиг для снятия напряжений применяется для отливок и полуфабрикатов, в которых в результате неравномерного охлаждения возникают значительные

остаточные напряжения, приводящие к короблению, растрескиванию или разрушению изделия.

Для стальных и чугунных деталей отжиг проводят при температурах 450...600°C в течении десятков часов, при этом остаточные напряжения практически исчезают. Для сплавов на основе меди или алюминия существенное уменьшение остаточных напряжений достигается при меньших температурах нагрева. Например, для холоднодеформированных полуфабрикатов из латуни отжиг при 200...250°C практически полностью снимает остаточные напряжения. Во всех случаях охлаждение полуфабрикатов после окончания выдержки при заданных температурах должно быть очень медленным (часто вместе с печью), чтобы избежать возникновения новых напряжений.

Рекристаллизационный отжиг применяется для понижения прочности и повышения пластичности деформационного металла, а также для получения требуемого размера зерна. Температура нагрева при этом, как правило, на 100...200°C превышает температуру рекристаллизации. В ряде случаев рекристаллизационный отжиг является окончательной обработкой полуфабрикатов.

Диффузионный отжиг или гомогенизация проводится при очень высоких температурах (но ниже температур появления жидкой фазы) в течение длительной выдержки, при этом за счет интенсификации диффузионных процессов уменьшается ликвационная неоднородность слитков или отливок.

Так, диффузионный отжиг стальных слитков при 1100...1300°C продолжительностью 20...50 час. приводит к равномерному распределению фосфора, углерода, сульфидов и легирующих элементов в объеме заготовки.

Закалка – термическая обработка, в результате которой в сплавах образуется неравновесная структура. Для получения неравновесной структуры сплавы нагревают выше температур фазовых превращений в твердом состоянии и очень быстро охлаждают, чтобы получить структуру пересыщенного

твердого раствора. Как правило, после закалки проводят операции отпуска или старения.

Отпуск и старение – термические обработки, в результате которых в ранее закаленных сплавах происходят фазовые превращения, приводящие к стабилизации структурного состояния. Сочетание закалки с отпуском или старением приводит к получению материала с более высоким уровнем физико-механических свойств по сравнению с отожженным состоянием. Термин «отпуск» применяют обычно к сплавам, испытывающим при закалке полиморфные превращения (стали, двухфазные алюминиевые бронзы, сплавы титана), а термином «старение» обозначают термическую обработку сплавов не претерпевающих при закалке полиморфных превращений (аустенитные стали, никелевые сплавы, сплавы на основе алюминия). Отпуск и старение, как правило, окончательные виды термической обработки изделий, в которых формируется структура с заданным комплексом свойств.

## ***5.2. Термическая обработка сталей***

Основными фазовыми превращениями в процессе термической обработки сталей, влияющими на их структуру и свойства, являются следующие: превращения при нагреве до аустенитного состояния (фазовая перекристаллизация); превращения аустенита при различных степенях переохлаждения; превращения при нагреве закаленной стали.

### *Превращения при нагреве до аустенитного состояния*

Нагрев стали при термической обработке в большинстве случаев проводится до получения структуры аустенита.

Структура доэвтектоидной стали при нагреве до температур линии  $A_{c1}$  состоит из зерен перлита и феррита (рис. 3.2). При температуре  $A_{c1}$  начинается фазовая перекристаллизация перлита, который превращается в мелкозернистый аустенит вследствие аллотропического превращения решетки  $\alpha$ -железа перлита в решетку  $\gamma$ -железа аустенита. Кристаллы аустенита зарождаются преимущественно на межфазных границах феррита с

цементитом (рис. 5.1). Одновременно с полиморфным превращением  $\alpha \rightarrow \gamma$  происходит растворение в аустените углерода цементита. При нагреве от температуры  $A_{c1}$  до температуры  $A_{c3}$  избыточный феррит растворяется в аустените. При температуре  $A_{c3}$  фазовая перекристаллизация заканчивается, и весь феррит оказывается растворенным в аустените. В стали эвтектоидного состава перекристаллизация заканчивается после превращения перлита в аустенит. В заэвтектоидной стали при нагреве до температуры  $A_{c1}$  перлит превращается в мелкозернистый аустенит, а при температурах от  $A_{c1}$  до  $A_{cm}$  происходит растворение продуктов распада избыточного цементита в аустените.

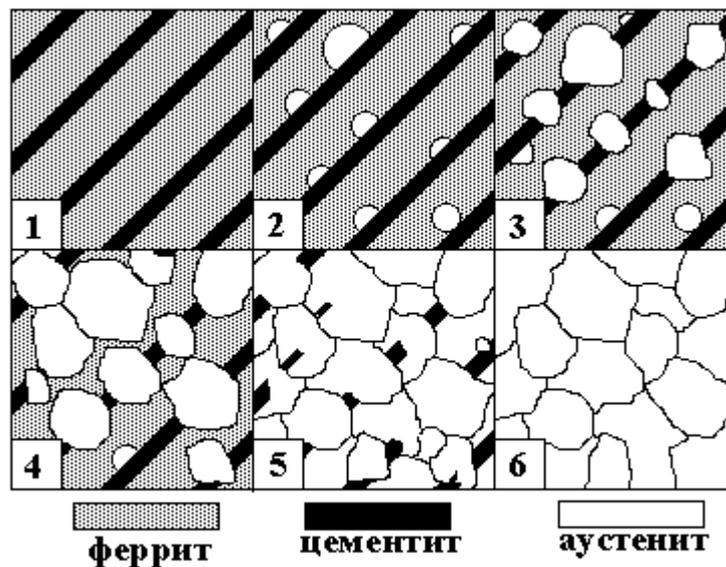


Рис. 5.1. Схема превращения перлита в аустенит: 1-5 – стадии превращения. Выше температур  $A_{c3}$  и  $A_{cm}$  структура всех сталей будет аустенит. С дальнейшим повышением температуры происходит рост зерен аустенита (собирательная рекристаллизация) с различной интенсивностью для разных сталей.

В зависимости от скорости роста аустенитных зерен выше температур  $A_{c3}$  и  $A_{cm}$  различают стали природно-крупнозернистые и природно-мелкозернистые, причем зернистость зависит от способа раскисления и от наличия некоторых легирующих элементов. Стали, раскисленные в процессе выплавки ферросилицием и ферромарганцем являются природно-крупнозернистыми, при нагреве выше  $A_{c3}$  или  $A_{cm}$  размер зерна аустенита в

этих сталях быстро увеличивается. Природно-мелкозернистые стали в процессе выплавки дополнительно раскисляются алюминием, который образует с азотом и кислородом нерастворимые в аустените (до температур  $\sim 1200^\circ\text{C}$ ) нитриды и оксиды, которые, располагаясь по границам зерен, препятствуют собирательной рекристаллизации. Также сдерживают рост зерна карбидообразующие легирующие элементы – титан, цирконий, ниобий и другие.

На рис. 5.2 показано влияние температуры нагрева на величину зерна аустенита ( $d_A$ ) в природно-крупнозернистой и природно-мелкозернистой сталях. Природную или наследственную зернистость стали оценивают баллами шкалы зернистости по ГОСТ 5639-82\*.



Рис. 5.2. Схема роста зерна в природно-крупнозернистых и природно-мелкозернистых сталях при нагреве:  $d_A$  – размер зерна;  $A_{c1}$  – температура начала фазовой перекристаллизация перлита.

Таким образом, в стали различают природное (наследственное) и действительное зерно. Природное зерно характеризует способность к росту зерна аустенита. Действительное зерно - зерно, которое имеет сталь в данный момент (фактическая его величина в конкретных изделиях). Величина действительного зерна зависит от метода выплавки, горячей и холодной деформации и особенно от термической обработки, путем изменения которой можно получать нужный размер зерна

### Распад переохлажденного аустенита

Увеличение скорости охлаждения стали или наличие в ней легирующих элементов может понизить температуру превращения аустенита (температуры  $Ar_1$ ,  $Ar_3$ ). На рис. 5.3 изображена диаграмма изотермического превращения аустенита эвтектоидной стали, так называемые С-образные кривые.

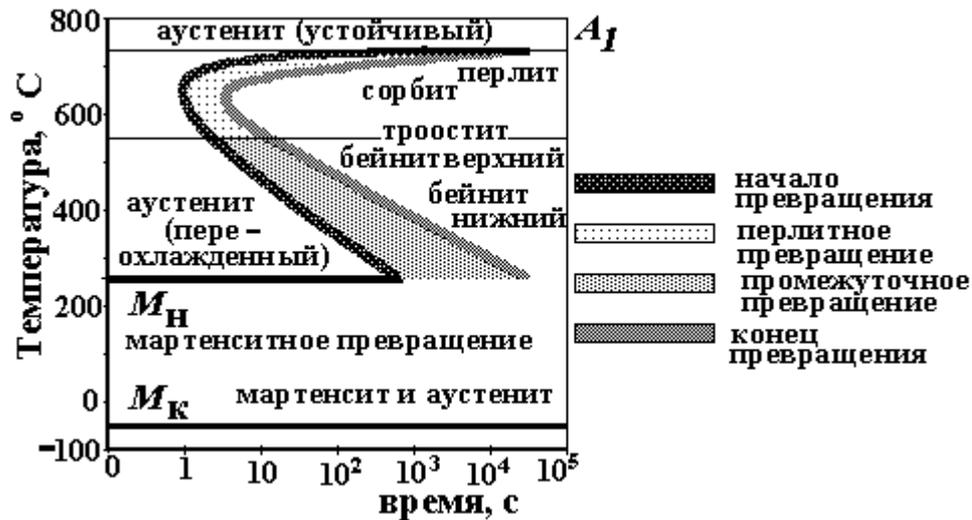


Рис. 5.3. Диаграмма изотермического превращения аустенита эвтектоидной стали (С - кривая):  $A_1$  – граница устойчивого аустенита;  $M_n$ ,  $M_k$  – границы начала и конца мартенситного превращения.

При быстром охлаждении стали ниже температур точки  $A_1$  распад аустенита происходит не сразу, а через определенный промежуток времени (инкубационный период). Изотермическая выдержка охлажденной стали приводит к распаду аустенита и образованию различных структур в зависимости от температуры переохлаждения. Минимальное время существования переохлажденного аустенита до его распада называется устойчивостью аустенита и определяется содержанием в стали углерода и легирующих элементов.

### Перлитное превращение аустенита

Выдержка при 650...700°C приводит к распаду переохлажденного аустенита на ферритно-цементитную смеси – перлит. Эвтектидный распад аустенита в перлит аустенита в перлит – диффузионный процесс, во время которого углерод диффундирует к дефектным местам кристаллической решетки аустенита, образуя по границам зерен зародыши цементита. Диффузия углерода приводит к обеднению им аустенита, окружающего новые пластинки цементита, поэтому рядом с пластинками цементита появляется феррит (рис. 5.4), т.е. происходит переход решетки ГЦК в ОЦК. Межпластиночное расстояние при этом составляет  $(5...7) \cdot 10^{-7}$  м; такую смесь называют перлитом.



Рис. 5.4. Схема роста перлитных колоний.

Превращение при 640...590°C приводит к образованию феррито-цементитной смеси с межпластинчатым расстоянием  $(3...4) \cdot 10^{-7}$  м и называется сорбитом, а при температурах 580...550°C межпластинчатое расстояние уменьшается до  $(1...2) \cdot 10^{-7}$  м – такую структуру называют трооститом.

Таким образом, с увеличением степени переохлаждения в соответствии с общими законами кристаллизации, уменьшается межпластинчатое расстояние (дисперсность) образующихся структур перлитного класса. С увеличением дисперсности структур перлитного типа возрастают прочность и твердость стали. Наилучшими характеристиками пластичности и вязкости обладает структура сорбита.

### Мартенситное превращение аустенита

Мартенситное превращение аустенита интенсивно протекает при непрерывном охлаждении с большой скоростью в интервале температур от  $M_n$  до  $M_k$  (рис. 5.3), где индексы «н» и «к» обозначают начало и конец превращения. Быстрое охлаждение необходимо для того, чтобы подавить возможные диффузионные процессы и образование ферритно-цементитных смесей. Минимальная скорость охлаждения, при которой весь аустенит превращается только в мартенсит при температуре  $M_n$  и ниже, называется критической скоростью закалки ( $V_{кр}$ ); при скоростях охлаждения больших  $V_{кр}$  образуется мартенсит – перенасыщенный твердый раствор внедрения углерода в  $Fe_\alpha$ . При мартенситном превращении происходит переход  $\gamma \rightarrow \alpha$ , однако углерод не успевает выделиться из твердого раствора, а так как его растворимость в  $Fe_\alpha$  значительно ниже, чем в  $Fe_\gamma$ , происходит искажение кристаллической решетки  $Fe_\alpha$  и образуется тетрагональная пространственная решетка (рис. 5.5).

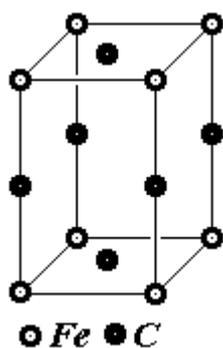


Рис. 5.5. Тетрагональная ячейка пространственной решетки мартенсита.

Чем больше углерода было в аустените, тем более искаженной будет решетка мартенсита, и тем значительно будут изменения свойств стали. На рис. 5.6 показано влияние углерода на твердость и изменение объема мартенсита.

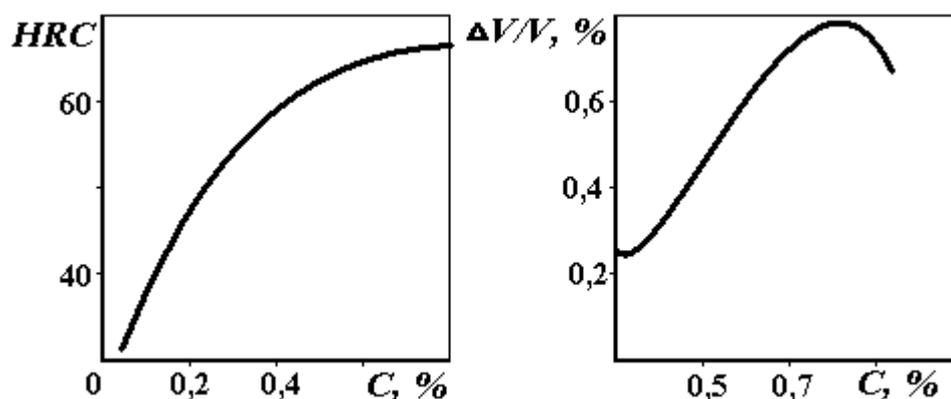


Рис. 5.6. Изменение твердости (HRC) и объема ( $\delta$  V/V) мартенсита сталей с различным содержанием углерода.

На температуры  $M_n$  и  $M_k$  помимо содержания углерода существенное влияние оказывают легирующие элементы, растворенные в аустените. Большинство из них понижают температуры  $M_n$  и  $M_k$ , поэтому в закаленных легированных сталях даже при небольших содержаниях углерода после охлаждения до комнатных температур может сохраниться значительное количество остаточного аустенита. В ряде случаев, для уменьшения концентрации  $A_{ост}$  охлаждение ведут до отрицательных температур.

#### Бейнитное (промежуточное) превращение аустенита

Область бейнитного превращения от  $540^\circ\text{C}$  до точки  $M_n$  (рис. 5.3). Бейнит представляет собой двухфазную смесь кристаллов феррита и цементита. Основная особенность промежуточного превращения состоит в том, что полиморфный переход происходит по мартенситному механизму.

Микроструктура и механические свойства бейнита зависят от температуры выдержки.

При температурах  $400 \dots 450^\circ\text{C}$  образуется верхний бейнит, имеющий перистое строение, при более низких температурах – нижний бейнит с пластинчатым строением.

Верхний бейнит имеет низкие показатели прочности, пластичности и вязкости. Высокой прочностью и достаточно высокими пластичностью и вязкостью обладает нижний бейнит, полученный при температурах на  $50\text{--}100^\circ\text{C}$  выше точки начала мартенситного превращения.

### **5.3. Основные виды термической обработки стали**

Термической обработке подвергаются как полуфабрикаты (отливки, поковки, штамповки и другие), так и готовые изделия. Наиболее распространенными операциями термической обработки стали являются отжиг, нормализация, закалка и отпуск.

Существует несколько разновидностей отжига. Для доэвтектоидных (конструкционных) сталей применяют перекристаллизационный отжиг, а для заэвтектоидных - сфероидизирующий. При перекристаллизационном отжиге сталь нагревают до температур выше  $A_{c3}$  на  $30...50^{\circ}\text{C}$ ; выдерживают и медленно охлаждают вместе с печью. Отжиг, как правило, является предварительной термической обработкой.

При нагреве стали до температур отжига, в связи с фазовой перекристаллизацией, измельчается зерно и при последующем медленном охлаждении (рис. 5.7,  $V_1$ ) формируется ферритно-перлитная структура с более равномерным распределением структурных составляющих. Поэтому в результате отжига устраняется крупнозернистая структура и структурная неоднородность литой и горячедеформированной стали. Воздействие медленного охлаждения снимаются внутренние напряжения, понижается твердость и улучшается обрабатываемость резанием. Отожженная доэвтектоидная сталь находится в равновесном состоянии и подготовлена к дальнейшей обработке.

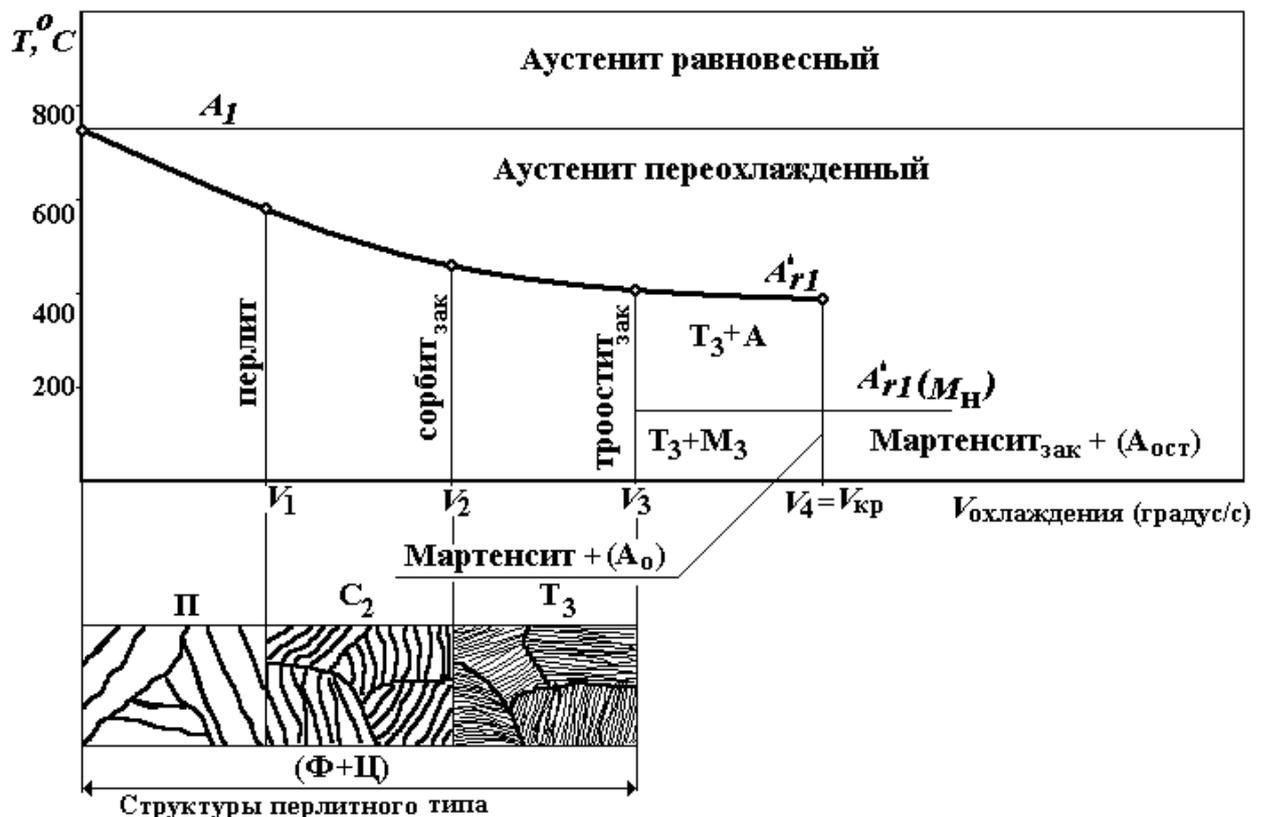


Рис. 5.7. Структурная диаграмма превращений аустенита при непрерывном охлаждении:  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  – скорость охлаждения;  $\Phi$  – феррит;  $\Psi$  – цементит;  $A$  – аустенит;  $T$  – троостит;  $M$  – мартенсит.

Для заэвтектоидных (инструментальных) сталей применяют сфероидизирующий отжиг. В этом случае получают структуру зернистого перлита, в котором цементит имеет округлую форму.

Зернистый перлит в инструментальных сталях получают путем нагрева сталей до температур выше  $A_{c1}$  на  $30...50^\circ$  и последующего медленного охлаждения или изотермической выдержки при  $650...680^\circ\text{C}$ .

Нормализация – разновидность отжига с фазовой перекристаллизацией и отличается от последнего скоростью охлаждения (рис. 5.7,  $V_2$ ). После нагрева до температур выше  $A_{c3}$  на  $30...50^\circ$  сталь охлаждают на воздухе, при этом ускоренное охлаждение приводит к некоторому переохлаждению аустенита и измельчению ферритно-цементитной смеси, и получается сорбит закалки. Твердость нормализованной стали выше, чем отожженной, а вязкость и пластичность ниже.

При дальнейшем увеличении скорости охлаждения (рис. 5.7,  $V_3$ ), но ниже  $V_{\text{крит}}$ , получают еще более мелкую ферритно-цементитную смесь – троостит закалки.

Нормализация – более экономичная термическая операция, чем отжиг за счет уменьшения времени технологического цикла.

Закалка – режим термической обработки, при котором после фазовой перекристаллизации и последующего быстрого охлаждения образуется неравновесная структура – пересыщенный твердый раствор углерода в альфа-железе - мартенсит закалки (рис. 5.7,  $V \geq V_{\text{крит}}$ ).

Если сталь при нагреве претерпела полную фазовую перекристаллизацию ( $T_{\text{нагр}} > A_{c3}$ ) и имела однофазную структуру (аустенит), то закалка называется

полной. Если же перекристаллизация прошла неполностью ( $A_{c1} < T_{\text{нагр}} < A_{c3}$  или  $A_{c1} < T_{\text{нагр}} < A_{\text{ост}}$ ), то закалка называется неполной.

Отпуск – режим термической обработки, при котором закаленная сталь нагревается до температуры ниже  $A_{c1}$ , выдерживается и затем охлаждается, как правило, на воздухе. В результате отпуска уменьшаются внутренние напряжения стали и формируются более равновесные структуры, которые отличаются более высокими характеристиками пластичности и вязкости по сравнению со структурой мартенсита закалки.

Структуры, полученные после отпуска, определяют более высокий уровень механических свойств по сравнению с отожженным или нормализованным состоянием стали. Отпуск, как правило, является окончательной термической обработкой стали, при которой формируется структура с заданным уровнем механических свойств.

#### ***5.4. Технология термической обработки стали***

Нагрев изделий при термообработке производится в печах или в ваннах. В зависимости от среды, в которой нагревались детали, печи разделяются на печи с воздушной атмосферой и продуктами горения, печи с контролируемой или защитной атмосферами и печи-ванны (масляные, свинцовые, соляные) с внешним или внутренним (соляные электродные) обогревом.

Нагрев в печах-ваннах осуществляется быстрее и качественней, при этом ванны должны хорошо раскисляться.

Время нагрева, выдержки и режим охлаждения зависят от типа нагревательной печи, состава и структуры стали, от формы и размеров изделия.

При отжиге скорость нагрева обычно невелика и составляет порядка 100 град/час, продолжительность выдержки достигает 1 часа на 1 тонну нагреваемого металла. Скорость охлаждения для углеродистых сталей ~

150...200 град/час для углеродистых сталей и 30...100град/час для легированных.

При закалке время нагрева в печах подсчитывается из расчета 50...80 секунд на 1 мм сечения, 12...14 секунд в соляной ванне и 6...8 секунд в свинцовой ванне. Продолжительность выдержки устанавливается равной 20% от времени нагрева.

В качестве охлаждающих сред при закалке чаще всего используют воду и минеральные масла. Охлаждение в воде применяют при закалке изделий из углеродистых и некоторых низкоуглеродистых сталей, причем в последнем случае только для изделий простой конфигурации. При закалке легированных сталей применяют масло, некоторые высоколегированные стали закалывают на воздухе.

В некоторых случаях для устранения деформации (коробления) деталей и предотвращения образования трещин (растрескивание), которые вызываются значительными остаточными напряжениями, применяют закалку в двух средах или ступенчатую закалку (рис. 5.8). При закалке в двух средах, деталь, нагретую под закалку, сначала охлаждают в воде, а затем переносят в масло. При этом происходит быстрое прохождение области минимальной устойчивости аустенита, но в интервале мартенситного превращения невысокие скорости охлаждения уменьшают остаточные напряжения. При ступенчатой закалке деталь, нагретую до температуры закалки, переносят в жидкую среду с температурой  $M_n + (50...100)^\circ\text{C}$  и выдерживают некоторое время для выравнивания температуры по сечению, а затем охлаждают на спокойном воздухе. Этот вид закалки применяют для деталей небольшого сечения из низко – и среднелегированных сталей с высокой устойчивостью аустенита в области перлитного превращения.

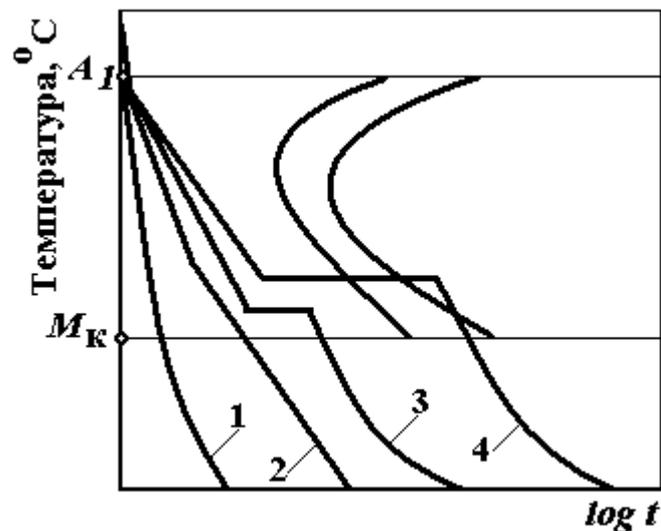


Рис. 5.8. Способы охлаждения при закалке сталей:

$t$  – время; 1 – непрерывное охлаждение; 2 – закалка в двух средах; 3 – ступенчатая закалка; 4 – изотермическая закалка;  $A_1$  – граница устойчивого аустенита;  $M_k$  – граница конца мартенситного превращения.

Изотермическую закалку некоторых легированных сталей проводят для получения структуры нижнего бейнита, обладающего высокой вязкостью и прочностью. Нагретую под закалку деталь переносят соляную ванну с температурой  $M_n + (50 \dots 100)^\circ\text{C}$ , выдерживают до конца превращения аустенита в бейнит и затем охлаждают на воздухе.

Для легированных сталей, у которых температура конца мартенситного превращения  $M_k$  значительно ниже комнатных температур, применяют обработку холодом. В этом случае нагретые под закалку детали охлаждают до отрицательных температур ( $-40 \dots -196^\circ\text{C}$ ), при этом практически весь аустенит превращается в мартенсит. Такой обработке подвергают детали подшипников качения, измерительные инструменты и ряд других изделий.

Доэвтектоидные стали нагревают под закалку до температур  $A_{c3} + (30 \dots 50)^\circ\text{C}$  – полная закалка и после охлаждения с критической скоростью закалки образуется структура, состоящая из мелкоигльчатого мартенсита и следов остаточного аустенита. Перегрев стали значительно

выше  $A_{c3}$  приводит к укрупнению зерен аустенита и увеличению его устойчивости, поэтому после закалки структура состоит из крупноигльчатого мартенсита и большого количества остаточного аустенита, что увеличивает внутренние напряжения и снижает уровень механических свойств.

Неполная закалка ( $A_{c1} < T_{\text{нагр}} < A_{c3}$ ) для доэвтектоидных сталей не применяется, так как в этом случае в структуре закаленной стали наряду с мартенситом закалки сохраняется феррит, что уменьшает твердость закаленной стали.

Для заэвтектоидных сталей применяют неполную закалку ( $A_{c1} + 30 \dots 50$ )°. В этом случае наличие в структуре закаленных сталей цементита увеличивает твердость и износостойкость, что необходимо для различных инструментов. На **рис. 5.9** показаны интервалы оптимальных температур нагрева при закалке для сталей.

В ряде случаев для трущихся деталей машин требуется получить высокую твердость поверхности при сохранении вязкой сердцевины. Это достигается поверхностной закалкой. При этом только поверхностный слой на глубину от 0,5 до 5 мм нагревается выше  $A_{c3}$ . Нагрев осуществляется очень быстро, чтобы сердцевина вследствие теплопроводности не прогрелась до закалочных температур. Поскольку с увеличением скорости нагрева фазовые превращения смещаются в область более высоких температур, температура закалки составляет  $A_{c3} + (150 \dots 200)$ ° и отсутствует выдержка при этих температурах. Зерно аустенита не успевает вырасти, и после охлаждения образуется структура безыгльчатого мартенсита. Структура переходной зоны состоит из мартенсита и феррита, а сердцевина представляет собой феррит и перлит.

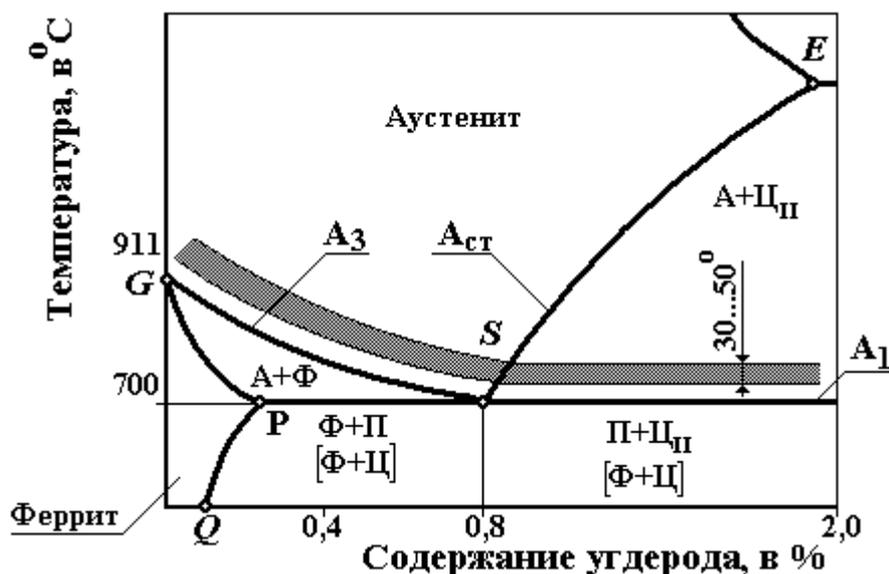


Рис. 5.9. Оптимальный интервал температур нагрева стали при закалке: А – аустенит; Ф – феррит; П- перлит; ЦII – цементит вторичный; Q, G, S, E, P – узловые точки диаграммы состояния «Железо - Углерод»; в квадратными скобками обозначены фазы.

Наиболее совершенным способом поверхностной закалки является высокочастотная (индукционная) закалка. Деталь или ее часть помещают в одновитковый или многовитковый соленоид (индуктор), через который пропускают ток высокой частоты. При этом в поверхностных слоях изделия возникают вихревые токи, которые очень быстро (от 3 до 20 с) нагревают поверхностные слои до закалочных температур. Глубина проникновения тока, а значит и толщина закаленного слоя, уменьшаются с увеличением частоты тока (табл. 5.1).

Таблица 5.1.

Глубина проникновения тока в углеродистую сталь (0,45%С) при 800°C.

Частота тока, Гц	$0,5 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$
Глубина, мм	91,4	14,5	6,5	2,1	0,65

В последнее время для локальной закалки участков поверхности различных деталей используют источники высококонцентрированной энергии – электронные и лазерные лучи.

При поверхностной закалке, как правило, не требуются охлаждающие среды, так как поверхностные слои очень быстро остывают в результате отвода теплоты в холодную часть детали.

В практике для сталей используют три вида отпуска: низкотемпературный, среднетемпературный и высокотемпературный.

Низкотемпературный отпуск проводится при температурах 120...200°C как правило после неполной закалки для инструментальных (заэвтектоидных) сталей. После низкотемпературного отпуска мартенсит закалки превращается в мартенсит отпуска ( $M_{отп}$ ) при этом степень тетрагональности мартенсита уменьшается и, соответственно уменьшается хрупкость (без существенного снижения твердости).

Среднетемпературный отпуск производится при температурах 350...450°C. После среднетемпературного отпуска образуется дисперсная смесь феррита и зернистого цементита – тростит отпуска. Тростит отпуска имеет примерно ту же твердость, что и тростит закалки ( $HRC40$ ), но за счет зернистого строения структуры обладает высоким пределом текучести ( $\sigma_T = 800...1000$  Мпа) и повышенной упругостью.

Высокотемпературный отпуск проводится при температурах 550...650°C. С повышением температуры отпуска за счет коагуляции укрупняются зерна цементита, входящие в феррито-цементитную смесь и образуется структура – сорбит отпуска ( $S_{отп}$ ). Твердость стали при этом понижается до значений порядка  $HRC30$ , а пластичность и вязкость (по сравнению со структурой троостита отпуска) значительно возрастает.

Полная закалка с высоким отпуском называется улучшением и применяется для сталей с содержанием углерода от 0,3 до 0,5%.

### 5.5. Влияние термической обработки на механические свойства стали

В отожженном состоянии структура среднеуглеродистой стали состоит из феррита и перлита, что определяет относительно невысокие показатели прочности ( $HRC18...20$ ) и, наоборот, высокую пластичность ( $\delta = 20...25\%$ ).

После полной закалки среднеуглеродистой стали образуется структура мартенсита закалки со следами остаточного аустенита, при этом твердость составляет порядка  $HRC60$ , но сталь становится хрупкой ( $\delta = 0,5\%$ ).

В результате структурных превращений при отпуске изменяются механические свойства стали (рис. 5.10).

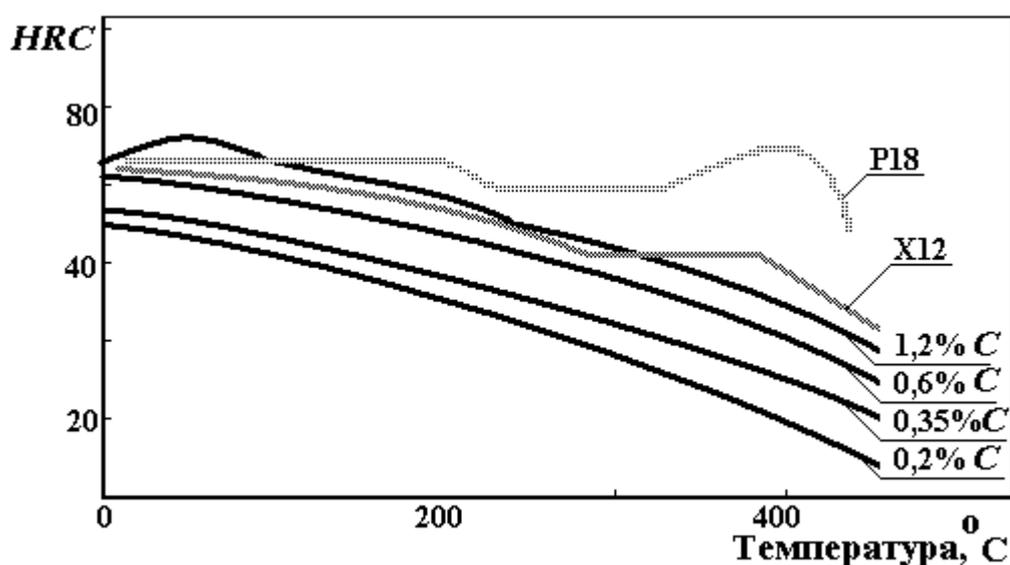


Рис. 5.10. Изменение твердости закаленной стали при отпуске.

С повышением температуры отпуска прочностные показатели уменьшаются, а пластичность и вязкость растут за счет снижения внутренних напряжений и образования зернистой формы цементита в структурах троостит и сорбит отпуска. Надо отметить, что в интервале температур  $250...350$  и  $500...600^{\circ}C$  у конструкционных сталей возникает так называемая отпускная хрупкость I и II рода, поэтому при указанных температурах отпуск не проводят.

### ***5.6. Закаливаемость и прокаливаемость сталей***

В конструкционных сталях, наиболее выгодное сочетание механических свойств обеспечивается в случае получения при закалке структуры мелкоигльчатого мартенсита с высокими показателями твердости. Способность стали приобретать после закалки высокую твердость, зависящую от содержания углерода в мартенсите, называется закаливаемостью.

При закалке сталей в любых охладителях невозможно добиться одинаковой скорости охлаждения поверхности и сердцевины изделия. В таком случае если скорость охлаждения сердцевины будет меньше критической, то в ней вместо мартенсита образуются закалочные структуры перлитного типа – троостит или сорбит закалки с более низкими механическими свойствами. Поэтому большое значение имеют показатели способности стали к образованию при закалке мартенситной структуры по сечению – прокаливаемость.

На практике закаленными считаются слои, в которых содержится не менее 50% мартенсита (полумартенситная зона), остальное - троостит закалки. Для измерения прокаливаемости используется метод торцевой закалки (ГОСТ 5657-69\*), при котором цилиндрический образец установленных размеров нагревается до температуры закалки, охлаждается только с торца струей воды. После охлаждения измеряют твердость по длине цилиндра и строят график изменения твердости по длине образца. Между прокаливаемостью и устойчивостью аустенита существует прямо пропорциональная зависимость, и все факторы, повышающие устойчивость аустенита, увеличивают прокаливаемость.

Определяющее влияние на прокаливаемость оказывают химический состав стали, размер зерна аустенита, различные включения, нерастворимые в аустените.

Так, при добавке в сталь легирующих элементов (за исключением кобальта), растворимых в аустените, повышается его устойчивость, следовательно, увеличивается прокаливаемость.

Аустенит, образующийся при нагреве стали выше критических температур, может иметь крупный или мелкий размер зерна. Так как суммарная протяженность границ зерен на единицу объема в крупнозернистой стали меньше, чем в мелкозернистой, то устойчивость крупнозернистого аустенита и соответственно прокаливаемость будут выше.

Различные фазы внедрения (карбиды, оксиды, нитриды и другие) являются дополнительными центрами превращения аустенита и понижают прокаливаемость заэвтектидных (инструментальных) сталей, несмотря на высокое содержание углерода, ниже чем у доэвтектидных (конструкционных).

### ***Контрольные вопросы***

1. Что такое отжиг?
2. Что такое гомогенизация?
3. Что такое закалка?
4. Что такое отпуск?
5. Как влияет температура нагрева на величину зерна аустенита?
6. Что показывает С-образная кривая?
7. Какие структуры образуются при перлитном превращении аустенита?
8. В каких условиях протекает мартенситное превращение аустенита?
9. Какие охлаждающие среды используют при закалке сталей?
10. Как влияет температура отпуска на твердость закаленной стали?

## **ГЛАВА 6. ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СПЛАВОВ**

Химико-термическая обработка сочетает тепловое воздействие с химическим, и вызывает изменение структуры и состава в поверхностных слоях изделия.

Химико-термическую обработку применяют для повышения твердости, износостойкости, сопротивления усталости и контактной выносливости, а также для защиты от электрохимической и газовой коррозии.

Процессы химико-термической обработки включают диффузионное обогащение поверхностных слоев изделий неметаллами или металлами из внешней активной среды, которая может быть твердой, газовой или жидкой. По характеру изменения химического состава обрабатываемого изделия все разновидности химико-термической обработки можно разделить на две основные группы: диффузионное насыщение неметаллами и диффузионное насыщение металлами.

При диффузионном насыщении поверхностных слоев изделия тем или иным элементом можно выделить три одновременно идущих процесса:

1. образование химического элемента в активированном, атомарном состоянии в результате различных химических реакций;
2. адсорбция диффундирующих элементов поверхностью изделия;
3. диффузия адсорбированных атомов от поверхности к сердцевине изделия.

Первая и вторая стадии процесса химико-термической обработки протекают значительно быстрее третьей – диффузионной стадии, когда формируется структура и свойства диффузионной зоны. Именно третья стадия и определяет скорость процесса химико-термической обработки.

В свою очередь скорость диффузии определяется температурой: чем она выше, тем быстрее идут диффузионные процессы.

### ***6.1. Диффузионное насыщение неметаллами***

Диффузионное насыщение стали углеродом, азотом наиболее широко используется в промышленности. Углерод и азот легко усваиваются поверхностью стали, образуя с железом твердые растворы внедрения, и сравнительно быстро диффундируют вглубь изделия.

#### *Цементация стали*

При цементации происходит насыщение углеродом с целью придания поверхностным слоям детали высокой твердости и износостойкости при сохранении вязкой сердцевины, а также для повышения предела выносливости. Цементации подвергаются изделия с содержанием углерода до 0,25%, работающие в условиях контактного износа и знакопеременных нагрузок (шестерни, втулки и т.п.). Насыщение может проводиться в твердой или в газовой средах (карбюризаторах).

При цементации в твердом карбюризаторе изделия укладывают в герметически закрываемые металлические ящики и пересыпают смесью толченого древесного угля с 20...25%  $Na_2CO_3$  или  $BaCO_3$ , добавки которых интенсифицируют образованием атомарного углерода.

При газовой цементации в качестве карбюризатора используют природный газ, контролируемые атмосферы, получаемые в специальных генераторах, а также жидкие углеводороды (керосин, бензол), подаваемые каплями в герметичное пространство печи, где они образуют активную газовую среду.

Газовую цементацию используют в крупносерийном и массовом производстве, а цементацию в твердом карбюризаторе - в мелкосерийном производстве.

Цементацию проводят при температурах 920...950°C на глубину 0,5...2,0мм, причем это длительный процесс. Так при цементации в твердом карбюризаторе глубина слоя 0,1мм достигается за 1 час выдержки, а при газовой цементации продолжительность выдержки сокращается в 2,5...3 раза.

Концентрация углерода в поверхностном слое изделия после цементации достигает 0,8...1,0%. В случае медленного охлаждения после цементации структура изделия состоит из перлита и цементита вторичного на поверхности, более глубокие слои имеют структуру перлита, далее перлит с небольшим количеством феррита и, наконец, сердцевина состоит из феррита и перлита.

После цементации проводят неполную закалку и низкий отпуск. В результате такой обработки поверхностный слой приобретает структуру мартенсита отпуска с мелкими включениями карбидов и твердость  $HRC60...62$ , а сердцевина состоит из закалочных структур перлитного класса и феррита (180-200 НВ). Так как удельный объем закаленного науглероженного слоя больше, чем сердцевины, в нем возникают значительные сжимающие напряжения (400-500 МПа), что и повышает предел выносливости.

#### Цианирование и нитроцементирование

Насыщение поверхности изделий одновременно углеродом и азотом в расплавленных цианистых солях называется цианированием, а в газовой среде – нитроцементацией. В последнем случае в рабочую камеру печи одновременно подаются цементирующий газ и аммиак.

Основное назначение цианирования и нитроцементации – повысить твердость, износостойкость и предел выносливости стальных изделий.

Цианированию и нитроцементации обычно подвергают стали с 0,2...0,45%С, а также инструмент из быстрорежущих сталей. При цианировании изделий из конструкционных сталей их нагревают выше  $A_{с3}$ , поэтому в зависимости от содержания углерода в стали, температура цианирования может изменяться от 820 до 960°С. Быстрорежущие стали цианируют при температуре 560...570°С.

В зависимости от температурного режима различают среднетемпературное, высокотемпературное и низкотемпературное цианирование.

Среднетемпературному цианированию (820...860°C) подвергают улучшаемые стали, содержащие 0,35...0,45%С. После среднетемпературного цианирования в слое содержится 0,6...0,7%С и 0,5...0,8% N. По достижению глубины слоя 0,15...0,35 мм изделие закалывают с подстуживанием из цианистой ванны и проводят низкотемпературный отпуск (180...200°C).

Твердость поверхности термообработанных деталей составляет *HRC* 65...67.

Высокотемпературное цианирование (930...960°C) применяют для цементуемых сталей взамен цементации на глубину от 1 до 1,5 мм. В этом случае поверхностный слой насыщается углеродом до 0,8...1% и азотом до 0,2...0,3%. По достижению заданной глубины слоя изделие охлаждают на воздухе, а затем нагревают до температур  $A_{c1} + 30...50$ °C, закалывают и подвергают низкому отпуску. Твердость поверхности и после термообработки *HRC* 58...62.

Недостатком цианирования является большая ядовитость цианистых солей и высокая стоимость процесса.

Нитроцементацию сталей проводят (для получения слоя глубиной 0,25...1 мм) при 850...870°C в течение 2...10 час.

После нитроцементации изделия подвергают закалке либо непосредственно из печи с подстуживанием до 800...825°C, либо после повторного нагрева, и затем проводят низкотемпературный (180-200°C) отпуск. Твердость поверхности после термической обработки *HRC* 60...62.

Нитроцементации, как и газовой цементации, подвергают детали сложной конфигурации, однако этот процесс имеет ряд преимуществ – более низкая температура нагрева, что уменьшает вероятность возникновения деформаций и коробления изделий, повышенные характеристики износостойкости и коррозионной стойкости.

Структура цианированного и нитроцементированного слоев состоит из азотистого мартенсита и следов остаточного аустенита. При

высокотемпературном режиме на поверхности иногда образуется хрупкий карбонитридный слой глубиной 0,02...0,03 мм.

Низкотемпературное цианирование и нитроцементацию (560...570°C) применяют для инструментов из быстрорежущих сталей, как окончательный режим технологического процесса, и проводят на глубину 0,02...0,04 мм для повышения стойкости режущего инструмента.

### Азотирование

Азотирование – поверхностное насыщение азотом с целью повышения твердости, износостойкости, предела выносливости, а также коррозионной стойкости стальных изделий. Азотирование проводят в аммиаке при температурах 500...600°C, при этом аммиак диссоциирует с выделением атомарного азота. Процесс азотирования длительный и обычно составляет от 25 до 90 час. Длительность процесса зависит от заданной глубины слоя и температуры. Обычно глубина слоя составляет 0,2...0,6 мм, при этом, чем выше температура азотирования, тем ниже твердость в связи с коагуляцией нитридов. Охлаждение после азотирования проводят вместе с печью в потоке аммиака.

Твердость азотированного слоя достигает  $HV$  1000...1200 в зависимости от наличия легирующих элементов в стали. Образование азотированного слоя сопровождается увеличением удельного объема, поэтому возникают остаточные сжимающие напряжения порядка 600...800 МПа, которые значительно повышают предел выносливости сталей.

Структура азотированного слоя состоит из двух зон: на поверхности образуется тонкий (0,01...0,03 мм) слой, богатый азотом ( $\epsilon$  - фаза), затем азотистый эвтектоид – смесь азотистого феррита, карбонитридов и нитридов, а сердцевина изделия имеет структуру, полученную после улучшения и представляет собой сорбит отпуска ( $HV$  280...300).

Азотирование проводят для улучшаемых легированных сталей, и является окончательной химико-термической обработкой. Для обеспечения прочности

и вязкости сердцевины перед азотированием проводят полную закалку и высокий отпуск (улучшение).

### **6.2. Диффузионное насыщение металлами**

Для многих деталей теплоэнергетического машиностроения требуются жаростойкие покрытия, защищающие металл при высоких температурах от окисления или воздействия окружающей среды. Поверхностное насыщение стали металлами можно проводить в порошкообразных средах, погружением в расплавленный металл (если диффундирующий элемент имеет невысокую температуру плавления), или насыщением из газовой фазы.

В зависимости от типа диффундирующего элемента различают процессы алитирования, хромирования, силицирования, борирования.

#### Алитирование

Алитированием называют насыщение поверхности стали алюминием.

Традиционным является алитирование в порошкообразных смесях. Детали упаковывают в ящик, заполненный рабочей смесью (табл. 6.1), нагревают до 900...1050°C и выдерживают в течение 3...12 час. Довольно часто применяют алитирование в ваннах с расплавленным алюминием, в который добавлено 6...8% Fe. Железо добавляют для того, чтобы исключить растворение обрабатываемых деталей в алюминии. Процесс ведут при 700...800°C в течение 45...90 мин.

Таблица 6.1.

Составы порошковых смесей для алитирования, хромирования и силицирования

Процесс химико-термической обработки	Состав смеси, %
Алитирование	49...49,5 Al; 49...49,5 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 1..2 NH <sub>4</sub> Cl; 99,5 FeAl; 0,5 NH <sub>4</sub> Cl
Хромирование	50 FeCr; 43 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 7NH <sub>4</sub> Cl 60 FeCr; 38,8 каолин; 1,2 NH <sub>4</sub> Cl
Силицирование	40 Si; 59 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 1 NH <sub>4</sub> Cl

В результате алитирования сталь приобретает высокую окислительную стойкость (до 800...850°C), за счет образования при эксплуатации детали на ее поверхности плотной пленки  $Al_2O_3$ , которая и предохраняет основной металл от окисления. Глубина алитированного слоя составляет 0,2...1,0 мм.

Алитированию подвергают топливники газогенераторных машин, чехлы термопар, клапаны и другие детали, работающие при высоких температурах.

### Хромирование

Хромирование – насыщение поверхности изделий хромом, также часто проводят в порошковых смесях при 1000...1050°C на глубину 0,15...0,20 мм. Слой представляет собой карбид  $(Cr, Fe)_7C_3$ , под которым располагается переходная зона. Твердость карбидного слоя на стали достигает  $HV$  1200...1300.

Кроме хромирования в порошковых смесях применяют газовое и вакуумное хромирование.

При хромировании в вакууме изделия засыпают порошком хрома в стальном или керамическом тигле и помещают в вакуумную камеру. При температуре 1000-1050°C хром испаряется и диффундирует в сталь.

В ряде случаев применяют глубокое хромирование (глубина 1,5...8,0 мм) в вакууме при 1400...1450°C, а возникший при этом перегрев устраняется в процессе повторного нагрева.

Хромирование используют для деталей паросилового оборудования клапанов, вентилях, патрубков, а также деталей, работающих на износ в агрессивных средах.

### Силицирование

Силицирование – насыщение поверхности кремнием, придает сталям высокую коррозионную стойкость в морской воде, в азотной, серной и соляной кислотах, и несколько увеличивает устойчивость против износа.

Силицирование проводят в порошкообразных смесях или в газовой среде ( $SiCl_4$ ) при  $950...1000^\circ C$  для получения слоя глубиной  $0,3...1,0$  мм, который обладает повышенной пористостью. Несмотря на невысокую твердость ( $HV 200...300$ ), силицированный слой (после предварительной пропитки маслом при  $170...200^\circ C$ ) обладает высокой износостойкостью.

Силицированию подвергают детали, используемые в оборудовании химической и нефтяной промышленности: валики насосов, трубопроводы, арматура, гайки, болты и другие.

### Борирование

Насыщение поверхностного слоя бором, придает изделиям очень высокую твердость ( $HV 1800...2000$ ), износостойкость и устойчивость против коррозии в различных средах.

Борирование стальных изделий выполняют при электролизе расплавленных солей, содержащих бор ( $Na_2B_2O_7$ ), при этом изделие является катодом.

Температура процесса  $930...950^\circ C$ , выдержка  $2...6$  час, глубина слоя составляет  $0,1...0,20$  мм.

Также часто применяют газовое борирование в среде диборана ( $B_2H_2$ ) или треххлористого бора ( $BCl_3$ ) в смеси с водородом при  $850...900^\circ C$ . На поверхности образуется борид железа ( $FeB$ ), а ниже – борид  $Fe_2B$  и  $\alpha$ -твердый раствор.

Борированию подвергают детали, применяемые в нефтяной промышленности для повышения устойчивости против абразивного износа.

### **6.3. Ионная обработка сплавов и циркуляционный метод**

#### ***химико-термической обработки***

Химико-термическая обработка в порошковых смесях, в расплавах солей и в газовых смесях имеет следующие недостатки:

- нарушается экология окружающей среды за счет выделения избыточных газов из контейнеров при нагреве до температур диффузионного насыщения;
- работы с расплавленными ядовитыми солями опасны;
- образование остатков продуктов сжигания.

Поэтому в настоящее время наиболее перспективными методами химико-термической обработки являются диффузионное насыщение различными элементами циркуляционным способом и ионная обработка различных изделий.

При циркуляционном методе в замкнутом рабочем пространстве установки диффундирующие элементы переносятся при систематическом восстановлении газа - переносчика в результате обратимых химических реакций. Циркуляционный метод позволяет получать качественные диффузионные многокомпонентные слои в химически чистой газовой смеси, без выхода газов в окружающую атмосферу.

Сущность ионной химико-термической обработки заключается в том, что в разреженной газовой среде между катодом (изделием) и анодом (стенкой вакуумной камеры) возбуждается тлеющий разряд, при этом вследствие ионизации рабочего газа, содержащего легирующие элементы (азот, бор), непрерывно образуются новые носители положительно заряженных частиц, которые и диффундируют вглубь изделия.

Таким образом, ионная химико-термическая обработка и циркуляционный способ диффузионного насыщения являются хорошо управляемыми, экологически чистыми технологическими процессами, которые можно применять для деталей, изготовленных из любых сталей, чугунов и многих сплавов.

### ***Контрольные вопросы***

1. Что такое химико-термическая обработка сплавов?
2. В чем сущность цементации стали?

3. Что такое цианирование?
4. В чем сущность нитроцементации стали?
5. В чем сущность азотирования стали?
6. Что такое алитирование?
7. В чем сущность хромирования стали?

## ГЛАВА 7. КЛАССИФИКАЦИЯ СТАЛЕЙ

Стали классифицируют по химическому составу, качеству, степени раскисления, структуре, прочности и назначению.

По химическому составу стали делят на углеродистые и легированные. В зависимости от содержания углерода различают низкоуглеродистые (до 0,3%С), среднеуглеродистые (0,3...0,7%С) и высокоуглеродистые (свыше 0,7%С).

Легирование стали в зависимости от введенных основных легирующих элементов могут быть хромистыми, кобальтовыми, марганцовистыми, хромоникелевыми и другими. В зависимости от суммарного содержания легирующих элементов различают малолегированные (менее 5%), среднелегированные (5...10%) и высоколегированные (более 10%) стали. По качеству, оцениваемому суммарным содержанием примесей (серы и фосфора), стали подразделяют на стали обычного качества (до 0,05%S и 0,04%P), качественные (менее 0,04%S и 0,035%P), высококачественные (менее 0,025S и 0,025P) и особо высококачественные (менее 0,015S и 0,025P).

По степени раскисления различают стали спокойные, которые раскисляли марганцем, кремнием, алюминием; кипящие – только марганцем и полуспокойные (последние занимают промежуточное положение между двумя первыми).

Структурный класс сталей определяют после отжига и нормализации.

После отжига стали могут быть доэвтектоидными (феррит+перлит), эвтектоидными (перлит), заэвтектоидными (перлит и цементит), а также при введении больших количеств марганца, никеля, хрома, кремния, вольфрама и других образуются стали аустенитного или ферритного классов соответственно.

Углеродистые стали могут быть первых трех классов, а легированные стали – всех классов.

После нормализации структура сталей в зависимости от устойчивости переохлажденного аустенита могут быть перлитного (рис. 7.1, а), мартенситного (рис. 7.1, б) и аустенитного (рис. 7.1, в) классов. К перлитному классу относятся углеродистые и низколегированные стали, а к мартенситному и аустенитному классам – средне- и высоколегированные стали.

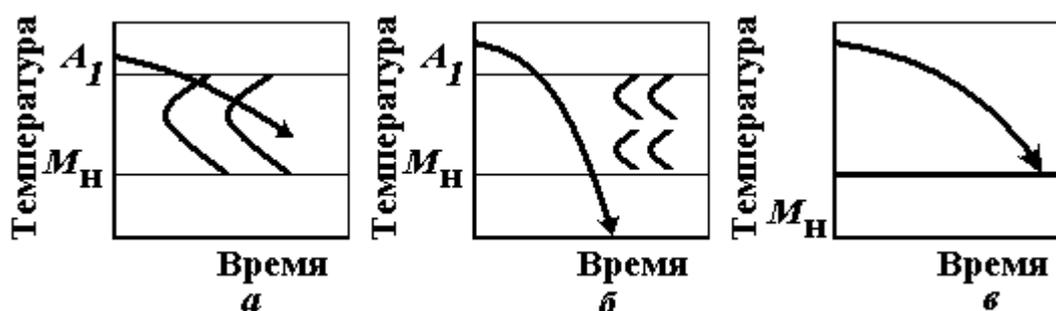


Рис. 7.1. Схемы изотермического распада аустенита сталей (а) перлитного, (б) мартенситного и (в) аустенитного классов.

Деление по прочности ( $\sigma_b$ ) позволяет условно выделить стали нормальной прочности ( $\sigma_b < 1000$  МПа), повышенной прочности ( $\sigma_b < 1500$  МПа) и высокопрочные ( $\sigma_b < 1500$  МПа).

По назначению стали подразделяют на конструкционные (менее 0,7% углерода) и инструментальные ( $\geq 0,7\%$  углерода). В свою очередь в зависимости от конкретного применения различают конструкционные стали общего и специального назначений, стали с особыми физическими или химическими свойствами, инструментальные стали для режущих и измерительных инструментов, жаростойкие и жаропрочные стали и многие другие.

### **7.1. Углеродистые стали обыкновенного качества**

Это наиболее дешевые стали, которые преимущественно используются для изготовления различных строительных металлоконструкций.

Стали обычного качества поставляют горячекатаными в виде проката. Марки сталей, их химический состав и степень раскисления регламентирует ГОСТ 380-94.

Стали маркируют сочетанием букв «Ст» и цифрой (от 0 до 6). Степень раскисления указывают добавлением к марке букв «сп», «пс» или «кп», что соответствует спокойным, полуспокойным или кипящим сталям соответственно.

В табл. 7.1 приведены механические свойства спокойных и полуспокойных сталей обычного качества (ГОСТ 535 – 88).

Таблица 7.1.

Механические свойства углеродистых сталей.

Марка стали	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа не менее	$\delta$ , % не менее
Ст 0	$\geq 310$	—	20
Ст 1	320-420	—	31
Ст 2	340-440	—	29
Ст 3	380-490	255	26
Ст 4	410-530	265	24
Ст 5	490-630	295	20
Ст 6	$\geq 590$	315	15

### ***7.2. Углеродистые качественные и высококачественные стали***

Эти стали характеризуются более низким, чем у сталей обычного качества, содержанием вредных примесей и неметаллических включений. По назначению они могут быть конструкционными и инструментальными.

Конструкционные качественные стали маркируются двухзначными числами: 08, 10, 15, 25, 30...60, обозначающими среднее содержание углерода в сотых долях процента (ГОСТ 1050-88).

Так сталь 08 содержит 0,08% углерода, а сталь 60 – 0,6% углерода. В высококачественных конструкционных сталях после марки ставят букву «А», например: Сталь 25А, Сталь 50А и т.д.

В зависимости от содержания углерода конструкционные стали подразделяют на четыре подгруппы:

1. Малопрочные и высокопластичные стали 08, 10. Их применяют для холодной штамповки различных изделий (шайбы, прокладки, кожухи и другие детали, изготовляемых холодной деформации).
2. Цементуемые стали 15, 20, 25. Из них изготовляют детали с высокой твердостью и износостойкостью поверхностного слоя при сохранении вязкой сердцевины (кулачки, толкатели, шестерни и т.п.). Поверхностный слой после химико-термической обработки упрочняют неполной закалкой в воде и низким отпуском.
3. Среднеуглеродистые стали 30, 35, 40, 45 отличаются большей прочностью, но меньшей пластичностью, по сравнению с низкоуглеродистыми. Их применяют после полной закалки и высокого отпуска (улучшение), при этом достигаются высокие показатели ударной вязкости, пластичности и малая чувствительность к концентраторам напряжений. Улучшаемые стали применяют для изготовления шатунов, коленчатых валов, зубчатых колес, маховиков, осей и других деталей, работоспособность которых определяется сопротивлением усталости.
4. Рессорно-пружинные – стали 50, 55, 60, 65, 70, после закалки и среднего отпуска (420...520°C) приобретают структуру троостита отпуска и имеют высокие пределы упругости, выносливости и релаксационную стойкость. Кроме высоких упругих свойств отпуск на троостит обеспечивает некоторое повышение пластичности и вязкости разрушения, что важно для снижения чувствительности и концентрации напряжений и увеличения предела выносливости.

В табл. 7.2. приведены некоторые свойства конструкционных углеродистых качественных сталей.

Инструментальные углеродистые стали (ГОСТ 1435-90) производят качественными (У7, У8, У9, У10...). Буква «У» в марке показывает, что сталь углеродистая, а число указывает среднее содержание углерода в десятых долях процента. Эти стали поставляют после отжига на зернистый перлит. Благодаря невысокой твердости в состоянии поставки ( $HB187...217$ ). Стали

хорошо обрабатываются резанием и деформируются, что позволяет применять высокопроизводительные методы изготовления из них инструментов.

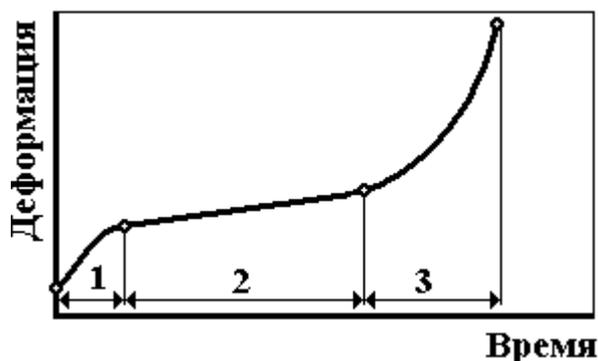


Рис. 7.2. – Кривая ползучести: 1 – неустановившаяся стадия; 2 – установившаяся стадия; 3 – стадия разрушения.

Режущие инструменты (метчики, сверла, напильники, пилы и др.) изготавливают из заэвтектидных сталей У10-У13 после неполной закалки и низкого отпуска (150...180°C), что обеспечивает высокую твердость (62...64HRC) и износостойкость рабочих граней. При нагреве свыше 200°C твердость сильно снижается, поэтому инструмент из этих сталей пригоден для обработки при небольших скоростях резания. Также из этих сталей изготавливают измерительные инструменты (калибры простой формы) и штампы холодной высадки и вытяжки.

Таблица 7.2

Свойства углеродистых качественных сталей в нормализованном состоянии (ГОСТ 1050-88).

Марка стали	C, %	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , в %	НВ	KCU, Мдж/м <sup>2</sup>
08	0,05-012	330	200	33	60	131	—
10	0,07-0,14	340	210	31	55	143	—
15	0,12-0,19	380	230	27	55	149	—
20	0,17-0,24	420	250	25	55	163	—

25	0,22-0,3	460	280	23	50	170	0,9
30	0,27-0,35	500	300	21	50	179	0,8
35	0,32-0,4	540	320	20	45	207	0,7
40	0,37-0,45	580	340	19	45	217	0,6
45	0,42-0,5	610	360	16	40	229	0,5
50	0,47-0,55	640	380	14	40	241	0,4
55	0,52-0,6	660	390	13	35	255	—
60	0,57-0,65	690	410	12	35	255	—

Стали У7-У9, обеспечивающие более высокую вязкость, применяют для инструментов, подвергающихся ударам: деревообрабатывающих, слесарных, кузнечных, а также пуансонов, матриц и др. После полной закалки их отпускают на структуру троостита при 275...325°С (48...55HRC) или при 400...450°С (38-45HRC).

### ***7.3. Легированные стали***

Легированные стали производят и поставляют качественными, высококачественными и особовысококачественными.

Марка легированных сталей состоит из сочетания букв и цифр, обозначающих ее химический состав. По ГОСТ 4543-71 принято обозначать хром – Х, никель – Н, марганец – Г, кремний – С, молибден – М, вольфрам – В, титан Т, цирконий – Ц, ванадий – Ф, ниобий –Б, медь – Д, алюминий - Ю, кобальт – К, бор – Р.

Число, стоящее после буквы, указывает среднее содержание в процентах легирующего элемента в стали. Если число отсутствует, то легирующего элемента меньше или около 1%. Буква А в конце марки показывает, что сталь высококачественная. Особовысококачественные стали имеют в конце буквы: «Ш» - электрошлаковый переплав; «ВД» - вакуумно-дуговой переплав; «ВИ» - вакуумно-индукционная выплавка.

Число в начале марки конструкционной легированной стали показывает содержание углерода в сотых долях. Например: конструкционная сталь

12X18H9T содержит 0,12%С, 18%Cr, 9%Ni и менее 1%Ti; конструкционная сталь 38ХМЮА содержит 0,38%С, 1%Cr, 1%Mo, менее 1%Al – высококачественная; особовысококачественная сталь 30ХГС-Ш содержит 0,30%С и по одному проценту хрома, марганца и кремния.

Число перед маркой инструментальных сталей показывает содержание углерода в десятых долях. Если же концентрация углерода примерно 1%, то цифры не ставятся, например: Сталь ХВГ содержит по 1% углерода, хрома, вольфрама и марганца; Сталь 9ХС – 0,9%С, 1%Cr, 1%Si.

Некоторые стали содержат дополнительную букву после слова сталь, обозначающую ее группу или тип, например: ШХ15 – шарикоподшипниковая сталь (1%С, 1,5%Cr); Р6М5 - быстрорежущая сталь (1%С, 6%W, 5% Mo); АС14ХГН – автоматная сталь (14%Si, 1%Cr, 1%Mn, 1%Ni).

#### Низколегированные конструкционные стали

Низколегированные конструкционные стали содержат до 5% легирующих компонентов, которые определяют измельчение перлитной составляющей и растворяются в феррите. Для улучшения свариваемости содержание углерода в этих сталях не превышает 0,25%.

- Цементуемые конструкционные стали, легированные Cr; Cr и V; Cr и Ni; Cr и Mg; Cr, Mg и Ni) содержат до 0,25% углерода, обладают после цементации (или нитроцементации) и последующей закалки и низкого отпуска высокой твердостью (60...64HRC) и износостойкостью поверхностного слоя при сохранении вязкой и прочной сердцевины. Из этих сталей изготавливают кулачковые муфты, кулачки, зубчатые колеса, поршневые пальцы, втулки, коленчатые и распределительные валы.
- Улучшаемые стали (0,30...0,45% углерода) легируют Cr; Cr и Mn; Cr, Si и Mn; Cr, Ni; Cr и Mo. Эти стали применяются после полной закалки и высокого отпуска. Они имеют высокие показатели предела текучести и вязкости, обеспечиваемые сквозной прокаливаемостью и мелкозернистой

структурой. Из этих сталей изготавливают коленчатые валы, зубчатые колеса, шатуны, гильзы цилиндров и т.п. Ряд улучшаемых сталей, например сталь 38ХМЮА, после закалки и высокого отпуска подвергают азотированию для обеспечения высокой твердости и износостойкости поверхностного слоя.

- Рессорно-пружинные стали, легируют  $Si$ ;  $Si$  и  $Mn$ ;  $Cr$  и  $Si$ ;  $Cr$  и  $Mn$ ;  $Ni$ , и  $Si$  и они имеют высокие пределы упругости и выносливости, что позволяет использовать их в качестве материала для изготовления пружин и рессор.
- Автоматные стали (сталь А12...АС14ХГН и другие), имеют повышенное содержание серы (0,08...0,3%), фосфора (до 0,05%) и марганца (до 1,5%). Включения сульфидов марганца ( $MnS$ ) и фосфора приводят к образованию хрупкой стружки взамен так называемой «сливной» в виде непрерывной ленты, что позволяет проводить обработку резанием с большой скоростью, увеличить стойкость инструмента и качество поверхности обрабатываемой детали. Эти стали используют для изготовления болтов, гаек, шпилек, винтов, втулок.

В табл. 7.3 приведены механические свойства некоторых низколегированных сталей.

Таблица 7.3.

Механические свойства конструкционных низколегированных сталей.

	Марки стали	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$KCU$ , МДж/м <sup>2</sup>	Примечание	
Низколегированные	14Г2	470	340	21	0,7	при+20°С	Без термообработки
					0,35	при-40°С	
	10ХГС	530	400	10	0,80	при-40°С	
					0,50	при-70°С	
Цементуемые	20Х	800	650	11	—	Для деталей	35мм

	25ХГН	1200	1100	10	0,8	сечением до:	80мм
Улучшаемые	30Х	900	700	12	0,7	После улучшения	
Улучшаемые	30ХГСА	1000	850	10	0,5	После улучшения	
	40ХН2МА	1100	950	12	0,8		
Рессорно- пружинные	60С2	1300	1200	25	—	После закалки и среднего отпуска	
	50ХГ	1300	1100	35	—		
Автоматные	А12	420	—	34	—	Без термообработки	
	АС45Г	610	360	—	—	После нормализации	
	АС14ХГН	1120	850	—	0,8	После закалки и отпуска	

#### Низколегированные инструментальные стали

Легирующие элементы (до 5%) вводят в эти стали для увеличения закаливаемости, прокаливаемости, уменьшения вероятности возникновения деформаций и опасности растрескивания. Основным легирующим элементом является хром. Также добавляют марганец (1...2%) для обеспечения минимальных изменений размеров инструментов при закалке, кремний (1...5%), который повышает сопротивление отпуску, и вольфрам (1...5%), увеличивающий износостойкость (табл. 7.4).

Таблица 7.4.

Химический состав (ГОСТ5950-73) и режимы термической обработки некоторых низколегированных инструментальных сталей.

Марка стали	Содержание элементов, %						Температура, ° С	
	C	Si	Cr	W	V	Прочие	закал ки	отпус ка
ХВ4	1,25-	—	0,4-0,7	3,5-4,3	0,15-	—	800-	100-

	1,45				0,30		820	140
9ХС	0,85-0,95	1,2-1,6	0,9-1,2	—	—	—	840-860	140-180
ХВГ	0,9-1,05	—	0,9-1,2	1,2-1,6	—	0,8-1,1Mn	830-850	140-170
ХВСГ	0,95-1,05	0,65-1	0,6-1,1	0,5-0,8	0,05-0,15	0,6-0,9Mn	840-860	140-160

По структуре низколегированные инструментальные стали относятся к заэвтектоидным сталям перлитного класса. Их подвергают неполной закалке и низкому отпуску, что обеспечивает им высокую твердость (62...69HRC) и износостойкость. Однако теплостойкость этих сталей сравнима с теплостойкостью углеродистых, поэтому их применяют для инструментов, работающих при небольших скоростях резания до температур 200...260°C. Для температурных инструментов применяют низколегированные стали X, ХГ, ХВГ, 9ХС, обрабатываемые на высокую твердость (60...64HRC). Для предотвращения объемных изменений за счет распада мартенсита, превращений остаточного аустенита или релаксации остаточных напряжений, инструменты высокой точности подвергают закалке и обработке холодом при -50...-80°C с последующим низким отпуском (120...140°C) в течение 24...48 час. Подшипниковые стали выпускаются по ГОСТ801-78 и применяются для изготовления подшипников качения, храповых механизмов, пальцев различных машин. Наиболее частой причиной отказа подшипников являются излом, разрушение тел качения (шариков, роликов) и рабочих поверхностей колец, а также усталостное выкрашивание рабочих поверхностей элементов подшипников. Для изготовления тел качения и подшипниковых колец небольших сечений обычно используют высокоуглеродистую хромистую сталь ШХ15 (0,95...1,05%С, 1,3...1,65%Cr), а для больших сечений – хромомарганцевокремнистую сталь ШХ15СГ (0,95...1,05%С, 1,2...1,5Cr, 0,4...0,65Si, 0,3...1,65% Mn). После закалки в масло и низкого отпуска эти стали имеют структуру мартенсита с дисперсными равномерно распределенными карбидами  $(Fe, Cr)_7C_3$ , что определяет высокую

износостойкость и твердость 62...65HRC. Для подшипников, которые должны иметь высокую стабильность размеров, перед отпуском применяют обработку холодом.

Для изготовления деталей подшипников, работающих при высоких динамических нагрузках, применяют стали 20X2P4A и 18XГТ. После газовой цементации на толщину 1,2...3,5мм, высокого отпуска (для уменьшения количества остаточного аустенита), закалки и отпуска при 160..170°C детали подшипников из стали 20X2H4A имеют на поверхности 58...62 HRC и в сердцевине 61...65HRC. Детали подшипника из стали 18XГТ после газовой цементации на глубину 0,9...1,8мм, закалки и низкого отпуска имеют твердость поверхности 61...65HRC.

#### Высоколегированные конструкционные стали

К ним относят большую группу высокопрочных мартенситно-старяющихся, коррозионностойких и жаростойких, а также жаропрочных и других сталей специального назначения (криогенные, магнитные, стали с высоким удельным сопротивлением и другие).

Мартенситно-старяющиеся высокопрочные стали содержат менее 0,03% углерода, но значительные количества легирующих элементов (8...20%Ni; 8...9%Co; 2...5%Mo; менее 1%Ti или Al). Высокая прочность мартенситно-старяющихся сталей обусловлена образованием твердого раствора легирующих элементов в железе, мартенситному превращению, сопровождающемуся фазовым наклепом и старению мартенсита, когда из него выделяются избыточные фазы  $Fe_3Mo$ ,  $Ni_3Mo$ ,  $Ni_3Ni$ ,  $NiAl(Fe,Co)_2Mo$  и другие. Высокие показатели сопротивления хрупкому разрушению объясняется пластичностью и вязкостью безуглеродистого мартенсита. Стали закаливают на воздухе от 820...850°C, затем проводят старение при 480...520°C. К этим сталям относят сталь Н18К9М5Т, а также менее легированные стали Н12К8М3Г2, Н10Х11М2Т, Н12К8М4Г2, Н9Х12Д2ТБ. Механические свойства этих сталей после старения ( $\sigma_B=1500-2100$ МПа;  $\sigma_{02}=1400-$

2000МПа;  $\delta=8-12\%$ ;  $KCU=0,4...0,6$  МДж/м<sup>2</sup>52;  $HRC$ ) сильно зависят от степени легирования.

К коррозионно-стойким (нержавеющим) относят стали, устойчивые в электрохимической, химической, межкристаллитной и другим видам коррозии. Повышение устойчивости стали к коррозии достигается введением в нее элементов, образующих на поверхности защитные пленки, прочно связанные с основным материалом.

Составы сталей, устойчивых к электрохимической коррозии устанавливается в зависимости от рабочей среды. В зависимости от получаемой структуры эти стали могут быть мартенситного, мартенситно-ферритного, ферритного, аустенитного, аустенитно-ферритного и аустенитно-мартенситного классов (табл. 7.5).

Таблица 7.5.

Химический состав и механические свойства некоторых коррозионно-стойких сталей

Марка стали	Содержание основных элементов %				Механические свойства			
	<i>C</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	Другие элементы, %	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Стали мартенситного класса								
20X13	0,16...0,25	12-14	—	—	850	650	15	50
40X13	0,36...0,45	12-14	—	—	1150	900	12	30
Стали ферритного класса								
15X25T	0,15	24-27	—	5C;0,9Ti	540	360	40	70
015X17M2Б	0,015	16,5...18,5	—	2Mo,0,5Nb	450	280	30	60
Стали мартенситно-ферритного класса								
12X13	0,10...0,15	12-14	—	—	750	500	20	65
Стали аустенитного класса								
12X18H9T	0,12	17-19	8-10	0,7Ti	520	360	30	75
10X17H13M3T	0,10	16-18	12-14	3Mo 0,7Ti	580	280	40	60
Сталь аустенитно-ферритного класса								
08X21H6M2T	0,08	20-22	5,5...6,5	2Mo,0,4Ti	750	450	50	55

Сталь аустенитно-мартенситного класса								
09X15H8Ю	0,09	14-16	7-9	0,7...1,3Al	1250	1000	20	50

Для образования на поверхности сталей плотной защитной оксидной пленки типа  $(Cr, Fe)_2O_3$ , содержание хрома в твердом растворе должно быть не менее 12...14%. Углерод и азот способствуют охрупчиванию сталей и являются причиной возникновения межкристаллитной (интеркристаллитной коррозии), которая связана с образованием карбидов хрома по границам зерен

и обеднением твердого раствора хромом приграничных участков ( $<12\% Cr$ ).

Для предотвращения межкристаллитной коррозии в ряде случаев стали легируют более активными по отношению к углероду элементами (титан, цирконий, ниобий), которые связывают углерод, образуя самостоятельные карбиды.

Жаростойкие (окалиностойкие) стали должны противостоять воздействию среды при высоких температурах. Для повышения жаростойкости в сталь вводят хром, алюминий или кремний, которые, находясь в твердом растворе, образуют на поверхности стали защитные пленки оксидов типа  $(Cr, Fe)_2O_3$ ,  $(Al, Fe)_2O_3$  или  $(Si, Fe)_2O_3$ . Так, при содержании в стали 5...8% хрома, жаростойкость повышается до 700...750°C, увеличение содержания хрома до 15...17% обеспечивает жаростойкость до 950...1000°C. Легирование сталей с 25% хрома алюминием в количестве 5% повышает жаростойкость до 1300°C.

Для деталей различных высокотемпературных установок, печей и газовых турбин применяют жаростойкие ферритные (12X17, 15X25 и др.) и аустенитные (20X23H13, 12X25H16Г7А, 36X18H25С2 и др.) стали, обладающие еще и жаропрочностью.

Жаропрочность – способность материала длительное время сопротивляться деформированию и разрушению под действием приложенных сил при высоких (более  $0,3 T_{пл}$ ) температурах. Критериями жаропрочности являются пределы ползучести и длительной прочности.

При ползучести происходит медленное нарастание пластической деформации под действием напряжений, меньших предела текучести (рис.7.2). Пределом ползучести называется напряжение, под действием которого материал деформируется на определенную величину за определенное время при данной температуре, например  $\sigma_{0,5/1000}^{700}=100\text{МПа}$ , т.е. под действием напряжения 100МПа при температуре 700°C через 1000 часов в материале появляется пластическая деформация 0,5%.

Пределом длительной прочности ( $\sigma_{\tau}^T$ ) называется напряжение, которое приводит к разрушению материала при заданной температуре за определенное время, например:  $\sigma_{500}^{1100}=10\text{ МПа}$ , т.е. через 500 часов при напряжении 10 МПа и температуре 1100°C произойдет разрушение материала.

Перлитные, аустенитные и мартенситные жаропрочные стали используют при 450...700°C (табл. 7.6).

Таблица 7.6.

Свойства жаропрочных сталей.

Марка стали	Класс стали	Содержание легирующих элементов, %	Температура °С		Жаропрочность	
			Наибольшая рабочая	начала интенсивного окисления	$\sigma_{\tau}^T$ , МПа	Температура испытания, °С
12X1MФ	Перлитный	0,12C;1,1Cr; 0,3Mo;0,2V	585	600	140	560
25X2M1Ф		0,25C;2,3Cr; 1Mo;0,4V	550	600	200	550
15X5M	Мартенситный	0,15C;5,2Cr; 0,5Mo	600	650	100	540
40X10C2M		0,4C;10Cr; 2,2Si;0,8Mo	650	850	100	550

12X18H10T	Аустенитный	0,12C;14Cr; 10Ni;0,5Ti	600	850	100	660
45X14H14B2M		0,45C;14Cr; 14Ni;2,4W; 0,3Mo	650	850	130	650

Перлитные жаропрочные стали для паросиловых установок должны иметь допустимую деформацию не более 1% за  $10^5$  час. Это низкоуглеродистые стали, оптимальной термической обработкой являются нормализация после  $1000^\circ\text{C}$  и последующий отпуск при  $650\dots750^\circ\text{C}$  в течение  $2\dots3$  час.

Упрочнение достигается за счет растворения молибдена в твердом растворе и образования карбидов ванадия или хрома типа  $\text{MeC}$ .

Различают две группы мартенситных сталей: стали с содержанием  $10\dots12$  хрома, добавками  $\text{Mo}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{Nb}$ ,  $\text{W}$  и низким ( $0,10\dots0,15\%$ ) содержанием углерода и стали с повышенным содержанием углерода (до  $0,4\%$ ), хромом ( $5\dots10\%$ ) и кремнием ( $2\dots3\%$ ) – сильхромы.

Мартенситные стали первой группы (табл. 7.6) предназначены для изделий, работающих при  $450\dots600^\circ\text{C}$  в атмосфере пара, топочных газов. Критерием жаропрочности этих сталей является предел ползучести с допустимой деформацией 1% за  $10^5$  час. Типовым режимом термической обработки этих сталей является закалка или нормализация с  $950\dots1100^\circ\text{C}$  и отпуск при  $600\dots740^\circ\text{C}$ . Полученная структура (смесь легированного феррита и мелких карбидов) – обеспечивает высокую жаропрочность.

Из мартенситных сталей изготавливают диски, лопатки, бандаж и крепежные детали паровых турбин.

Стали второй группы (сильхромы) обладают высокой жаростойкостью в среде горячих выхлопных газов и используются для изготовления клапанов двигателей внутреннего сгорания. Типовой режим термической обработки - закалка  $1050\dots1100^\circ\text{C}$  и отпуск при  $720\dots780^\circ\text{C}$ .

Сильхромы используют для изготовления деталей, работающих при температурах до 600...650°C, при более высоких рабочих температурах применяют аустенитные стали.

Аустенитные стали (табл. 7.6) по жаропрочности превосходят перлитные и мартенситные стали и применяются при температурах выше 600...650°C. Для получения устойчивой аустенитной структуры их легируют хромом, никелем или марганцем, а для образования карбидных или промежуточных интерметаллидных) фаз вводят молибден, ниобий, титан, алюминий, вольфрам. Содержание углерода в этих сталях составляет обычно 0,1...0,4%. В зависимости от полученной структуры различают однофазные аустенитные стали, стали с карбидным упрочнением и стали с интерметаллидным упрочнением. Однофазные стали, например, сталь 12X18H10T применяют в теплоэнергетике после закалки от 1020...1100°C и последующего наклепа. Аустенитные стали с карбидным упрочнением комплексно легируют *W*, *Mo*, *Ti*, *Nb*, *V*, а также бором. Для сохранения аустенитной структуры содержание никеля повышают до 14%. Оптимальная жаропрочность достигается после закалки от 1100...1150°C и старения аустенита при 700...800°C для образования карбидов.

Аустенитные стали с интерметаллидным упрочнением (табл. 7.6) легируют *Cr*, *Mo*, *W*, а образование интерметаллидов типа  $Ni_3Al$  происходит в результате закалки на аустенит и последующего старения.

Криогенные стали широко применяются при температурах ниже точки кипения кислорода (-183°C) в ракетной, космической областях и в быту. Эти стали должны обладать достаточной прочностью при нормальных температурах в сочетании с высоким сопротивлением хрупкому разрушению при низких температурах. В качестве криогенных применяют низкоуглеродистые никелевые стали, а также стали аустенитного класса, не склонные к хладноломкости. Из сталей ОН6А (до 0,1%С; 6...7%Ni) и ОН9А (менее 0,1%С; 8,5...9,5%Ni) изготавливают резервуары для хранения и транспортирования сжиженных газов при температурах выше – 196С. Стали

после двойной нормализации (при 900° и 790°) и отпуска при 560°С имеют  $\sigma_{0,2}=400\dots450$  МПа при 20°С и 680...820МПа при -196°С, при этом сопротивление удару при -196°С составляет  $KCU=1,0\dots1,3$  МДж/м<sup>2</sup>.

Аустенитные криогенные стали в зависимости от типа легирующих добавок могут быть хромоникелевыми, сложнолегированными повышенной прочности и хромомарганговистыми.

Хромоникелевые аустенитные стали (12Х18Н10Т, 08Х18Н10Т) применяются для изготовления крупногабаритных газораспределительных установок большой мощности для получения сжиженных газов, а также для транспортных емкостей и хранилищ сжиженных газов. Стали хорошо свариваются и обладают высокой вязкостью при низких температурах ( $\sigma_{0,2}=600$ МПа;  $KCU=1,0$  МДж/м<sup>2</sup>). Сложнолегированные аустенитные стали повышенной прочности (07Х21Г7Н5, 03Х20Н16Г6) при температуре -253°С имеют  $\sigma_{0,2}=1150-1350$ МПа;  $KCU=1,0\dots1,3$ МПа и применяются для штампосварных изделий и толстостенных крупногабаритных емкостей.

Аустенитные хромомарганцевые стали используют после закалки в воде от 1000...1050°С при рабочих температурах от 20 до -196°С (сталь 03Х13Г19) и до -253°С (сталь 10Х14Г14Н4Т) для изготовления сварных конструкций.

Магнитные стали делят на магнитно-твердые, магнитно-мягкие и парамагнитные.

Магнитно-твердые стали с 1%С, легированные хромом порядка 3% (ЕХ3), а также хромом и кобальтом (ЕХ5К5, ЕХ9К15М2) применяют для изготовления постоянных магнитов.

Магнитно-мягкие стали (электротехническая сталь) применяют для изготовления якорей и полюсов машин постоянного тока, роторов и статоров асинхронных двигателей, для магнитных цепей крупных электрических машин, силовых трансформаторов, приборов и т.д. Электротехническая сталь должна содержать минимальное количество углерода и примесей, иметь однородную структуру без следов наклепа.

Парамагнитные (немагнитные) стали применяются в электротехнике, приборостроении и специальных областях техники. К ним относят парамагнитные стали аустенитного класса (17Х18Н9, 12Х18Н10Т, 55Г9Н9Х3, 50Г18Х4, 40Г14Н9Ф2 и др.).

#### **7.4. Высоколегированные инструментальные стали**

Высокомарганцовистая аустенитная сталь 110Г13Л (1,1%С; 13%Mn; литейная) применяется для изготовления деталей, устойчивых к изнашиванию в условиях больших давлений и ударных нагрузок, но без абразивного износа (траки гусениц танков и тракторов, детали камнедробилок, черпаки экскаваторов, крестовики железнодорожных путей и другие). Высокая износостойкость этой стали обусловлена способностью аустенита к сильному деформационному упрочнению (наклепу). Из-за наклепа сталь плохо обрабатывается резанием, поэтому детали в основном получают литьем.

В литом состоянии структура стали состоит из аустенита и карбидов марганца, которые легко растворяются в аустените при нагреве до 1100°С. После закалки в воде с этой температуры сталь 110Г13Л имеет однофазную структуру аустенита с высокой пластичностью ( $\delta=40\dots50\%$ ) и низкой твердостью ( $HB\ 180\dots200$ ), но способна к наклепу при ударных нагрузках. В процессе деформации под действием ударных нагрузок в поверхностном слое стали количество дефектов повышается, и твердость ее возрастает до  $HB600$ .

Быстрорежущие стали – относятся к классу высоколегированных сталей, предназначенных для изготовления инструментов с высокой теплостойкостью (580...640°С). Высокая теплостойкость этих сталей обеспечивается введением большого количества вольфрама вместе с другими карбидообразующими элементами – молибденом, хромом, ванадием. Быстрорежущие стали обозначаются буквой «Р» - *rapid*, после которой стоит число, указывающее процентное содержание вольфрама (ГОСТ19265-73).

Содержание ванадия (до 2%) и хрома (около 4%) в марке не указывается. Стали, дополнительно легированные молибденом, кобальтом или с повышенным содержанием ванадия, содержат в маркировке буквы (М, К, Ф) и цифры, показывающие процент введенных элементов. По эксплуатационным свойствам все быстрорежущие стали делятся на стали нормальной и повышенной производительности.

К сталям нормальной производительности относятся вольфрамовые (P18, P12, P9Ф5) и вольфрамомолибденовые (P6M3, P6M5) стали, сохраняющие твердость не ниже 58 ... 620 *HRC* °C. Стали повышенной производительности дополнительно легируют хромом и значительным количеством ванадия (P6M5K5, P9M4K8, P9K5, P9K10, P10K5Ф5, P18K5Ф2). Эти стали сохраняют твердость более 64 *HRC* при нагреве до 630...640°C, но при этом показатели прочности и пластичности у них ниже, чем у сталей нормальной производительности.

Все быстрорежущие стали относятся к сталям ледебуритного класса. В литом состоянии структура их состоит из ледебуритной эвтектики, аустенита остаточного и продуктов его распада. Для дробления ледебурита слитки быстрорежущей стали подвергают ковке при 1200...900°C, при этом устраняется карбидная неоднородность. Затем проводят изотермический отжиг при температурах 860...880°C. Структура отожженных сталей состоит из сорбитообразного перлита и карбидов.

В сталях с вольфрамом (P9, P12, P18) это сложные карбиды вольфрама переменного состава ( $Fe_3W_3C$ ), в котором растворена часть ванадия и хрома. В остальных сталях кроме этого карбида присутствует карбид VC и небольшое количество карбида  $(Fe, Cr)_{23}C_6$ .

Высокие эксплуатационные свойства инструменты из быстрорежущей стали приобретают после закалки и трехкратного отпуска (рис.7.3). Низкая теплопроводность этих сталей приводит к необходимости медленного, ступенчатого нагрева под температуру закалки в соляных ваннах, которые уменьшают вероятность окисления и обезуглероживания. Высокая

температура нагрева под закалку необходима для предельного насыщения аустенита легирующими элементами с целью получения после закалки высоколегированного мартенсита. Чем более легированным будет мартенсит, тем больше при отпуске выделится специальных высокодисперсных карбидов и тем выше окажутся показатели твердости и теплостойкости инструментов. Карбиды, не растворившиеся в аустените при нагреве, располагаются по границам зерен и тормозят их рост при нагреве, обеспечивая наследственную мелкозернистость быстрорежущих сталей.

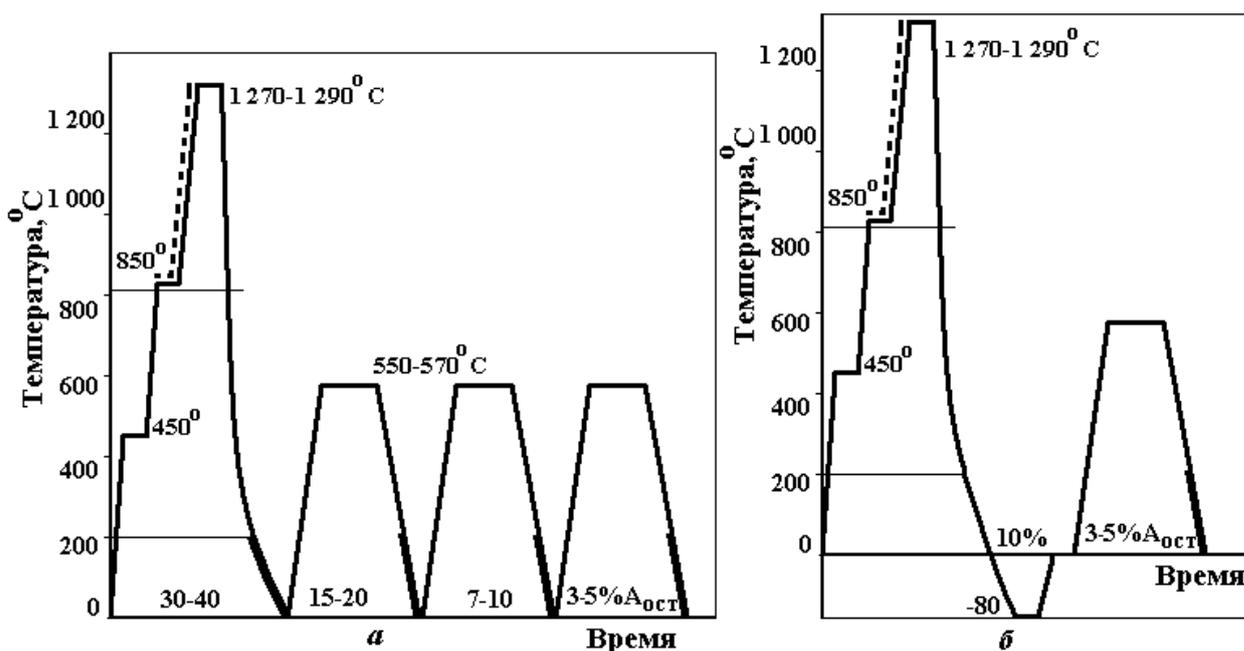


Рис. 7.3. Схемы термической обработки быстрорежущей стали (а) без обработки холодом и (б) с обработкой холодом:  $A_{ост}$  – аустенит остаточный.

По структуре после закалки быстрорежущие стали относятся к мартенситному классу. Для небольших деталей охлаждение проводят на воздухе, крупные – в масле. Для деталей сложной формы применяют ступенчатую закалку с выдержкой при 500...550°C. После закалки в структуре быстрорежущей стали содержится порядка 30...40% аустенита остаточного, что снижает их твердость и теплостойкость. Для превращения остаточного аустенита в мартенсит применяют трехкратный отпуск (рис. 7.3, а) или обработку холодом с последующим однократным отпуском рис. 7.3, б.

### ***Контрольные вопросы***

1. Как маркируются углеродистые стали обычного качества?
2. Как маркируются углеродистые качественные стали?
3. Как маркируются низколегированные стали?
4. Какие показатели после термообработки имеют улучшаемые стали?
5. Чем обусловлена высокая прочность мартенситно-старяющих сталей?
6. К какому классу относятся быстрорежущие стали?

## **ГЛАВА. 8. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ**

Цветные металлы в чистом виде обычно применяются редко, чаще используют различные сплавы.

Из числа сплавов цветных металлов в машиностроении наибольшее значение имеют легкие сплавы – алюминия, магния и титана, а также медь и ее сплавы, сплавы на основе никеля, сплавы для подшипников (баббиты), материалы для полупроводников и высокопрочные сплавы на основе тугоплавких металлов.

Маркировка цветных сплавов вызывает затруднения вследствие ее неоднозначности. Сплавы на основе титана и марганца относятся к группе специальных сплавов. Поэтому они имеют оригинальную буквенно – числовую маркировку. На первом месте ставят буквенное обозначение вида сплава («ВТ или ОТ» титановые, «МЛ» магниевые литейные, «МА» магниевые деформируемые, «Ц» цинковые), на втором месте стоит порядковый номер сплава. Остальные сплавы имеют двойственную маркировку: современную и традиционную. Современная маркировка похожа на маркировку легированных сталей: на первом месте стоит буквенное обозначение сплава («Л» латунь, «Бр» бронза, «Н» медно-никелевые сплавы, «АЛ» алюминиевый литейный, «АК, Д, АВ или В» алюминиевые деформируемые, «Б» баббиты). Далее стоит буквенное обозначение легирующего компонента и его среднее процентное содержание. Легирующий компонент обозначается по одной двум буквам его русского названия (А – алюминий, Ж – железо, К – кремний, Мц – марганец, Н – никель, О - олово, С – свинец...). Техническая документация и техническая литература, изданная до 2000 г. в основном использует традиционную маркировку, поэтому в дальнейшем рассмотрим эту маркировку.

### **8.1. Сплавы на основе алюминия**

Для алюминия и его сплавов характерна большая удельная прочность ( $\sigma_v/\rho$ , где  $\rho$ - плотность), близкая к значениям для среднелегированных сталей.

Алюминий и его сплавы хорошо поддаются горячей и холодной деформациям, точечной сварке, а специальные сплавы можно сваривать плавлением и другими видами сварки.

Чистый алюминий хорошо сопротивляется коррозии, так как на его поверхности образуется плотная пленка оксидов  $Al_2O_3$ . Добавки железа и кремния повышают прочность алюминия, но снижают пластичность и устойчивость против коррозии. Чистый алюминий применяется для кабелей и электропроводящих деталей, но в основном алюминий используется для изготовления сплавов.

Традиционная маркировка алюминиевых сплавов включает в себя: буквенное обозначение вида сплава (Д – дюралюмины, В или АВ – высокопрочный сплав, АК – ковочный сплав, АЛ – литейный сплав); порядковый номер сплава и буквенное обозначение состояния поставки (М – мягкий, Т – термически обработанный, Н – нагартованный, П – полунагартованный).

Все сплавы на алюминиевой основе по технологическим признакам можно разделить на деформируемые и литейные, которые в свою очередь могут быть упрочняемыми или неупрочняемыми термической обработкой.

#### Деформируемые алюминиевые сплавы

К деформируемым сплавам неупрочняемым термообработкой относятся сплавы на основе систем  $Al-Mn$  и  $Al-Mg$ . Сплавы на основе этих систем типа АМц, АМг2, АМгб являются коррозионно-стойкими, отличаются высокой пластичностью и хорошей свариваемостью. Применяются для изделий, от которых требуется высокая коррозионная стойкость (трубопроводы для масла и бензина, радиаторы тракторов и автомобилей, сварные бензобаки), а также для заклепок корпусов судов и других деталей.

К деформируемым сплавам упрочняемым термической обработкой относятся сплавы системы *Al-Cu-Mg*- дуралюмины (Д1, Д16, Д18, Д19, ВД17) и жаропрочные сплавы системы *Al-Cu-Mg-Fe-Ni* (типа АКЦ4-1).

Дуралюмины применяются для лопастей воздушных винтов, силовых элементов конструкций самолетов, кузовов автомобилей (Д1, Д16), для деталей, работающих при нагреве до 200...250°С (Д19, ВД17). Сплав АКЦ-1 используется для изготовления деталей реактивных двигателей (крыльчатки насосов, колеса, компрессоры, диски, лопатки).

Ковочные сплавы АК6, АК8 системы *Al-Mg-Si-Cu* применяют для изготовления сложных штамповок, таких как крыльчаток вентиляторов для компрессоров реактивных двигателей, корпусных агрегатных и крепежных деталей.

Высокопрочные сплавы системы *Al-Zn-Mg-Cu* (В95, В93, В96Ц1) отличаются высоким временным сопротивлением (600...700МПа), но при этом не являются жаропрочными. Максимальная рабочая температура изделий из этих сплавов при длительной эксплуатации не может превышать 100...120°С. Сплавы применяются для высоконагруженных конструкций, работающих в основном в условиях напряжений сжатия (детали обшивки, лонжероны самолетов и другие детали).

В табл. 8.1 приведены свойства некоторых деформируемых алюминиевых сплавов.

#### Литейные алюминиевые сплавы

Для изготовления фасонных деталей применяют литейные алюминиевые сплавы, которые имеют низкую плотность и высокую удельную прочность.

Эти сплавы обладают хорошей жидкотекучестью, небольшой усадкой. Сложнолегированные сплавы обычно подвергают термической обработке, после которой они приобретают высокую прочность ( $\sigma_{\text{в}}=250...300\text{МПа}$ ).

Основными легирующими элементами литейных алюминиевых сплавов являются кремний, медь, марганец, цинк. Марганец, никель и хром в небольших количествах (0,5...3,5 %) добавляют в некоторые сплавы для повышения коррозионной стойкости и жаропрочности.

По назначению алюминиевые конструкционные литейные сплавы можно условно разбить на герметичные, жаропрочные и на коррозионно-стойкие.

Таблица 8.1

Свойства деформируемых сплавов алюминия

Марка	Вид полуфабриката	Толщина или диаметр, мм	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
Неупрочняемые термической обработкой				
АМц	пруток	20	170	18
АМг4	пруток	25	320	15
Упрочняемые термической обработкой (закалка и старение)				
Д1	пруток	$\leq 50$	360	12
Д16	лист	30...40	460	10
Д19	полотно	7,5	480	10
АК4-1	профиль	<10	400	8
АК8	пруток	150...200	450	8
В95	лист	50	550	12

Конструкционные герметичные сплавы АЛ2, АЛ4, АЛ9, АЛ34

(силумины) изготавливаются на основе систем  $Al-Si$  или  $Al-Si-Mg$ , и отличаются высокими литейными свойствами и герметичностью изготовленных из них отливок. Двойные сплавы  $Al-Si$  (АЛ2) не упрочняются термической обработкой, но модифицирование этого сплава небольшими количествами магния или церия значительно повышает механические свойства. Легированные силумины (АЛ4, АЛ9) подвергаются термической обработке, как правило закалке и старению. Сплавы предназначены для изготовления герметичных емкостей (АЛ2), корпусов компрессоров, картеров двигателей внутреннего сгорания (АЛ4, АЛ9), крупных корпусных деталей (АЛ34), блоков цилиндров (АЛ 32) и других деталей. Механические свойства силуминов приведены в табл. 8.2.

Конструкционные жаропрочные алюминиевые сплавы систем *Al-Si-Cu-Mg* (АЛ33), *Al-Cu-Mn* (АЛ19) подвергают термической обработке (закалке и старению). Эти сплавы обладают высокой жаропрочностью (до 250...350°C) и применяются для изготовления ответственных деталей, работающих в условиях повышенных статических и ударных нагрузок при высоких температурах (табл. 8.3).

Таблица 8.2.

Механические свойства силуминов при 20°C.

Сплав	Полуфабрикат	Состояние (термическая обработка-т/о)	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
АЛ2	Отлитые образцы Ø12мм	Без т/о	170	6,0
АЛ4		Закалка и старение	260	4,0
АЛ9			230	2,0
АЛ32	Выточенный образец Ø10мм	Без т/о	180	1,5
АЛ34	Отлитые образцы Ø12мм	Без т/о	200	3,0
		Закалка и старение	300	7,0

Таблица 8.3.

Механические свойства жаропрочных литейных сплавов алюминия.

Сплав	Вид образца	Термическая обработка	Температура испытания, °C	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , в %	$\sigma_{100}^T$ , в МПа
АЛ 19	Литые - Ø12мм	Закалка и старение	20	300	8,0	-
			200	270	3,0	150
			300	140	5,0	60
			350	80	8,0	35
АЛ33	точенные	Закалка и старение	200	210	4,0	130
			250	140	4,0	55
	Литые - толщиной 3мм	Без т/о Закалка и старение	200	230	4,0	-
			200	250	3,0	160
			300	170	3,0	90

Конструкционные коррозионно-стойкие сплавы на основе систем *Al-Mg* (АЛ8, АЛ27) и *Al-Mg-Zn* (АЛ24) обладают более высокой коррозионной

стойкостью, по сравнению с другими алюминиевыми сплавами. Недостатком сплавов АЛ8, АЛ27 является их низкая жаропрочность – уровень рабочих температур не должен превышать 60°С. Эти сплавы применяют для изготовления силовых деталей, работающих при температурах от –60 до +60°С в различных климатических условиях, включая воздействие морской воды и тумана.

Добавки цинка в систему *Al-Mg* (сплав АЛ24) позволил увеличить жаропрочность до 150°С, при этом сплав сохранил высокую коррозионную стойкость и хорошие литейные свойства. В табл. 8.4 приведена коррозионная стойкость сплавов системы *Al-Mg*.

Таблица 8.4

Коррозионная стойкость сплавов системы *Al-Mg*.

Сплав	Скорость коррозии, г/(м <sup>2</sup> ·час)				
	При постоянном погружении			При переменном погружении	В камере тумана
	1 месяц	2 месяца	6 месяцев	1 месяц	3 месяца
АЛ8	0,0969	—	—	0,0218	0
АЛ27	0,479	0,0364	0,0228	0,0076	0,001
АЛ27-1	0,0098	0,0031	0,0029	0,0015	0

## 8.2. Сплавы на основе магния

Малая плотность магния и его сплавов в сочетании с высокой удельной прочностью и рядом физико-химических свойств делает их ценными для применения в различных областях машиностроения: автомобильной, приборостроения, самолетостроения, космической, радиотехнике и других.

В горячем состоянии магниевые сплавы хорошо поддаются различным видам обработки давлением – прессованию, ковке, прокатке. В зависимости от химического состава магний выпускается трех марок: Мг96 (чистота - 99,96%), Мг95 (99,95%) и Мг90 (99,90%). Также для спецтехники выпускается магний повышенной (99,99%) и высокой (99,9999%) чистоты.

Промышленные магниевые сплавы делятся на литейные (МЛ) для получения деталей методом фасонного литья и деформируемые (МА) для получения изделий методом пластической деформации.

В табл. 8.5 приведены области применения некоторых магниевых сплавов.

Таблица 8.5.

Области применения магниевых сплавов

Сплав	Состав, %	Максимальная рабочая температура, °С		Области применения
		Длительная	Кратковременная	
Литейные сплавы				
МЛЗ	(2,5...3,5)Al (0,15...0,5)Mn (0,5...1,5)Zr	130	150	Детали с высокой герметичностью и коррозионной стойкостью (корпуса насосов, бензобаки, горловина и т.д.)
МЛ10	(0,1...0,7)Zn	250	350	Нагруженные детали различных конструкций двигателей, приборов и агрегатов с высокой герметичностью и стабильностью размеров
Деформируемые сплавы				
МА1	(1,3...2,5)Mn	150	200	Сварные детали несложной формы, детали арматуры бензо и маслосистем, не несущие больших нагрузок
МА12	(0,3...0,8)Zr (2,5...3,5)Nb	250	300	Детали, нагревающиеся в процессе эксплуатации
МА14	(5,0...6,0)Zn (0,3...0,9)Zr	150	200	Высоконагруженные детали

### 8.3. Титановые сплавы

Титан обладает высокими механическими свойствами, высокой удельной прочностью при комнатных и криогенных температурах, а также хорошей коррозионной стойкостью. Технический титан маркируется в зависимости от содержания примесей в соответствии с ГОСТ 19807-74 (табл. 8.6).

Механические свойства титана сильно зависят от содержания примесей. Так небольшие количества кислорода, азота и углерода повышают твердость и прочность, но при этом значительно уменьшаются пластичность и коррозионная стойкость, ухудшается свариваемость и штампуемость. Особенно вреден водород, который образует по границам зерен тонкие пластины гидридов, сильно охрупчивающих металл. Для особо ответственных деталей применяют наиболее чистый титан – иодидный, получаемый из четырехиодистого титана методом зонной плавки.

Таблица 8.6.

Химический состав технического титана (основа – титан).

Маркировка	Примеси, % (не более)						
	<i>Fe</i>	<i>Si</i>	<i>C</i>	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>H</i>	прочие
BT1-00	0,12	0,08	0,05	0,10	0,04	0,008	0,1
BT1-0	0,18	0,10	0,07	0,12	0,04	0,010	0,3

Несмотря на высокую температуру плавления, чистый титан не обладает жаропрочностью, поэтому чаще применяются различные сплавы на его основе, обладающие более высокими характеристиками прочности и жаропрочности при сохранении достаточно высокой пластичности и коррозионной стойкости.

Наибольшее применение нашли сплавы на основе титана легированного алюминием, оловом, марганцем, хромом и ванадием.

По технологии изготовления титановые сплавы подразделяются на деформируемые и литейные, которые в свою очередь делятся на упрочняемые и неупрочняемые термической обработкой. Механические свойства некоторых титановых сплавов приведены в табл. 8.7.

#### 8.4. Медь и ее сплавы

Наиболее характерными свойствами чистой меди являются высокие значения электропроводности, теплопроводности и стойкость против атмосферной коррозии. В связи с высокой пластичностью чистая медь хорошо деформируется в горячем и холодном состояниях. В процессе холодной деформации медь наклепывается и упрочняется; восстановление пластичности достигается рекристаллизационным отжигом при 500...600°C в восстановительной атмосфере, так как медь легко окисляется при нагреве.

Таблица 8.7.

Механические свойства титановых сплавов.

Марка	Механические свойства			Вид полуфабриката
	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$KCU$ , кДж/м <sup>2</sup>	
BT5	750...950	10	500	Отливки, профили, поковки
BT5-1	800...1000	10	400	Листы, профили, трубы
OT 4	700...900	11	400	Листы, полосы, ленты
BT6	950...1700	8	400	Поковки, листы, трубы
BT8	1050...1250	11	300	Поковки

Чистая медь применяется для проводников электрического тока, различных теплообменников, водоохлаждаемых изложниц, поддонов, кристаллизаторов.

Чистая медь имеет низкую прочность и жидкотекучесть, плохо обрабатывается резанием, поэтому более широкое применение нашли сплавы на ее основе. При сохранении высоких показателей электро- и теплопроводности коррозионной стойкости сплавы меди обладают хорошими механическими, технологическими и антифрикционными свойствами. Для легирования меди в основном применяют цинк, олово, алюминий, бериллий, кремний, марганец и никель. Повышая прочность сплавов, эти легирующие элементы практически не снижают пластичность, а

цинк, олово, алюминий даже увеличивают ее. Вредными добавками, снижающими механические и технологические свойства меди и ее сплавов, являются висмут, свинец, сера и кислород.

Различают три основные группы на основе меди-латуни (ГОСТ 15527-70), бронзы (ГОСТ 493-79) и медно-никелевые сплавы (ГОСТ 613-79).

### Латуни

Латунями называют медноцинковые сплавы. При дополнительном введении в сплав добавок алюминия, свинца, олова, кремния и других элементов получают специальные латуни.

Практическое применение находят латуни, содержание цинка в которых не превышает 49%. При более высокой концентрации цинка значительно ухудшаются механические свойства сплава.

По структуре различают однофазные и двухфазные латуни. Наибольшей пластичностью обладают однофазные латуни, содержащие 30...32% цинка. При появлении в структуре второй фазы относительное удлинение сплава уменьшается. Так, если для однофазных латуней предел прочности составляет порядка 300 МПа и относительное удлинение 40...45%, то у двухфазных латуней эти показатели изменяются до 350...400 МПа и до 20% соответственно.

Различают деформируемые и литейные латуни. Однофазные латуни хорошо деформируются в холодном состоянии, при этом происходит наклеп. Для восстановления пластичности сплав подвергается рекристаллизационному отжигу при 500...700°C. Двухфазные латуни менее пластичны, и деформируются лишь в нагретом состоянии.

Латуни являются преимущественно деформируемыми сплавами на медной основе и лишь отдельные марки специальных латуней с повышенной твердостью применяются для отливки фасонных деталей.

Латуни маркируют буквой Л, после которой ставят буквы, обозначающие специально введенные элементы и числа, характеризующие

содержание меди и легирующих элементов (кроме цинка). Например Л68 – латунь, содержащая 68%Cu, остальное – цинк. Легирующие элементы, введенные в специальные латуни, имеют обозначения аналогичные обозначению легирующих элементов в алюминиевых сплавах. Например, ЛАЖМц66-6-3-2 (66%Cu, 6%Al, 3%Fe, 2%Mn).

У литейных латуней иногда содержание меди не указывают, например ЛЦ30А3 – латунь литейная, 30%Zn, 3%Al, остальное медь.

Специальные латуни по применению можно подразделить на латуни с высокими антикоррозионными свойствами (ЛКС80-2-2, ЛМцС58-2-2) и латуни повышенной прочности (ЛМцЖ52-4-1 и другие).

Латунные детали при длительном хранении, особенно в коррозионно-активной среде растрескиваются. Для предотвращения этого детали подвергают отжигу для снятия остаточных напряжений при 200...300°C.

### Бронзы

Сплавы меди с оловом, алюминием, кремнием, свинцом, бериллием соответственно называются оловянистыми, алюминиевыми, кремнистыми, свинцовистыми, бериллиевыми бронзами.

Бронзы обозначают двумя буквами «Бр», далее пишут буквенные обозначения входящих в бронзу элементов (кроме меди) и затем идут цифры, показывающие содержание их в сплаве. Например: БрО10 (10%Sn, остальное Cu); БрАЖН10-4-4 (10%Al, 4%Fe, 4%Ni; остальное Cu).

Оловянистые бронзы Бр010, БрОЦС3-11-5, БрОФ10-1 и другие применяются преимущественно в литом виде. По структуре различают однофазные и двухфазные оловянистые бронзы. В оловянистые бронзы для улучшения свойств вводят до 5% свинца (улучшает обрабатываемость резанием и антифрикционные свойства), до 1% фосфора (повышает антифрикционные свойства, износостойкость и жидкотекучесть) и до 11% цинка, который позволяет уменьшить содержание в сплаве дефицитного олова.

Если однофазную оловянистую бронзу подвергнуть диффузионному отжигу (800...850°C), она может подвергаться деформации. Двухфазные оловянистые бронзы применяют лишь в литом виде.

Оловянистые бронзы делятся на деформируемые и литейные. Деформируемые (однофазные) содержат 4...8%Sn, легированы свинцом, цинком, фосфором (БрОФ6,5-0,5; БрОЦС4-4-2,5) они поставляются в виде прутков, труб, лент в нагартованном (наклепанном) или отожженном состоянии и используются для изготовления пружин, мембран, антифрикционных деталей.

Литейные оловянистые бронзы (БрОЦС5-5-5; БрОЦС4-4-17) имеют двухфазную структуру, обладают более высокими антифрикционными свойствами и стойкостью против коррозии.

Безоловянистые бронзы – это сплавы меди со свинцом, алюминием, бериллием, железом, кремнием, хромом и другими элементами. Так свинцовистая бронза БрС30, обладающая высокими антифрикционными свойствами, используется для изготовления вкладышей подшипников, бериллиевая бронза БрБ2 имеет высокие механические свойства ( $\sigma_B=800$ МПа,  $\delta=30\%$ ), теплостойка до 310...340°C, и используется для изготовления упругих элементов точных приборов, деталей, работающих на износ при высоких скоростях, давлениях и температурах.

Области применения и механические свойства некоторых медных сплавов приведены в табл. 8.8.

### **8.5. Сплавы на основе никеля**

Чистый никель имеет низкую длительную прочность ( $\sigma_{100}^{800}=40$ МПа), поэтому применяются сплавы на его основе (нимоники). Повышение жаропрочных свойств, достигается путем комплексного легирования, в результате которого образуются многофазные сплавы. Молибден, вольфрам, кобальт и

хром упрочняют твердый раствор, алюминий, титан, ниобий и тантал помимо упрочнения твердого раствора, образуют вторые фазы, углерод, бор, цирконий в небольших количествах упрочняют границы зерен, образуя сегрегации, церий и другие редкоземельные металлы рафинируют металл от примесей.

Как правило, основной термической обработкой никелевых сплавов являются закалка и старение. Так, например, жаропрочный сплав ХН77ТЮР (20%Cr; 77%Ni; 2,5%Ti; 0,7%Al; 0,01%B) после закалки на воздухе с 1080°C и старения в течение 16 часов при 750°C приобретает  $\sigma_{100}^{750}=850$ МПа и  $\sigma_{0,5/100}^{750}=300$ МПа. В табл. 8.9 приведены примерные области применения и рабочие температуры некоторых жаропрочных никелевых сплавов.

Таблица 8.8.

Области применения и механические свойства медных сплавов.

Сплав	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	Назначение
Латуни			
Деформируемые			
ЛАЖ60-1-1	450	8	Тубы, прутки
ЛЖМц59-1-1	450	10	Полосы, прутки, мелкие поковки
ЛС59-1	400	6	Мелкие поковки
Литейные			
ЛЦ40С	215	12	Втулки, сепараторы
ЛЦ40Мц5Ж	440	10	Винты, лопасти
ЛЦ30А3	300	12	Коррозионно-стойкие детали
Бронзы			
Деформируемые			
БрОФ6,5-0,4	400	5	Арматура
БрОЦ4-3	330	4	Пружины
БрОЦС4-4-2,5	350	2	Антифрикционные детали
Литейные			
БрОЗЦ12С5	200	8	Арматура
БрО5ЦНС5	175	4	Вкладыши подшипников

Br04Ц4С17	150	5	Антифрикционные детали
-----------	-----	---	------------------------

### 8.6. Тугоплавкие металлы и их сплавы

К тугоплавким относят металлы, имеющие температуру плавления выше 2000°С – это ниобий, молибден, тантал и вольфрам, имеющие температуры плавления 2468, 2622 и 3400°С соответственно.

Свойства тугоплавких металлов зависят от способа получения металлов и их чистоты. Вольфрам и молибден охрупчиваются уже при незначительном содержании примесей, среди которых наиболее отрицательное воздействие на пластичность оказывает кислород. Ниобий и тантал более пластичны и технологичны, имеют низкие температуры перехода в хрупкое состояние.

Таблица 8.9.

Назначение и свойства никелевых сплавов (ГОСТ 5632-72\*)

Сплав	Назначение	Рабочая температура, °С	Температура начала образования окалины, °С
ХН70ВМЮТ ХН70ВМТЮ	Лопатки газовых турбин для длительного использования	750 850	1000
ХН80ТБЮ	Лопатки, крепежные детали турбин	700	1000
ХН70МВТЮБ ХН70Ю ХН78Т	Листовые детали, газопроводы, работающие при небольших нагрузках ограниченное время	850 1100 1100	1200 1200 1100
ХН75МБТЮ	Листовые детали турбин, срок службы ограничен	850	1050
ХН77ТЮР	Диски, лопатки	750	1050

	турбин, срок службы ограничен		
ХН60ВТ	Листовые детали турбин с ограниченным сроком службы	1000	1100
ХН62МВКЮ	Лопатки, диски турбин с длительным сроком службы	800	1080

Общим недостатком тугоплавких металлов является низкая жаростойкость, что требует нанесения на их поверхность специальных защитных покрытий или применения их для работы в вакууме или в защитной атмосфере.

Все сплавы на основе тугоплавких металлов подразделяются на две группы в зависимости от способа упрочнения: сплавы со структурой твердого раствора и сплавы, упрочняемые закалкой и старением.

Сплавы первой группы легируют титаном, ниобием, молибденом, вольфрамом танталом и другими элементами, термической обработкой не упрочняются. Сплавы второй группы содержат повышенное содержание углерода и карбидообразующих элементов и упрочняются в процессе старения после закалки за счет выделения карбидов внутри зерен.

Рабочие температуры при длительной работе сплавов на основе ниобия, молибдена, тантала и вольфрама составляют порядка 1300, 1400, 2000 и 2200°C соответственно, при кратковременной эксплуатации рабочие температуры значительно выше.

В табл. 8.10 приведены механические свойства сплавов на основе тугоплавких металлов.

### **8.7. Антифрикционные сплавы**

Такие сплавы предназначены для заливки подшипников скольжения, которые обладают бесшумностью работы и устойчивостью к вибрациям. Они должны иметь низкий коэффициент трения, быть достаточно пластичными и

обеспечивать малую скорость изнашивания сопряженной детали – стального или чугунного вала.

Для высоких антифрикционных свойств материал должен обладать высокой теплопроводностью, хорошей смачиваемостью смазочным материалом, способностью образовывать на поверхности защитные пленки мягкого металла и хорошей прирабатываемостью.

Основными характеристиками для оценки антифрикционного материала служат коэффициент трения, давление, действующее на опору ( $P$ ), скорость скольжения ( $V$ ), а также параметр ( $p_v$ ), определяющий удельную мощность трения. Чем больше значение  $p_v$ , тем выше способность материала снижать температуру нагрева и нагруженность контакта.

Таблица 8.10

Механические свойства сплавов на основе тугоплавких металлов

Сплавы химический состав (%)	При 25°C			При 1200°C		$\sigma_{100}$ , МПа
	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\sigma_B$	$\delta$	
	МПа		%	МПа	%	
Сплавы на основе ниобия						
ВН2А (4,1Mo;0,7Zr;0,08C)	850	620	5	250	—	130(при 1100°C)
ВН4 (9,5Mo;1,5Zr;0,3C)	810	730	16	550	—	280 (при 1100°C)
Сплавы на основе тантала						
Ta-10W	760	650	3,5	400	1,2	140(при 1200°C) 35 (при 1650°C)
Сплавы на основе молибдена						
ВМ1 (0,4Ti; 0,01C)	800	680	10	340	14	90(при 1200°C)
ВМ3 (1,1Ti; 0,5Zr; 0,4C; 1,4Nb)	860	—	0,03	550	12	260 (при 1300°C)
Сплавы на основе вольфрама						
W-27Re	1400	—	4	700	12 (при 1500°C)	42 (при 1600°C)
W-15Mo	—	—	—	175	27(при 1600°C)	—

Металлические материалы для подшипников скольжения по своей структуре подразделяются на две группы: сплавы с мягкой матрицей и твердыми включениями и сплавы с твердой матрицей и мягкими включениями.

К первой группе относятся баббиты (основа олово или свинец), а также бронзы и латуни. Мягкая матрица в них предотвращает усиление трения и обеспечивает хорошую прирабатываемость, а твердые включения, на которые опирается вал, дают высокую износостойкость.

По антифрикционным свойствам баббиты превосходят все остальные сплавы, но уступают им по сопротивлению усталости. В связи с этим баббиты применяют только для тонкого (до 1мм) покрытия рабочей поверхности опоры скольжения. Из-за высокого содержания дорогостоящего олова оловянистые баббиты используют для подшипников ответственного назначения – дизелей, паровых турбин и других подшипников особо нагруженных машин. Сплавы типа Б16 используют для подшипников средней нагруженности, а дешевые свинцово-кальциевые баббиты типа БК2 используют для менее ответственных подшипников.

Особое место среди антифрикционных бронз занимают оловянистые (БрО10Ф1, БрО10Ц2) и оловянисто-цинково-свинцовистые (БрО5Ц5С5, БрО6Ц6С3) бронзы. Эти материалы применяют для монолитных подшипников скольжения турбин, электродвигателей, компрессоров, работающих при высоких давлениях и средних скоростях скольжения.

Латуни используются в качестве заменителей дорогостоящих бронз, однако по антифрикционным свойствам они уступают бронзам.

К сплавам второй группы относятся: свинцовистая бронза (БрС30 - наплавка на стальную ленту), алюминиевые сплавы с оловом (АО9-2 - монометаллические вкладыши). Эти сплавы имеют высокую теплопроводность, что позволяет применять их при больших скоростях скольжения. К сплавам этой группы относятся и серые чугуны. Роль мягкой составляющей в чугунах играет графит.

В табл. 8.11 приведены свойства некоторых антифрикционных материалов.

В авиационной и автомобильной промышленности получили распространение композиционные подшипники (вкладыши): многослойные, самосмазывающиеся, металлофторопластовые и другие.

Многослойные вкладыши состоят из: стального основания (250 мкм); слоя свинцовой бронзы БРС30; тонкого (до 10 мкм) слоя никеля или латуни; тонкого (до 25 мкм) слоя свинцово-оловяного сплава. Стальная подкладка обеспечивает прочность и жесткость вкладыша. Верхний мягкий слой обеспечивает прирабатываемость. После износа верхнего слоя рабочим слоем становится свинцовистая бронза. Никель служит барьером, не допускающим диффузию олова в свинец бронзы. Подшипники используют в двигателестроении в качестве коренных и шатунных вкладышей.

Таблица 8.11

Свойства антифрикционных материалов.

Марка/состав	HB	Коэффициент трения по стали		Допустимый режим работы		
		Без смазки	Со смазкой	P, МПа	V, м/с	P <sub>v</sub> , МПа·м/с
<b>Баббиты</b>						
Б83	300	0,07	0,004	15	50	75
Б16	300	0,09	0,005	10	30	3
БК2	320	0,12	0,006	15	15	6
<b>Бронзы</b>						
Бр О10Ф1	1000	0,1...	0,004...	15	10	15
Бр О5Ц5С5	600	0,12	0,009	8	3	12
<b>Латуни</b>						
ЛЦ16К4	1000	0,15...	0,009...	12	2	10
ЛЦ38Мц2С2	800	0,24	0,016	10,6	1	10
<b>Антифрикционные серые чугуны</b>						
АСЧ-1	2200	0,12...	0,008	2,5	5	10
АСЧ-3	1600	0,23	0,016	6	0,75	45

Самосмазывающиеся подшипники получают методами порошковой металлургии из следующих комбинаций материалов: железо – графит; железо - медь – графит; бронза – графит. Графит вводят в количестве 1...4%.

После спекания в материале сохраняется 15...35% пор, которые заполняются маслом. Масло и графит смазывают трущиеся поверхности. При увеличении трения поры раскрываются и смазки поступает больше (автоматическое регулирование подачи смазки). Подшипники работают при скоростях до 3 м/с, используются в труднодоступных для смазки агрегатах.

### 8.8. Биметаллы

В условиях непрерывного удорожания производства легированной стали, цветных металлов и их сплавов большое значение приобретает применение биметаллов и многослойных покрытий. Биметалл – материал, состоящий из металла – основы и нанесенного на него одно или многослойного покрытия. Биметаллы позволяют не только уменьшить расход дефицитных и дорогостоящих цветных сплавов, но и получить материалы с новыми, уникальными свойствами. Например: при изготовлении отвалов плугов используется трехслойная сталь «сталь 60-сталь 15-сталь 60» - износостойкий материал, позволяющий резко повысить стойкость отвала.

Рекомендации по применению некоторых биметаллов в машиностроении приведены в табл. 8.12.

Таблица 8.12.

Рекомендации по применению биметаллов в сельхозмашиностроении.

Вид материала	Материал	Применение
Сталь листовая трехслойная коррозионно- стойкая	сталь08X18Н10Т-сталь10 (08)-сталь08X18Н10Т	Детали машин для подготовки и внесения в почву удобрений и химзащиты растений.
	Сталь12X18Н10Т-сталь10 (08)-сталь12X18Н10Т	
Сталь листовая трехслойная износостойкая	сталь60-сталь15-сталь60	Рабочие органы почвообрабатывающих машин (лемехи, отвалы, полевые доски), ножи для резки

		сельскохозяйственной продукции, молоточки для молотильных барабанов комбайнов.
Трубы биметаллические	сталь10-бронза БрОФ6,5-0,15	Подшипники скольжения
Полосы биметаллические антифрикционные	сталь08- бронза БрОФ6,5-0,4	Вкладыши коренных и шатунных шеек двигателей комбайнов
Листы рифленые лакированные о дуралюмина	алюминий - дуралюмин Д1-алюминий	Настилы полов сельхозмашин.

### *Контрольные вопросы*

1. Назовите марки алюминиевых литейных конструкционных герметичных сплавов?
2. Назовите области применения магниевых сплавов?
3. Что это за сплавы: ВТ5-1, ОТ-4?
4. Что это за сплавы: ЛАЖМц66-6-3-2; БрОФ10-1?

## ГЛАВА 9. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

К неметаллическим материалам относятся волокнистые материалы (древесина) и полимерные материалы (органические или неорганические): пластмассы, композиционные материалы на неметаллической основе, каучуки и резины, клеи и герметики, лакокрасочные покрытия, стекло, керамика.

### 9.1. Полимеры

Полимерами называют высокомолекулярные вещества, макромолекулы которых состоят из многочисленных звеньев (мономеров) одинаковой структуры. Их молекулярная масса составляет  $10^5 \dots 10^7$ . Следовательно, свойства полимера определяется не только его химическим составом, но и строением и взаимным расположением молекул. Своеобразие свойств полимеров обусловлено структурой их макромолекул. По форме макромолекул, различают полимеры: линейные, разветвленные, плоские ленточные, плоские сетчатые, слоистые и пространственные (рис. 9.1).

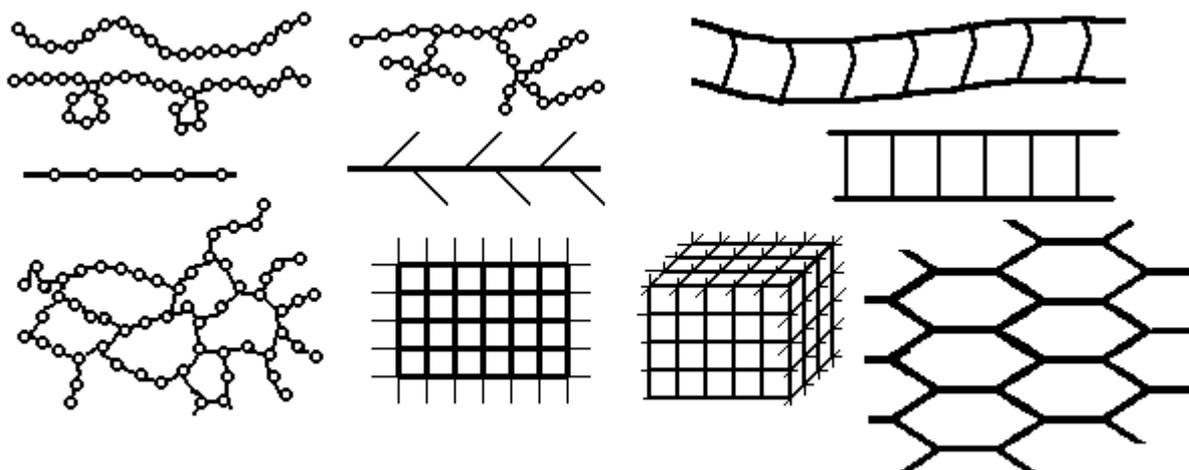


Рис. 9.1. Формы макромолекул.

Гибкие длинные макромолекулы обладают высокой прочностью вдоль цепи и слабыми молекулярными связями, что обеспечивает их эластичность, способность размягчаться при нагреве и затвердевать при охлаждении (полиэтилен, полиамид). Разветвленные молекулы отличаются наличием

боковых ответвлений, что препятствует их плотной упаковке (полиизобутилен ...). Плоские ленточные молекулы состоят из двух цепей, соединенных химическими связями. Они обладают повышенной теплостойкостью и большей жесткостью. Пространственные молекулы образуются при соединении молекул между собой прочными химическими связями. Образуется сетчатая структура с различной плотностью сетки. Молекулы с редкой сеткой (сетчатые) теряют способность растворяться и плавиться, но обладают упругостью (мягкие резины). Густосетчатые молекулы (пространственные) отличаются твердостью и большой теплостойкостью. Эти полимеры лежат в основе конструктивных неметаллических материалов. Аморфные полимеры строятся из цепных молекул, и собраны в пачки. Пачки являются структурными элементами, и могут перемещаться относительно соседних элементов. Некоторые аморфные полимеры состоят из цепных молекул, свернутых в клубки (глобулы). Такая структура дает низкие механические свойства (хрупкое разрушение по границам глобул.). При повышении температуры, глобулы могут разворачиваться, что повышает механические свойства. Квази кристаллические полимеры (квази – как бы) образуются только из достаточно гибких макромолекул с регулярной структурой. В этом случае возможно образование пространственных решеток внутри пачки. Гибкие пачки складываются в ленты, многократно поворачиваются на  $180^\circ$  и образуют пластины (рис. 9.2, а). Пластины, наслаиваясь, друг на друга, образуют правильные кристаллы. При затруднении наслаивания образуются сферолиты (рис. 9.2, б), состоящие из лучей, чередованием кристаллических и аморфных зон. Кристаллические участки состоят из микрофибрилл (рис. 9.2, в).

По отношению к нагреву, полимеры разделяются на термопластичные и термостойкие. Термопластичные полимеры имеют линейную или разветвленную структуру молекул. При нагреве они размягчаются, могут плавиться, при охлаждении затвердевают. Этот процесс обратим.

Термореактивные полимеры в начальной стадии образования имеют линейную структуру. При нагреве они размягчаются. Далее образуется пространственная структура, полимер получает термостабильное твердое состояние.

Особенности строения полимеров определяют их свойства. Высокая молекулярная масса, приводит к невозможности перехода в газообразное состояние или образованию низковязких жидкостей. Термостабильные полимеры – не размягчаются. Полимеры могут находиться в трех стабильных состояниях: стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем.

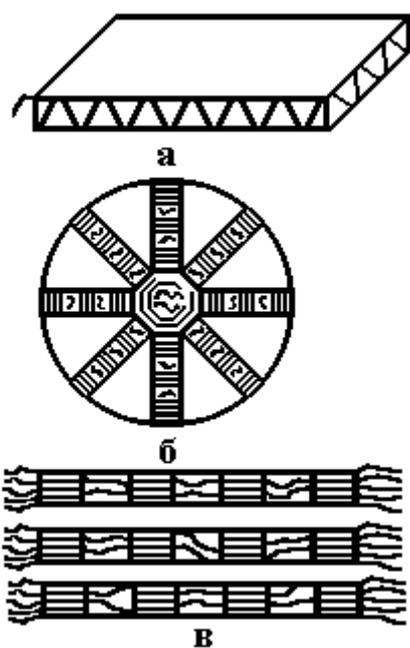


Рис. 9.2. Структура квази кристаллических полимеров:

а – единичный пластинчатый кристалл; б – сферолит; в – микрофибрила.

Стеклообразное – твердое аморфное состояние, движения звеньев и перемещения макромолекул нет. Высокоэластическое состояние

характеризуется способностью материала к большим обратимым изменениям формы под действием незначительных нагрузок. Вязкотекучее состояние напоминает жидкое состояние с большой вязкостью.

Полимеры обладают одним неприятным свойством – они стареют (самопроизвольно и необратимо изменяются их важнейшие механические свойства) под воздействием света, кислорода (озона), влажности, теплоты, длительного хранения. Процессы старения ускоряются под воздействием механических напряжений. Сущность старения заключена в сложной цепной реакции с образованием свободных радикалов (реже ионов) сопровождаемой

деструктуризацией. Наиболее устойчивы к воздействию высоких атмосферных температур и влаги полиэтилен, политетрафторэтилен, полиамидные волокна. Для замедления старения, в полимеры добавляют стабилизаторы (органические вещества, антиоксиданты). Например: срок службы полиэтилена, стабилизированного сажей увеличивается до 5 лет; поливинилхлорид имеет срок службы до 25 лет.

### Пластмассы

Пластмассы – многокомпонентные искусственные материалы. Обязательным компонентом является связка. В качестве связки используются:

синтетические смолы; эфиры, целлюлоза. Некоторые пластмассы состоят только из одной связки (полиэтилен, фторопласты, органическое стекло).

Вторым компонентом является наполнитель (порошкообразные, волокнистые, сетчатые вещества органического или неорганического происхождения). Наполнители повышают механические свойства, снижают усадку при прессовании полуфабриката, придают материалу необходимые свойства. Для повышения эластичности и облегчения обработки в пластмассу добавляют пластификаторы (олеиновая кислота, стеарин, дибутилфторат ...). Исходная композиция может содержать: отвердители (амины); катализаторы (перекиси) процесса отверждения; красители.

Основой классификации пластмасс служит химический состав полимера: фенолоформальдегидные (фенопласты); эпоксидные; полиамидные; полиуретановые; стирольные и другие.

По характеру связующего вещества, различают термопластичные (термопласты) и терморезистивные пластмассы. Термопласты получают на основе термопластичных полимеров. Они удобны для переработки (при нагревании пластифицируются), имеют низкую объемную усадку (не более 4%), отличаются большой упругостью, малой хрупкостью. Терморезистивные пластмассы после отверждения и перехода в термостабильное состояние

отличаются хрупкостью, могут дать усадку до 15%. Поэтому в состав этих пластмасс вводят усиливающие наполнители.

По виду наполнителя, различают пластмассы: порошковые (карболиты) - с наполнителем в виде древесной муки, графита, талька ... Волокнистые – с наполнителем из: очесов хлопка и льна (волокниты); стеклянных нитей (стекловолокниты); асбеста (асбоволокниты). Слоистые – с листовым наполнителем: бумажные листы (гетинакс); хлопчатобумажные ткани, стеклоткани, асбестовые ткани (текстолит, стеклотекстолит, асботекстолит). Газонаполненные – с воздушным наполнителем (пенопласты, поропласты). Особенности пластмасс являются: малая плотность; низкая теплопроводность; большое тепловое расширение; хорошие электроизоляционные свойства; высокая химическая стойкость; хорошие технологические свойства.

Методы переработки пластмасс определяются их свойствами. Основными методами являются: экструзия, литье, литьевое прессование, вакуумное и пневматическое формование, вальцевание, вспенивание, сварка, горячее напыление, строгание в листы, обработка на станках со снятием стружки. Экструзия заключается в выдавливании расплава через калиброванное отверстие мундштука. Сечение отверстия определяет поперечную форму изделия. Данным методом получают стержни различного профиля, трубы, листы, пленки. Прессование заключается в формообразовании изделия в закрытой полости (ручье) специального инструмента – штампа (пресс - формы). Различают горячее и холодное прессование. При горячем прессовании, нагретую композицию (гранулы, ткани, пропитанные смолой) помещают в нагретую пресс – форму. При смыкании половинок пресс - формы композиция заполняет всю полость ручья. Изделие выдерживают в пресс – форме до отвердения. Подогрев композиции и пресс - формы производят токами высокой частоты, паром, перегретой водой ... Данным методом перерабатывают композиции на основе фенолоальдегидных смол, аминопласты и армированные полиэфирные пластики. Способ применяется

для получения корпусных и мелких деталей. При холодном прессовании композицию не нагревают. Прессование производят при давлении 14...120 МПа. После прессования заготовку нагревают до 80...260°. Данным способом перерабатывают асфальтопечковые пластмассы и композиции на основе фенолоальдегидных смол. Способ применяется для получения неглубоких корпусных деталей. При литьевом прессовании, композицию в расплавленном состоянии выдавливают в ручей пресс – формы, затем выдерживают до затвердевания. Способ позволяет получать сложные изделия (наличие ребер, резьбы, выступов, выемок ...) из терморезистивных смол и высоковязких термопластов. При под давлением, композицию в расплавленном состоянии выдавливают в ручей пресс – формы, затем выдерживают под давлением до затвердевания. Способ позволяет получать еще более сложные по форме изделия (наличие ребер, резьбы, выступов, выемок ...) из терморезистивных смол и высоковязких термопластов. Методом штамповки перерабатываются листовые материалы из термопластов (полистирол, полиамиды, фторопласты ...). Формообразование изделий способом направленной вытяжки производится силовым воздействием на нагретый лист установленный между пуансоном и матрицей. При формообразовании способом свободной вытяжки пуансон отсутствует, а лист прижимается к матрице или воздействием на наружную сторону листа избыточным давлением или воздействием на внутреннюю сторону листа разряжением. Вспенивание применяется для получения ячеистых конструкций малой объемной массы. Для вспенивания применяют фенолоальдегидные мочевиноальдегидные смолы, полистирол, поливинилхлорид, ацетат целлюлозы и каучуки. Метод заключается в ведении в пластик газов (газообразующих наполнителей). Метод применяется для изделий, требующих хорошие тепло - звуко - и шумоизоляционные свойства. Сварка применяется для получения неразъемных соединений изделия из термопластов. Для сварки применяют горячий воздух (250...300°). Поверхности зачищают, выравнивают,

обезжиривают и прижимают друг к другу под давлением 200...300 КПа. За счет взаимной диффузии происходит переплетение макромолекул. Полимеры часто используются для нанесения покрытий на металл, дерево, бумагу, пластмассу с целью защиты от коррозии, эрозии и для украшений. Возможно нанесение на обрабатываемую поверхность жидкой композиции, которая высыхает при испарении растворителя. Часто, покрытия наносят способом горячего распыления пластика прошедшего через воздушно - ацетиленовое пламя. Механическая обработка пластмасс, в основном, применяется для удаления литниковой системы, облоя, заусенцев, получения фасок и отверстий.

Рекомендации по применению некоторых пластмасс в машиностроении приведены в **табл. 9.1**.

## ***9.2. Резиновые материалы***

Резина – продукт специальной обработки (вулканизации) каучука. От других материалов, резина отличается высокой эластичностью (относительное удлинение до 1000%).

Основой любой резины служит каучук натуральный (НК) или синтетический (СК). Для улучшения свойств каучуков, в резину вносят специальные добавки: Вулканизирующие вещества - участвуют в образовании пространственно – сетчатой структуры вулканизата. Обычно применяют серу или селен. Ускорители процесса вулканизации: полисульфиды, оксиды свинца или магния. Противостарители (антиоксиданты) замедляют процесс старения резины. Противостарители химического действия замедляют окисление каучука. Физические Противостарители (парафин, воск ...) образуют на внешней части изделия защитные пленки. Мягчители (пластификаторы) облегчают переработку резиновой смеси, увеличивают эластичность каучука, повышают морозостойкость резины. Обычно применяют парафин, вазелин, стеариновую кислоту, битумы ...

Таблица 9.1

### Области применения и способы переработки пластмасс.

Пластмасса	Применение	Переработка
Полиэтилен низкой плотности ПЭНП (высокого давления)	Пленки, трубы, изделия, работающие при обычных температурах.	Литье под давлением, экструзия, пневмо-вакуум-формирование, прессование, спекание, сварка.
Полиэтилен высокой плотности ПЭВП (низкого давления)	Пленки, трубы, антифрикционные и защитные покрытия	Литье под давлением, экструзия, вакуум-формирование, прессование, спекание, сварка.
Блок-сополимеры пропилена с этиленом БСПЭ	Трубы, фитинги, корпусные детали, панели	Литье под давлением, экструзия, прессование.
Полистирол (АБС – пластики)	Тара, крупногабаритные корпусные детали.	Литье под давлением, экструзия, прессование.
Полиметилметакрилат ПММА	Остекление кабин, герметики.	Литье под давлением, экструзия, прессование, сварка, склеивание.
Фторопласты	Детали антифрикционного назначения, прокладочные материалы.	Прессование, экструзия, литье под давлением.
Полиамиды ПА66, 6, 610, 612, 11, 12	Детали, работающие под нагрузкой, корпуса, гибкие детали.	Литье под давлением, экструзия.
Полиформальдегид ПФ, СФ	Шестерни, втулки, антифрикционные детали.	Литье под давлением, сварка, склеивание

По воздействию на каучук, различают: инертные (мел, тальк ...) и активные наполнители. Инертные наполнители вводятся для удешевления резины. Активные наполнители (углеродистая сажа, оксид цинка ...) улучшают механические свойства резины. Регенерат – продукт переработки старых резиновых изделий и отходов резинового производства. Кроме снижения стоимости резины, регенерат снижает склонность резины к старению. Антипирены – снижают воспламеняемость и горючесть резины. Фунгициды – защищают резину от воздействия микроорганизмов, особенно в условиях

тропиков. Дезодоранты – подавляют неприятный запах резины. Красители и пигменты вводят для окраски резины.

Большинство каучуков – неопределенные высокомолекулярные соединения с линейной или слабоветвистой структурой. Наличие в молекулах неопределенных связей позволяет переводить макромолекулы в стабильное состояние. Для этого, в местах двойной связи присоединяют двухвалентную серу, получая пространственную сетчатую структуру (вулканизация). В зависимости от вводимой серы получают сетку с разной величиной ячейки. При 1...5% серы – получают мелкоячеистую структуру и резина получается высокоэластичной. С увеличением концентрации серы, резина становится менее эластичной, повышается ее твердость. При 30% серы – получают твердый материал (эбонит).

### ***9.3. Клеи и герметики***

Клеи герметики относятся к пленкообразующим материалам. Клеи применяются для склеивания различных материалов. Герметики – обеспечивают уплотнение и герметизацию швов, стыков и т.д. В состав этих материалов входят: Пленкообразующие вещества (термореактивные смолы, каучук ...). Растворители (спирты, бензин ...). Пластификаторы, для устранения усадочных явлений при склеивании, и для повышения эластичности пленки. Отвердители и катализаторы, для перевода пленкообразующего вещества в термостабильное состояние. Наполнители, для повышения прочности и других характеристик клеевого слоя.

Клеевые соединения, по сравнению с другими видами соединений, позволяют: соединять различные материалы в различных сочетаниях; более стойки к коррозии; более технологичны при ремонте изделий; позволяют соединять тонкие изделия и т.д. Органическая природа многих клеев определяет их низкую длительную теплостойкость (до 350°C). Клеи на основе кремнийорганических и неорганических полимеров имеют повышенную теплостойкость (до 1000°C).

Клеи классифицирую по ряду признаков. По пленкообразующему веществу различают клеи смоляные и резиновые. По адгезионным свойствам, различают клеи универсальные и специальные. По отношению к нагреву, различают клеи обратимые (термопластичные) и необратимые (термостабильные). По условия отверждения, различаю клеи горячего или холодного склеивания. По внешнему виду, различают жидкие, пастообразные и пленочные клеи. По назначению, различают конструкционные силовые и не силовые клеи.

Смоляные клеи изготавливают на основе термореактивных смол, которые отверждаются в присутствии катализатора и отвердителей. Клеи холодного склеивания, как правило, обладают малой прочностью. Клеи горячего склеивания, за счет более полного отверждения, имеют высокую прочность и теплостойкость. Рассмотрим основные виды клеев.

Клеи на основе модифицированных фенолформальдегидных смол применяют для склеивания металлических силовых элементов, деталей из стеклопластика и т.д. Фенолкаучуковые клеи имеют высокую адгезию к металлам, достаточно эластичны и теплостойки, водостойки, обеспечивают прочное соединение при неравномерном отрыве. Выпускаются марки: ВК-32-200; ВК-3; ВК-4; ВК-13. Фенол кремнийорганические клеи содержат в качестве наполнителя асбест, алюминиевый порошок. Клеи термостойки, водостойки, обладают высокой длительной прочностью. Выпускаются марки: ВК-18, ВК-18М (теплостойкость до 600°C). Клеи на основе эпоксидных смол затвердевают только в присутствии отвердителя (соотношение «смола: отвердитель» = 10: 1 ... 10: 3). Они являются силовыми конструктивными клеями, обладают: высокой прочностью пленки, хорошей адгезией к металлам, водостойки, маслобензостойки, но имеют низкий предел прочности на изгиб и низкую теплостойкость. При увеличении добавки отвердителя, уменьшается время отверждения (от 24 до 1 часа). Для повышения изгибной прочности, в композицию добавляют пластификатор и волокнистые наполнители. К клеям холодного отвердевания

относят композиции с маркировкой «ЭД», а также марки Л-4, ВК-9, КЛН-1, ЭПО. К клеям горячего затвердевания относят: ВК-32ЭМ, К-153, ФЛ-4С. Эпоксидно-кремниевые композиции ТКМ-75, Т-73 применяются для приклеивания режущей части инструментов. Клей УП-5-207М обладает высокой влагостойкостью, стоек к смене температур, вибрациям и старению. Клеи полиуретановые холодного и горячего отверждения. В состав композиции входят полиэферы, полиизоцианаты и цементный наполнитель. При смешивании компонентов происходит химическая реакция, в результате которой клей затвердевает. Клеи обладают: универсальной адгезией, хорошей вибростойкостью, прочностью, маслбензостойкостью. Выпускаются композиции: ПУ-2, ВК-5, ВК-11. Эти клеи высокотоксичны. Клеи на основе кремнийорганических соединений обладают высокой теплостойкостью, маслбензостойки, не вызывают коррозию черных сплавов. Применяются для склеивания легированных сталей, титановых сплавов, неорганических материалов, стеклопластиков и асбопластиков. Выпускаются композиции: ВК-2, ВК-8, ВК-15. Резиновые клеи предназначены для склеивания резины с резиной, резины с металлами (стеклом). Они представляют собой растворы каучуков или резиновых смесей в органических растворителях. Многие из них требуют горячей вулканизации (140...150°C). Для увеличения адгезии, в состав композиции вводят синтетические смолы (Клей 88НП). Для повышения хладостойкости и теплостойкости (от -60°C до +300°C), в композицию вводят кремнийорганические смолы (КТ-15, КТ-30, МАС-1В). Неорганические клеи - это высокотемпературные клеи. Клеи выпускаются в виде: концентрированных водных растворов; твердых порошков (после нанесения композиции, заготовки нагревают, композиция плавится, потом затвердевает); дисперсных растворов. Фосфатные клеи – раствор фосфатов с инертным или активным наполнителем. Выпускаются композиции: АХФС, АФС. АФХС (алюмохромофосфатная связка) – температура отверждения 20-250°C;  $\sigma_B$  3-10МПа;  $\tau_{сдвига}$  0,9-1,4 МПа; огнеупорность 1000...1800°C; водо-

кислотостоек. Применяется для склеивания различных металлов. АФС (алюмофосфатная связка, наполнитель –  $ZrO_2 + Ti$ );  $\sigma_{сж}$  до 250 МПа.

#### ***9.4. Лакокрасочные материалы***

Лакокрасочные материалы (ЛКМ) применяются с целью нанесения на наружные поверхности деталей защитных или декоративных покрытий. Качественные покрытия наносятся на предварительно обработанные поверхности: шлифовка поверхности до получения шероховатости не более  $R_z 0,6 \dots 1,2$  мкм, удаление с поверхности жировых, масляных и окисных пленок, нанесение на поверхности специальных грунтовок. Различают лакокрасочные материалы: прозрачные (лак); кроющие (эмаль) и подготовительные (грунтовка).

Лаки состоят из природной или синтетической основы, пластификаторов и красителей. Эмали выполняются на природной или синтетической основе с добавками: пластификаторов; красителей; пленкообразователей; антипенных, диспергирующих, кроющих и т.д. добавок.

Покрытия наносятся кистью, распылением, окунанием и др. способами.

В машиностроении применяются ЛКМ на канифольной (КФ), битумной (БТ), глифталевой (ГФ), пентафталевой (ПФ), алкидно-стирольной (МС), эпоксидной (ЭП), алкидно-уретановой (УР), кремнийорганической (КО) и полимерной (ХВ, ХС, АС, ВЛ...) основах.

#### ***9.5. Прокладочные материалы***

Прокладочные материалы применяются для герметизации соединений корпусных или иных деталей (особенно при высоких давлениях и температурах внутри герметизируемой полости), для теплоизоляции и электроизоляции разъемных частей.

В качестве прокладочных материалов используют естественные, синтетические или композиционные материалы.

Естественные материалы – кора пробкового дерева, асбест, войлок и отоженная медь. Кора пробкового дерева применяется при небольших

давлениях и температура. Основное ее достоинство – маслобензостойкость. Но кора пробкового дерева – дефицитный материал, поэтому применение ее, ограничено. Часто применяют пробковую крошку связанную синтетическим клеящим составом. Асбест обладает прочностью, эластичностью, диэлектрическими свойствами, устойчив при температуре до 1500°. Войлок – плотный шерстяной материал. Войлочные прокладки предотвращают попадание в соединения посторонних веществ, задерживают смазочные масла, смягчают удары и вибрации, являются хорошим шумоизолятором. Красную отожженную медь применяют при высоких температурах и давлениях.

Синтетические материалы – маслобензостойкая резина, различные пластмассы. Эти материалы, обычно хорошие диэлектрики, но имеют низкую морозостойкость, теплостойкость, малый срок службы. Применяются в неответственных соединениях или, как матрица композиционных материалах.

Композиционные – целлюлозосодержащие материалы или композиция: синтетический материал – упрочнитель. целлюлозосодержащие материалы (бумага, плотный картон) применяются в качестве тонких прокладок в узлах, не подвергаемых воздействию влаги. Из бумаги, обработанной хлористым цинком, касторовым маслом и глицерином получают фибру. Фибра – прочный и долговечный диэлектрик стойкий к маслу и воде. Из композиционных материалов чаще всего применяют композиции на основе маслобензостойкой резины. В качестве наполнителя используется: распушенный асбест, графитный порошок, стальная фольга, стальная проволока или их сочетание. Композиционные прокладочные материалы наиболее универсальны, относительно дешевы, имеют большую долговечность.

### ***Контрольные вопросы***

1. Что такое полимер;

2. Назовите конструктивные особенности пластмасс.
3. Что такое «старение» пластмасс?
4. Назовите основные методы переработки пластмасс.
5. Что является основой резины?
6. Зачем нужна вулканизация резины?
7. Что такое неорганические клеи?
8. Что такое естественные прокладочные материалы?
9. Что такое композиционные прокладочные материалы?

## ***ГЛАВА 10. КОМПОЗИЦИОННЫЕ И ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ***

Современное машиностроение немислимо без применения материалов нового поколения: композиционных и порошковых.

Композиционными называют сложные материалы, в состав которых входят компоненты, сильно отличающиеся по свойствам обычно не растворимые друг в друге. Эти компоненты разделены в материале ярко выраженной границей.

Свойства композиционных материалов (КМ) в основном зависят от физико-механических свойств компонентов и от прочности связи между ними.

Основа КМ (матрица) – металл или сплав (КМ с металлической матрицей) или полимер, углеродистые или полимерные материалы (КМ с не металлической матрицей). Матрица связывает композицию, придает ей форму. От свойств матрицы зависят технологические режимы получения КМ и такие характеристики, как: рабочая температура, сопротивление усталостному разрушению, сопротивление воздействию среды, плотность КМ, удельная прочность.

В матрице равномерно распределены остальные компоненты (наполнители или армирующие элементы). Армирующие элементы могут изменить прочностные или иные характеристики КМ. Свойства КМ зависят также от схемы армирования: форма, размеры и характер распределения наполнителя.

Порошковыми называют материалы представляющие собой металлический порошок (железный, из цветных металлов, возможно с добавкой графита или других примесей), спрессованный под высоким давлением и подвергнутый спеканию.

### ***10.1. Композиционные материалы с металлической матрице***

В качестве матрицы часто применяют цветные металлы (алюминий, магний, никель) или их сплавы. Наполнитель может быть зернистым (рис. 10.1, а) или волокнистым (рис. 10.1, б). Укладка волокон наполнителя может быть: слоистой непрерывной, тканевой (рис. 10.1, в); или объемной (рис. 10.1, г).

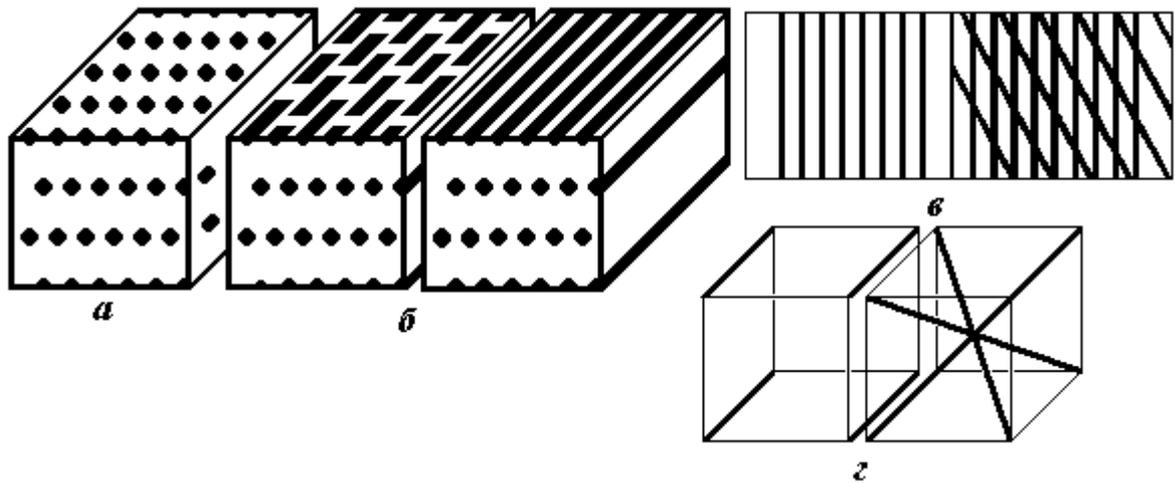


Рис. 10.1. Структура КМ с металлической матрицей: а – зернистые, б – волокнистые; в – с непрерывной укладкой волокон; г – с объемной укладкой волокон.

### Волокнистые композиционные материалы

В волокнистых композиционных материалах (КМВ) наполнитель является упрочнителем. По механизму армирующего действия различают волокнистые композиционные материалы: дискретные, с отношением длины волокна к его диаметру  $(L/d) = 10 \dots 10^3$  и с непрерывным волокном  $L/d \rightarrow \infty$ . Дискретные волокна расположены в матрице хаотично. Чем больше соотношение  $L/d$ , тем выше степень упрочнения.

От обычных сплавов, КМВ отличается высокими прочностными показателями, пониженной склонностью к трещинообразованию и высокой удельной прочностью. Прочность КМВ определяется свойствам волокон, матрица должна скреплять волокна и распределять напряжения между ними. При этом механические свойства КМВ вдоль волокон значительно выше, чем поперек волокон (рис. 10.2). КМВ малопластичны. Однако скорость распространения трещин в КМВ мала и практически исключается внезапное их хрупкое разрушение. Особенностью КМВ является малая скорость их разупрочнения во времени. Основным недостатком КМВ является низкое сопротивление межслойному сдвигу. Это сопротивление значительно возрастает у КМВ с объемной укладкой.



Рис. 10.2. Механические свойства КМВ.

Для алюминиевых и магниевых КМВ применяют волокна: борные ( $\sigma_B = 2500 \dots 3500$  Мпа,  $E = 38 \dots 420$  ГПа); углеродные ( $\sigma_B = 1400 \dots 3500$  Мпа,  $E = 160 \dots 450$  ГПа); из карбидов кремния ( $\sigma_B = 2500 \dots 3500$  Мпа,  $E = 450$  ГПа); карбидов, нитридов и оксидов тугоплавких металлов; высокопрочную сталь. Для армирования титана и его сплавов применяют молибденовую проволоку, волокна сапфира, карбида кремния, борида титана. Для жаропрочных никелевых КМВ применяют волокна из вольфрамовой или молибденовой проволоки. Свойства некоторых КМВ приведены в табл. 10.1.

Таблица 10.1.

Механические свойства КМВ.

КМВ	$\sigma_B$	$\sigma_{-1}$	E Гпа	$\sigma_B/\gamma$	E/ $\gamma$
	МПа				
Никель – вольфрам (ВКН -1)	700	150	-	-	-
Алюминий – углерод (ВКУ-1)	900	300	220	450	100
Бор – алюминий (ВКА-1А)	1300	600	220	500	84,5
Бор – магний (ВКМ -1)	1300	500	220	590	100
Алюминий – сталь (КАС -1А)	1700	350	110	370	24,5

*Дисперсно-упрочненные композиционные материалы*

В отличие от КМВ в дисперсно-упрочненных композиционных материалах (КМД) матрица является основным материалом, несущим нагрузку.

Дисперсные частички (наполнитель) тормозят движение дислокаций в матрице. Наиболее оптимальным являются: размер частичек 10...50 нм; расстояние между ними – 100...500 нм, при равномерном их распределении.

КМД можно получить на основе практически всех применяемых в технике металлов и сплавов.

Наиболее широко применяются КМД на основе алюминия – САП (спеченный алюминиевый порошок). В САП, матрицей является алюминий, наполнителем – мелкие частички окиси алюминия  $Al_2O_3$  (6...18%). С увеличением содержания  $Al_2O_3$  повышается предел прочности на растяжение и уменьшается относительное удлинение.

В качестве жаропрочных, применяются КМД с матрицей на основе никеля и наполнителем (2...3%) из двуокиси тория или двуокиси гафния. Обычно, матрица этих КМД –  $\gamma$ -раствор  $Ni + 20\% Cr$ , или  $Ni + 15\% Mo$ , или  $Ni + 20\% (Mo+Cr)$ . Например, композиционные материалы: ВДУ-1 (никель, упрочненный двуокисью кремния); ВДУ-2 (никель, упрочненный двуокисью гафния); ВД-3 (матрица -  $Ni + 20\% Cr$ ; упрочнение – окись тория). Область применения композиционных материалов не ограничена. Они применяются при необходимости сочетания высокой удельной прочности с высокой жесткостью; с пониженной склонностью к трещинообразованию или с высокой жаропрочностью. Например: элементы жесткости, панели в автомобилестроении или в сельхозмашиностроении; для облегчения кузовов, рессор, бамперов ...

### ***10.2. Композиционные материалы с неметаллической матрицей***

В качестве матрицы у этих КМ часто применяют полимерные (эпоксидная, фенолоформальдегидная, полиамидная и др.), углеродные и керамические материалы. Упрочнителями служат волокна: стеклянные, углеродные, борные, органические, на основе нитевидных кристаллов (оксиды, бориды, карбиды, нитриды), металлическая проволока.

Свойства КМ зависят от состава композиции, сочетания компонентов, прочности связей между ними. Свойства матрицы определяют, в основном, прочность композита на сдвиг и сжатие, сопротивление усталостному

износу. Свойства упрочнителя определяют, в основном, прочность и жесткость материала.

В слоистых материалах волокна, нити, ленты, пропитанные связующим, укладывают параллельно друг другу. Полученные слои собираются в пластины. При параллельной укладке свойства композита получаются анизотропными. При укладке волокон под углом друг к другу можно получить материалы с изотропными свойствами. Рассмотрим некоторые наиболее применяемые композиты.

Карбоволокниты (углепласты) представляют собой композиции, состоящие из полимерной матрицы и упрочнителя в виде углеродных волокон (карбоволокон). В качестве матрицы применяются: полимеры (полимерные карбоволокниты); синтетические полимеры, подвергнутые пиролизу (коксованные карбоволокниты); пиролитический углерод (пироуглеродные карбоволокниты). Для удешевления производства, в композит добавляют стекловолокно (карбостекловолокниты).

Карбоволокниты отличаются высоким статическим и динамическим сопротивлением усталости, могут работать в широком диапазоне положительных и отрицательных температур. Материал используется в кузовостроении, при изготовлении панелей, подшипников и т.п. В бороноволокнитах в качестве упрочнителя применяют борные волокна.

Материал отличается высокой прочностью при сжатии, сдвиге, срезе, низкой ползучестью, высокой твердостью. Изделия из бороноволокнитов применяются в авиастроении. Органоволокниты представляют собой композицию из синтетической матрицы и синтетических волокон. Механические параметры компонентов близки, поэтому происходит взаимная диффузия компонентов и возможны химические реакции между ними. Поэтому, материалы имеют стабильные во времени механические свойства, хорошо работают при повышенной влажности и повышенных климатических температурах.

Композиты применяются как корпусной материал машин, работающих в тропическом и субтропическом климате.

### **10.3. Конструкционные порошковые материалы**

Порошковые материалы (ПМ) изготавливают путем прессования металлических порошков в изделия необходимой формы и размеров с последующим спеканием в вакууме или в защитной атмосфере при температуре  $0,75 \dots 0,8 T_{пл}$ .

Различают пористые и компактные ПМ.

Пористые ПМ, после окончательной обработки сохраняют 10...30% остаточной пористости. В основном они используются для изготовления антифрикционных деталей (подшипники, вкладыши, втулки) и фильтров. Антифрикционные детали могут работать без дополнительной смазки (за счет «выпотевания» масла или графита находящегося в порах), легко прирабатываются, выдерживают значительные нагрузки, обладают хорошей износостойкостью. Антифрикционные детали изготавливают их железографита (1...7% графита) или из бронзографита (8...10% Sn и 2...4% графита).

Металлическая основа железографитных материалов имеет перлитную структуру, что обеспечивает хорошую износостойкость при высоких скоростях и нагрузках. Для улучшения прирабатываемости добавляют 0,8...1,0% серы или 3,5...4,0% сульфидов.

ПМ на основе железа и меди используют в фрикционных изделиях (тормозные диски, накладки). Фрикционные изделия должны иметь высокий коэффициент трения, высокую прочность, большую износостойкость. Для повышения коэффициента трения в ПМ вводят карбиды кремния, бора, тугоплавкие оксиды. Твердым смазочным компонентом служит графит или свинец. Коэффициент трения у МП на основе: железа – 0,18...0,4 (сплав ФМК11); меди - 0,17...0,25 (сплав МК5).

ПМ широко применяют для изготовления фильтрующих элементов. Фильтры на основе никеля, железа, титана, алюминия, коррозионно-стойкой стали с пористостью 45...50% и размером пор 2...20 мкм используют для очистки жидкостей и газов.

Компактные ПМ (пористость 1...3%) получают из порошков углеродистой и легированной стали; бронз, латуни, титановых и алюминиевых сплавов. В маркировке ПМ из стали добавляют букву С – сталь и букву П – порошковая; в конце маркировки указывают плотность стали в %. Например: СП10-1(сталь порошковая 10, плотность 1%); СП45Х3-2 (сталь порошковая, 0.45% С, 3% Cr, плотность 2%). Механические свойства порошковых сталей зависят от плотности. При плотности более 3% повышается порог хладноломкости, но понижаются  $\sigma_B$  и  $KCU$ . Поэтому порошковая сталь рекомендуется для изготовления сложных, относительно небольших деталей несущих малую нагрузку.

### ***Контрольные вопросы***

1. От каких факторов зависят свойства композиционных материалов?
2. Что такое матрица композиционного материала?
3. Как располагается наполнитель в волокнистых КМ?
4. Что такое слоистые КМ?
5. Что такое порошковые материалы?

## ***Часть 2. ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ***

Технология конструкционных материалов (ТКМ) – это комплексная наука о современном производстве, свойствах и способах обработки материалов, применяемых для изготовления различных деталей машин и механизмов, зданий и сооружений, приборов и других технических объектов. Каждая отрасль производства имеет свою специфику, свои особенности, однако все отрасли машиностроения базируются практически на общей технологии. ТКМ является комплексной дисциплиной, содержащей совокупность современных знаний о способах получения металлов и методов их физико - химической переработки с целью придания им необходимых свойств и конфигурации, что и определяет содержание курса «ТКМ», который включает следующие разделы: «Металлургия черных и цветных металлов», «Литейное производство», «Обработка давлением», «Сварка», «Обработка резанием», «Неметаллические материалы», «Композиционные материалы».

### ***ГЛАВА 11. МЕТАЛЛУРГИЯ***

Металлургия – это - важнейшая отрасль промышленности и наука о получении металлов из руд. В природе в чистом виде встречаются лишь немногие металлы, например, золото, серебро, платина, ртуть и др. Основная же масса металлов содержится в земной коре в виде соединений с другими химическими элементами и задачей металлургов является выделение металлов из этих соединений.

Особую роль в современном производстве играют черные металлы, на долю которых в мировом производстве металлов приходится более 90%, а объем их производства является одним из основных показателей уровня промышленного развития страны.

#### ***11.1. Материалы для производства металлов и сплавов***

Для осуществления металлургических процессов необходимы руда, флюсы, топливо и огнеупорные материалы.

Руда – горная порода, из которой технически возможно и экономически целесообразно в данных конкретных условиях извлекать металлы и их соединения. Руды могут быть простыми, т.е. содержащими один металл, или полиметаллическими, содержащими несколько металлов. Помимо соединений, содержащих металл, в руде имеется еще и пустая порода, которая не содержит извлекаемых металлов или их соединений. Руды с большим содержанием пустой породы называют бедными. Использование бедных руд ведет к большим непроизводительным расходам топлива и электрической энергии, снижает производительность и увеличивает объем плавильного устройства и соответственно его стоимость. Бедные руды подвергают обогащению, т.е. удалению из руды части пустой породы, что приводит к получению концентрата с повышенным содержанием ценного компонента.

Флюсы – это материалы, загружаемые в плавильную печь, для взаимодействия с пустой породой и золой с образованием легкоплавкого соединения - шлака, который, как правило, должен иметь значительно меньшую плотность, меньшую температуру плавления, чем у извлекаемого металла (или его соединения) и высокую жидкотекучесть. Такой шлак располагается в плавильных печах на поверхности жидкого металла и отделяется от него в процессе плавки тем или иным способом. Во время плавки шлак служит для защиты расплавленного металла от контакта его поверхности с печными газами и воздухом и для удаления вредных примесей. По химическому составу флюсы делятся на основные и кислые. К основным флюсам относятся известняк  $CaCO_3$  и доломит  $CaCO_3 + MgCO_3$ . К кислым относятся породы, содержащие кремнезем. Выбор флюса зависит от состава пустой породы.

В металлургических печах используют в качестве топлива кокс, природный газ, реже мазут. Важнейшим видом твердого топлива является кокс- твердая пористая масса, получаемая сухой перегонкой коксующихся сортов каменного угля при температуре 1000...1100°C.

Огнеупорные материалы предназначены для облицовки (футеровки) рабочего пространства металлургических устройств в местах, подвергающихся действию высоких температур. Огнеупорные материалы делят на кислые, основные и нейтральные. Кислые - в основном, диоксид кремния, содержащий большое количество кислотного оксида -  $SiO_2$ . Основные - магнезит ( $MgCO_3$ ) и доломит ( $CaCO_3 + MgCO_3$ ), состоящие из основных оксидов ( $CaO, MgO$ ). Нейтральные – хромит, хромомagneзит, шамот, содержащие большое количество  $Al_2O_3$  и  $Cr_2O_3$ . Футеровка печи должна соответствовать загружаемому флюсу (кислый флюс – кислая футеровка, основная футеровка - основной шлак). В противном случае шлак вступает в реакцию с футеровкой металлургической печи, которая быстро разрушается.

### **11.2. Производство чугуна**

Чугунами называются сплавы железа с углеродом (более 2,14% C), в которых обычно содержатся примеси кремния (до 4,3 %), марганца (до 2%), серы (до 0,07%) и фосфора (до 1,2%).

Исходными материалами для производства чугуна являются железные руды, в том числе в виде агломерата и окатышей, кокс и флюсы. Железные руды содержат железо в различных соединениях: в виде оксидов, гидроксидов, карбонатов и др., а также пустую породу, чаще всего кислую, в которой преобладает кремнезем. Промышленностью разрабатываются четыре основных вида железных руд: красный железняк  $Fe_2O_3$ , магнитный железняк  $Fe_3O_4$ , бурый железняк  $2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$  и  $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ , шпатовый железняк  $FeCO_3$ . Помимо железных руд в доменном производстве используются марганцевые, хромовые и комплексные руды. Марганцевые и хромовые руды применяют для выплавки сплава железа с марганцем или хромом – ферросплавов.

Комплексные руды используют для выплавки природнолегированных чугунов. Основным видом топлива в доменных печах является кокс, который выполняет функцию топлива и восстановителя. Кокс содержит 82...88% твердого углерода, 5...10% золы, 0,5...2,0 % серы, 0,02...0,2% фосфора. В

последнее время для интенсификации доменного процесса применяется и природный газ. В качестве флюса при выплавке чугуна чаще всего используются известняк ( $CaCO_3$ ) или доломитовый известняк ( $CaCO_3$  и  $MgCO_3$ ), которые образуют основной шлак.

Подготовка железных руд к плавке осуществляется для повышения производительности доменной печи, снижения расхода кокса и флюса, уменьшения стоимости чугуна и улучшения его качества. Цель этой подготовки: увеличение содержания железа в руде; уменьшение в ней вредных примесей (серы и фосфора); повышение ее однородности по крупности кусков и химическому составу. Метод подготовки руды к плавке выбирается в зависимости от состава руды и ее качества. Подготовка руды к плавке начинается с ее дробления и сортировки по крупности для получения кусков оптимальной для плавки величины. Измельченная и рассортированная руда подвергается обогащению для повышения концентрации железа за счет удаления возможно большего количества пустой породы. Обогащение руды основано на различии физических и химических свойств минералов, входящих в ее состав. К основным способам обогащения относятся промывка, гравитация, магнитная сепарация, окускование.

Промывка водой производится для удаления глинистых и песчаных примесей. Гравитационное обогащение основано на разнице в удельных весах ценного компонента и пустой породы. Магнитную сепарацию применяют для обогащения железных руд, содержащих магнитные включения, которые притягиваются к магниту, отделяя их от немагнитной пустой породы. Окускование необходимо для превращения обогащенной рудной мелочи, образующейся при дроблении руды, в куски необходимых размеров. Окускование осуществляется двумя способами – агломерацией и окатыванием. При агломерации шихту, состоящую из рудной мелочи, известняка и коксовой мелочи спекают на агломерационных машинах при температуре 1300...1500°C, получая кусковой пористый офлюсованный

материал – агломерат. В процессе агломерации происходит частичное восстановление железа, удаляется до 95% содержащейся в руде серы, а значительная часть пустой породы связывается в легкоплавкие соединения. При окатывании шихту из измельченных концентратов, флюсов и топлива увлажняют и обрабатывают во вращающихся печах или тарельчатых чашах - грануляторах, где она приобретает форму шариков - окатышей диаметром до 30 мм. Полученные окатыши имеют высокую механическую прочность, значительную пористость и хорошую восстанавливаемость.

Чугун выплавляют в печах шахтного типа - доменных печах, в которые загружают шихту, состоящую из железных и марганцевых руд, агломерата, окатышей, флюсов и кокса. В современных доменных печах загрузка материалов механизирована и автоматизирована. Срок непрерывной работы печи – 5...6 лет, производительность 12...17 тыс. тонн чугуна в сутки, периодичность выпуска чугуна- 4...6 раз в сутки. Схема доменной печи приведена на **рис. 11.1**. Доменная печь имеет стальной кожух, выложенный внутри огнеупорным кирпичом.

В верхнюю цилиндрическую часть доменной печи (колошник 6), с помощью специального загрузочного устройства (засыпного аппарата 7) загружаются шихтовые материалы. Наличие двух конусов в засыпном аппарате обеспечивает равномерное распределение шихтовых материалов по сечению печи. В процессе работы печи шихтовые материалы постепенно опускаются из загрузочного устройства в верхнюю коническую часть печи (шахту 5), ниже которой располагается цилиндрический пояс- распар 4. Это самая широкая часть доменной печи, ниже распара находится конический пояс – заплечики 3, а затем горн 10. В верхней части горна расположены фурмы 8 - устройства, через которые в доменную печь вдувается подогретый воздух, необходимый для сжигания кокса. Фурмы распределены равномерно по окружности горна. Для поддержания высокой температуры в доменной печи и уменьшения потерь тепла, образующегося при сгорании топлива, воздух,

вдуваемый в доменную печь, предварительно подогревается в специальных устройствах - воздухонагревателях до  $1000...1200^{\circ}\text{C}$ . В горне расположены отверстия – летки для выпуска жидкого чугуна 2 и шлака 9. Толщина самой нижней части печи (лещади 1) достигает 5,5м. И лещадь и горн контактируют с расплавленным чугуном, поэтому их выкладывают из наиболее качественного огнеупорного материала.

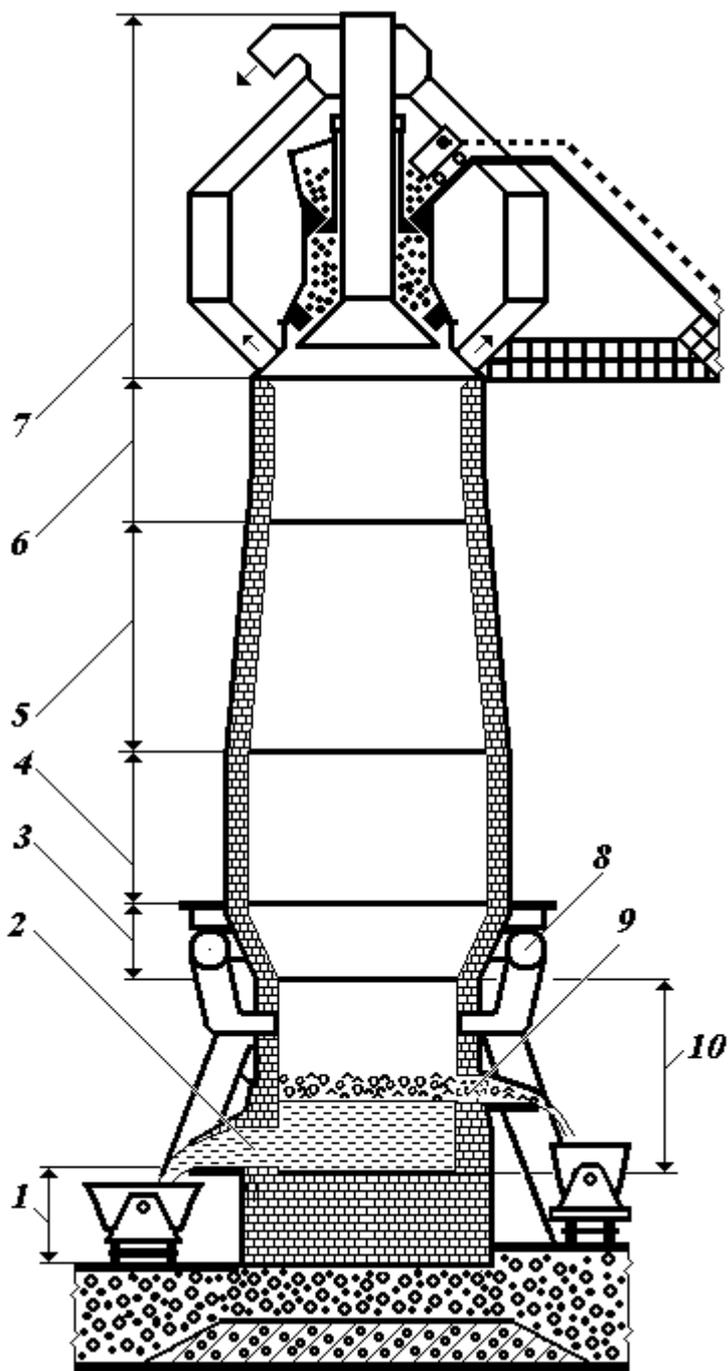


Рис. 11.1. Схема доменной печи:

1 – лещадь; 2 – чугунная летка; 3 – заплечики; 4 – распар; 5 – шахта; 6 – колошник; 7 – засыпной аппарат; 8 – фурма; 9 – шлаковая летка; 10 – горн.

Доменная печь работает по принципу противотока: сверху вниз опускаются шихтовые материалы, загружаемые в печь, а снизу вверх навстречу ей поднимаются горячие газы, которые образуются при взаимодействии горячего воздуха, выходящего из фурм, с углеродом кокса. Горение кокса происходит по реакции и сопровождается выделением тепла:  $C+O = CO_2+Q$ . Максимальная температура газов около фурм достигает  $2000^0$  С.

Образовавшаяся двуокись ( $CO_2$ ), поднимаясь вверх, частично восстанавливается углеродом раскаленного кокса по реакции:  $CO_2+C = CO+Q$ . По мере продвижения вверх газы отдают тепло шихтовым материалам и охлаждаются до  $300...400^0$ С в районе колошника.

Важнейшим процессом, происходящим в доменной печи, является восстановление окислов железа. Оксиды железа, содержащиеся в руде, начинают восстанавливаться уже в верхней части шахты при температуре около  $500...570^0$ С. Восстановление окислов железа происходит путем последовательного отщепления кислорода от высшего оксида к низшему по схеме  $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe$ . Основными восстановителями являются оксид углерода, твердый углерод кокса и сажистый углерод, отложившийся в порах руды. Восстановителем железа является также и водород, содержащийся во вдуваемом воздухе, но его роль в целом невелика.

Восстановление газами называется косвенным восстановлением, а восстановление твердым углеродом – прямым. При температурах до  $900^0$ С происходит преимущественно косвенное восстановление железа, а при более высоких температурах – прямое.

Восстановленное железо опускается в горн, проходя через слой раскаленного кокса. Происходит науглероживание железа:  $3Fe+C = Fe_3C$ . Наряду с железом в доменной печи происходит восстановление и других компонентов шихты: марганца, кремния, фосфора, серы, хрома, никеля, титана и др.

Марганец и кремний являются полезными примесями. Они обычно содержатся в железной руде, причем в случае недостатка марганца в шихту вводят марганцевую руду. Восстановление марганца, содержащегося в рудах обычно в виде двуоксида  $MnO_2$ , протекает аналогично восстановлению железа и может быть представлено схемой:  $MnO_2 \rightarrow Mn_2O_3 \rightarrow Mn_3O_4 \rightarrow MnO \rightarrow Mn$ . При температурах до  $700^\circ C$  происходит косвенное восстановление, а при более высоких – прямое. Кремний содержится в руде в виде соединения  $SiO_2$ . Он восстанавливается твердым углеродом и растворяется в железе. Окислы хрома, никеля, титана и др. примесей, встречающиеся в рудах, в доменной печи восстанавливаются частично или полностью, при этом получают природнолегированные чугуны. Фосфор и сера относятся к вредным примесям. Восстановление оксидов фосфора, содержащихся в большинстве руд, происходит помимо воли металлургов вследствие наличия в доменной печи благоприятных условий для протекания этого процесса. Фосфор восстанавливается твердым углеродом и переходит в чугун. Наличие в доменной печи основного шлака позволяет частично удалить фосфор в шлак. Сера содержится в коксе, а также в железной руде в виде сульфидов. Она частично удаляется с газами в виде  $H_2S$  и  $SO_2$ . Однако значительное количество серы остается в печи в виде сульфидов и распределяется между жидким шлаком и чугуном. Наименее желательное соединение серы – сульфид железа  $FeS$ , также как и сера, хорошо растворяется в чугуне. При наличии в доменной печи извести происходит частичное удаление серы в виде соединения  $CaS$  в шлак.

Таким образом, в результате восстановления оксидов железа, марганца, кремния, фосфора и растворения их в железе в доменной печи образуется сплав, по меньшей мере, шести элементов - железа, углерода, марганца, кремния, фосфора и серы.

Шлакообразование активно происходит при прохождении шихты в области распара после окончания процессов восстановления оксидов железа. Шлак состоит из окислов пустой породы, золы кокса и флюса, специально

добавляемого в печь для обеспечения достаточной жидкотекучести шлака. Частично в шлак удаляется и сера (в виде соединения  $CaS$ ). Состав шлака зависит от химического состава пустой породы руды. Основные составляющие

доменного шлака – кремнезем (30...45%), окись кальция (40...50%), глинозем (10...25%). Шлак формируется постепенно, изменяя свой состав по мере стекания в горн, где он накапливается на поверхности жидкого чугуна и откуда удаляется через шлаковую летку.

Основным продуктом доменной плавки является чугун. В зависимости от химического состава и назначения доменные чугуны делятся на литейные, передельные и специальные (ферросплавы). Литейные чугуны являются исходным материалом для получения чугунных отливок. Эти чугуны поступают в литейные цеха в виде чушек – небольших слитков, которые переплавляют и получают фасонные отливки. Передельные чугуны идут на производство стали. На долю передельных чугунов приходится 80...85% всего выплавляемого в доменных печах чугуна. Специальные чугуны (ферросплавы) выплавляются с высоким содержанием кремния или марганца: ферросилиций, ферромарганец. Природнолегированные чугуны выплавляются из руд, имеющих в своем составе ценные примеси (хром, никель, ванадий, титан и др.). Такие чугуны используются для получения отливок со специальными свойствами. Побочными продуктами доменной плавки являются доменный шлак доменный (колошниковый) газ. Доменный шлак применяется для производства строительных материалов (шлаковаты, шлакобетона).

Колошниковый газ после очистки используется как топливо.

Важнейшие технико-экономические показатели работы доменных печей: коэффициент использования полезного объема доменной печи (КИПО) и удельный расход кокса. КИПО – это отношение полезного объема печи к ее среднесуточной производительности (по чугуну). Для большинства доменных печей  $КИПО = 0,5...0,7$ . Удельный расход кокса – отношение

расхода кокса за сутки к количеству чугуна, выплавленного за то же время: Удельный расход кокса в доменных печах составляет 0,5...0,7. Чем ниже этот показатель, тем лучше работает печь.

### ***11.3. Прямое восстановление железа***

Под прямым восстановлением железа понимают способы получения губчатого железа, металлизированного сырья, литого железа или стали непосредственно из железнорудных материалов.

Существующие способы прямого восстановления железа в зависимости от физического состояния получаемого продукта можно разделить на три группы.

- Получение губчатого железа и металлизированных окатышей, осуществляемое при относительно низких температурах (менее 1100°С). При этом используются богатые, не содержащие вредных примесей руды или концентраты. Способы получили наибольшее распространение вследствие их высокой производительности.
- Получение крицы (слипшаяся масса губчатого железа), с одновременным с восстановлением оксидов железа, и расплавлением пустой породы с образованием шлака. При этом используются бедные руды и низкосортное твердое топливо. Способы не получили широкого распространения вследствие их низкой производительности.
- Получение жидкой стали, осуществляемое при температуре выше точки плавления железа. При этом используются богатые пылевидные руды и концентраты. Способы применяются в полупромышленных установках и в опытных производствах.

В качестве восстановителей при получении губчатого железа используют газы и газовые смеси:  $CO$ ; водород; смесь  $CO+H_2$ ; твердый углерод. При использовании твердого углерода необходимы более высокие температуры, так как скорость процесса восстановления лимитируется скоростью реакции  $CO_2+C=2CO$ .

Низкие температуры процесса получения губчатого железа обуславливают невысокие скорости восстановления. Для интенсификации процесса восстановления используют различные принципы подвода тепла, тонкое измельчение шихтовых материалов и др.

Наиболее распространенным способом получения губчатого железа и металлизированных окатышей является способ, разработанный фирмой «Мидрекс» (США). Способ используется на заводах США, Германии, Канады, России (Оскольский электрометаллургический комбинат).

Основными элементами установки «Мидрекс» является шахтная печь и газовый реформер. В реформере проводится конверсия природного газа ( $CH_4$ ) углекислого газа ( $CO_2$ ) по реакции:  $CH_4 + CO_2 = 2CO + 2H_2$ . Полученная восстановительная смесь содержит ~ 65%  $H_2$  и ~ 35%  $CO$ . Температура смеси газов ~ 900°C. Смесь газов подается в среднюю часть шахтной печи. Проходя через верхний слой окатышей, смесь восстанавливает содержащиеся в них оксиды железа:  $3Fe_2O_3 + H_2 = 2Fe_3O_4 + H_2O$ ;  $3Fe_2O_3 + CO = 2Fe_3O_4 + CO_2 \rightarrow Fe_3O_4 + H_2 = 3FeO + H_2O$ ;  $Fe_3O_4 + CO = 3FeO + CO_2$ ;  $\rightarrow FeO + H_2 = Fe + H_2O$ ;  $FeO + CO = Fe + CO_2$ . Восстановленные окатыши опускаются в нижнюю часть печи (зона охлаждения), выгружаются, и поступают в бункер с инертным газом. В бункере окатыши хранятся в инертной атмосфере перед плавкой в электропечи.

Разработаны в Швеции способ «Плазморед» отличается от вышеописанного способом получения (конверсии) восстановительной смеси ( $CO + H_2$ ) в реформере и подачи ее в шахтную печь. В реформере установлены плазматроны, при помощи которых природный газ ( $CH_4$ ), углекислый газ ( $CO_2$ ) и различные виды топлива (уголь, нефть) нагреваются до 4000...5000°C. Далее происходит конверсия газов и топлива до смеси ( $CO + H_2$ ). Из реформера смесь газов поступает в доломитовый фильтр, где очищается от серы. Очищенная газовая смесь подается в нижнюю часть шахтной печи. Применение плазматронов позволило снизить расход

электроэнергии и использовать разнообразные (в том числе низкосортные) виды топлива.

Губчатое железо можно получать с использованием не газового, а твердого восстановителя (способ «Хеганес»). Данный способ позволяет использовать сернистое топливо и тонкоизмельченные (пыль) руду и концентрат. В огнеупорные тигли чередующимися слоями загружают тонкоизмельченный богатый железом концентрат или окалину и смесь коксовой мелочи (кокстик) с известняком или доломитом. Известняк добавляют в смесь для поглощения серы, содержащейся в коксике. Тигли (до 1360 шт.) устанавливают на вагонетках, которые помещают в туннельную печь. Тигли нагревают до  $1100...1200^{\circ}\text{C}$  и выдерживают при этой температуре  $\sim 100$  час. Вагонетки, двигаясь в печи, последовательно проходят зоны нагрева, выдержки и охлаждения. При нагреве шихты происходит газификация углерода:  $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 \rightarrow \text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$ . При температуре  $1000^{\circ}\text{C}$  и более газовая смесь содержит до 99%  $\text{CO}$ , что достаточно для полного восстановления оксидов железа. Губчатое железо содержит: 97...99%  $\text{Fe}$ ; 0.1...0.2%  $\text{C}$ ; 0.01%  $\text{P}$ ; 0.01...0.016%  $\text{S}$ . Для уменьшения концентрации углерода губчатое железо подвергают отжигу в атмосфере водорода.

#### ***11.4. Производство стали***

Сущность процесса переработки чугуна в сталь сводится к снижению содержания углерода и примесей путем их избирательного окисления и перевода в шлак или газы в процессе плавки. Углерод, окисляясь, удаляется из металла в виде газа  $\text{CO}$  или  $\text{CO}_2$ , другие же примеси в виде окислов переходят в шлак. Примеси отличаются по своим физико-химическим свойствам, поэтому для удаления каждой из них в плавильном агрегате создают определенные условия, используя основные законы физической химии.

В соответствии с законом действующих масс скорость химических реакций пропорциональна концентрации реагирующих веществ. Поскольку в

наибольшем количестве в чугунае содержится железо, то оно и окисляется в первую очередь при взаимодействии чугуна с кислородом в сталеплавильной печи:  $2Fe + O_2 = 2FeO + Q$  (11.1). Одновременно с железом окисляются кремний, марганец, фосфор, сера и др. примеси. Образующийся оксид железа при высоких температурах растворяется в железе и отдает свой кислород другим, более активным элементам, находящимся в чугунае, окисляя их:  $2FeO + Si = SiO_2 + 2Fe + Q_1$  (11.2),  $5FeO + 2P = P_2O_5 + 2Fe + Q_2$  (11.3),  $FeO + Mn = MnO + Fe + Q_3$  (11.4),  $FeO + C = CO + Fe$  (11.5). Для ускорения окисления примесей в печь добавляют железную руду, окалину, так как чем больше окислов железа содержится в жидком металле, тем активнее окисляются примеси. Скорость окисления примесей зависит не только от их концентрации, но и от температуры металла и подчиняется принципу Ле Шателье, в соответствии с которым химические реакции, выделяющие теплоту, протекают интенсивнее при более низких температурах, а реакции, поглощающие теплоту, протекают активнее при высоких температурах. Поэтому в начале плавки, когда температура металла невысока, интенсивнее идут процессы окисления железа, кремния, марганца, фосфора, протекающие с выделением тепла, а углерод интенсивно окисляется только при высокой температуре металла (в середине и конце плавки). В сталеплавильной печи в процессе плавления шихты образуются две несмешивающиеся среды: жидкий металл и шлак, которые разделяются из-за различных плотностей. Примеси и их соединения, находящиеся в сталеплавильной печи и растворимые как в жидком металле, так и в шлаке, в соответствии с законом распределения (закон Нернста) распределяются между металлом и шлаком в определенном соотношении, характерном для данной температуры. Изменяя состав шлака путем введения в печь флюсов, требуемого состава, можно удалять из металла в шлак нежелательные примеси. Процесс окисления стали прекращают, когда содержание углерода станет равным заданному. Так как наряду с примесями окислялось и железо, в конце процесса плавки необходимо удалить из жидкой стали оксиды железа, которые снижают

механические свойства готовой стали, придавая ей красноломкость, что делает сталь непригодной для прокатки,ковки,штамповки. Поэтому в конце плавки производят раскисление стали, вводя в расплав элементы, имеющие большее сродство к кислороду, чем железо (кремний и марганец, вводимые в виде ферросплавов, и металлический алюминий). Восстанавливая железо, эти элементы образуют твердые окислы, всплывающие в шлак:  $Si+2FeO = SiO_2+2Fe$  (11.6),  $Mn+FeO = MnO+Fe$  (11.7),  $2Al+FeO = Al_2O_3+3Fe$  (11.8). Таким образом, процесс переработки чугуна в сталь сводится к окислению углерода и других примесей и заканчивается раскислением стали. Это осуществляется в несколько этапов: Первый этап – расплавление шихты и нагрев ванны жидкого металла. В этот период происходит интенсивное окисление железа и окисление примесей кремния, марганца и фосфора. Для удаления фосфора – одной из вредных примесей в печи необходимо иметь невысокую температуру, значительное содержание окиси железа и основной шлак, содержащий CaO, поэтому плавку ведут в печи с основной футеровкой. Фосфорный ангидрид (реакция 11.3) в присутствии окиси железа и извести образует нерастворимое соединение  $4CaOP_2O_5$ , переходящее в шлак. Фосфористый шлак с поверхности расплавленного металла убирают и наводят новый шлак со свежими добавками CaO. Второй этап – «кипение» стали начинается при повышении температуры металла (реакции 11.2, 11.3, 11.4 протекают с выделением тепла), когда интенсивно окисляется углерод. Выделяющиеся пузырьки CO интенсивно перемешивают жидкий металл, вызывая «кипение» ванны. В этот период уменьшается содержание углерода, выравнивается температура металла, частично удаляются неметаллические включения и газы, растворенные в жидком металле, что приводит к повышению качества стали. Это основной этап в процессе плавки стали. На этом этапе создаются условия для удаления серы, (высокая температура; невысокое содержание окиси железа и достаточное количество CaO). При высоких температурах сульфид железа, взаимодействует с CaO с образованием соединения CaS, которое не растворяется в стали, и переходит

в шлак:  $FeS + CaO = CaS + FeO$  (11.9). Третий этап – раскисление стали начинается после прекращения « кипения» стали. Он необходим для удаления растворенного в расплавленном металле кислорода. Сталь раскисляют двумя способами: осаждающим (реакции 11.6, 11.7, 11.8) и диффузионным с помощью шлака, рассматриваемым при плавке стали в электродуговой печи. В зависимости от степени раскисления выплавляют спокойную, кипящую и полуспокойную сталь. Спокойная сталь – сталь полностью раскислена в печи и ковше. Кипящая сталь раскислена в печи неполностью, ее раскисление продолжается в изложнице при затвердевании слитка. Полуспокойная сталь имеет промежуточную раскисленность между спокойной и кипящей сталью. Частично она раскисляется в печи и в ковше, а частично в изложнице.

Первый промышленный способ получения жидкой стали, предложенный в 1855 году и названный по имени его изобретателя – Г. Бессемера, заключался в продувке жидкого чугуна воздухом в специальном устройстве – конвертере. Плавка стали в нем осуществлялась за счет тепла химических реакций. В бессемеровских конверторах перерабатывали чугуны с повышенным содержанием кремния. Для переработки чугуна с повышенным содержанием фосфора несколькими годами позже стали применять томасовские конвертеры, которые отличались от бессемеровских только футеровкой. Производительность конверторов была очень высокой, но при продувке воздухом металл насыщался азотом и водородом, вследствие чего сталь отличалась пониженными механическими свойствами (особенно пониженной пластичностью и вязкостью) и была мало пригодна для изготовления деталей, работающих в условиях динамических нагрузок. В 1863 г. появились первые мартеновские печи, в которых плавка стали осуществлялась в отражательных печах. Мартеновским способом можно было получать сталь высокого качества, кроме того, он решил проблему переработки стального лома. До середины прошлого столетия параллельно работали три способа производства стали: кислые и основные конвертеры и

мартеновские печи. В середине прошлого столетия были предложены кислородные конвертеры, в которых продувка стали осуществлялась техническим кислородом. Кислородный конвертер имел очень высокую производительность, а качество стали приближалось к качеству мартеновской стали. Это привело к тому, что кислородные конвертеры вытеснили из сталеплавильной отрасли и воздушные конвертеры и мартеновские печи. Производство мартеновской стали постепенно сокращается, строительства новых мартеновских печей не происходит, а существующие, после выработки ими ресурса, заменяются кислородными конвертерами. В настоящее время доля мартеновской стали в структуре производства стали составляет незначительный процент.

Кислородный конвертер (рис. 11.2) - это сосуд грушевидной формы из стального листа, футерованный внутри огнеупорным материалом. Конвертер устанавливается на цапфах, что позволяет поворачивать его вокруг горизонтальной оси при загрузке шихты и сливе стали.

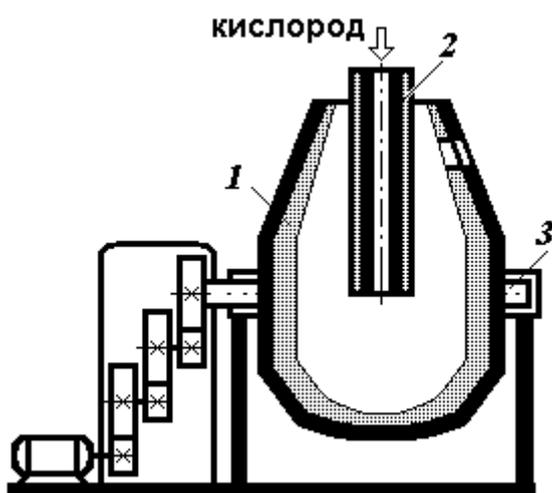


Рис. 11.2. Схема кислородного конвертера:  
1 - конвертер, 2 - водоохлаждаемая фурма, 3 - цапфы.

Исходными материалами для производства стали в кислородных конверторах являются жидкий чугун с содержанием углерода 3,5...4,5% и стальной лом (до 25% по весу от металлической части шихты), а также известь, необходимая для наведения основного шлака, и железная руда. Для увеличения жидкотекучести шлака в конвертер загружают плавиковый шпат и боксит. Для загрузки конвертер 1 наклоняют, загружают стальной лом и заливают жидкий чугун. Конвертер поворачивают в вертикальное

положение, вводят водоохлаждаемую фурму 2, через которую подают кислород под давлением 0,9...1,4 МПа. Расход кислорода – 2...5 м<sup>3</sup> на 1 т металла. Одновременно с началом подачи кислорода в конвертер загружают материалы, необходимые для наведения шлака. Окисление примесей в кислородном конвертере начинается с первой минуты, протекает очень быстро, сопровождается перемешиванием расплава и выделением большого количества тепла. Температура расплавленного металла в зоне действия кислорода достигает 2500°С, что позволяет перерабатывать значительное количество металлолома. В зоне контакта кислородной струи с чугуном в первую очередь окисляется железо, так как его концентрация значительно выше, чем примесей. Образующийся оксид железа растворяется в шлаке и металле, обогащая металл кислородом. Это приводит к тому, что окисление кремния, марганца, углерода, фосфора происходит как непосредственно кислородом, поступающим в конвертер, так и закисью железа на границе металл – шлак. Наличие в конвертере шлака с большим содержанием *CaO* и *FeO* создает условия для удаления фосфора в начале продувки ванны кислородом, когда температура металла невысока. Удаление серы из металла в шлак происходит частично, так как высокое содержание в шлаке закиси железа затрудняет ее удаление. Во время продувки осуществляется автоматический контроль химического состава металла. Когда содержание углерода достигнет заданного для выплавляемой марки стали, продувку прекращают, и сталь сливают. При выпуске стали ее раскисляют ферромарганцем, ферросилицием и алюминием.

Кислородный конвертер имеет высокую производительность (в 10...15 раз выше производительности мартеновской печи той же емкости), высокое качество стали (по содержанию азота - на уровне мартеновской), позволяет перерабатывать до 40% металлолома без дополнительной затраты топлива. В кислородном конвертере выплавляют углеродистые стали и низколегированные стали. Выплавка высоколегированных сталей в

кислородных конверторах имеет ряд трудностей, поэтому производство их осуществляют в электропечах.

Производство стали в электрических печах имеет ряд преимуществ по сравнению с другими способами выплавки стали. В электропечах можно быстро нагревать, плавить и точно регулировать температуру металла, создавать окислительную, восстановительную, нейтральную атмосферу или вакуум. В этих печах можно выплавлять стали и сплавы любого состава, более полно раскислять металл. Поэтому электропечи используют для выплавки конструкционных, высоколегированных, инструментальных и специальных сталей ответственного назначения. Для плавки стали используются электроплавильные печи двух типов – дуговые и индукционные.

Дуговая электропечь (рис. 11.3) имеет стальной кожух 3, выложенный внутри огнеупорным материалом. Печь работает на трехфазном переменном токе и имеет три цилиндрических электрода 2 из графитизированной массы, которые подключаются к силовой высоковольтной сети через понижающий трансформатор. Расход электроэнергии на тонну готовой стали зависит от характера загружаемой шихты и составляет от 300 до 1500 Квт/ч.

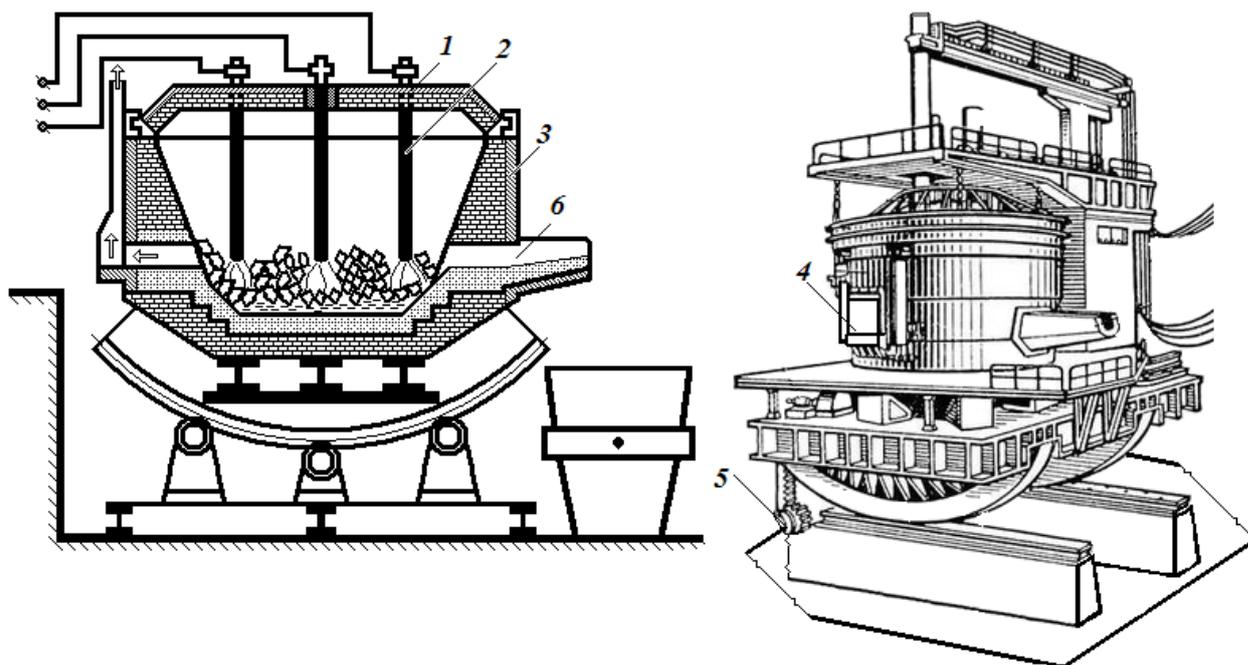


Рис. 11.3. Схема и внешний вид электродуговой печи: 1 – съемный свод, 2 - электроды, 3 - стальной кожух, 4 - рабочее окно, 5 - механизм наклона печи, 6 - сливной желоб.

По характеру футеровки дуговые электропечи могут быть основными и кислыми. В промышленной практике наибольшее распространение получили печи с основной футеровкой, так как в них возможно практически полное удаление серы и фосфора. Печи с кислой футеровкой используются, главным образом, для производства стального фасонного литья из шихтовых материалов с низким содержанием серы и фосфора, так в кислых печах нет условий для их удаления.

Процесс выплавки стали в основной электропечи протекает в следующей последовательности: Съемный свод 1 убирают и в печь загружают шихту: стальной лом (до 90 %), чушковой передельный чугун (до 10%), электродный бой или кокс для науглероживания металла, железную руду или окалину для окисления примесей и известь. Свод ставят на печь, опускают электроды и включают ток. Шихта под действием тепла, выделяемого электрической дугой, плавится. В этот период частично окисляются железо, кремний и фосфор. В конце расплавления образуется фосфористый шлак (преимущественно в виде фосфата железа), который скачивают во избежание обратного перехода фосфора в металл. Окисление примесей в жидком металле продолжается под новым шлаком, который наводят, загружая в печь известь и плавиковый шпат ( $CaF_2$ ). Загрузка в печь небольшого количества железной руды приводит к окислению углерода, повышению температуры и интенсивному кипению стали, что способствует удалению растворенных в металле газов и неметаллических включений, а также выравниванию температуры и химического состава стали. Когда содержание углерода в стали станет равным заданному, окисление углерода прекращают, окислительный шлак удаляют из печи и начинают проводить заключительную стадию плавки. Это восстановительный период плавки, проведение которого возможно

только в электрических дуговых печах, так как только в этих печах создаются условия для наведения горячего высокоосновного шлака, позволяющего практически полностью удалить серу и раскислить сталь. Изменяя состав шлака путем введения на его поверхность необходимых компонентов, производят диффузионное раскисление металла. В этот период создаются необходимые условия, которых нет ни в какой другой сталеплавильной печи, для практически полного удаления серы, что объясняется высоким содержанием  $CaO$  в шлаке, низким содержанием  $FeO$  и высокой температурой металла. В этот же период в металл вводят и необходимые добавки легирующих элементов, после чего приступают к выпуску стали.

Индукционная тигельная плавильная печь состоит из индуктора *1* (рис. 11.4), внутри которого находится тигель *2* с металлической шихтой. Индуктор имеет вид соленооида и выполняется из профилированной медной трубки, по которой циркулирует холодная вода. При прохождении через индуктор переменного тока промышленной или повышенной частоты создается переменное электромагнитное поле, которое наводит в металле, находящемся в тигле, вихревые токи (токи Фуко), разогревающие и расплавляющие шихту.

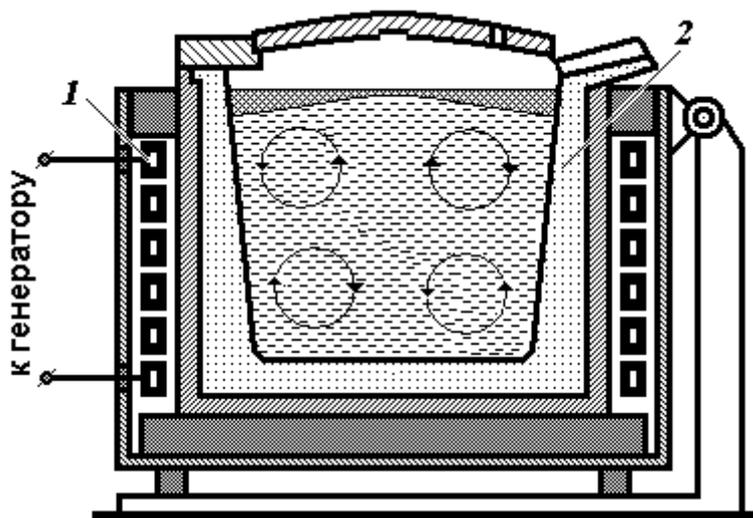


Рис. 11.4. Схема индукционной тигельной плавильной печи: 1 - индуктор, 2 - тигель.

По сравнению с дуговыми электропечами индукционные печи имеют ряд преимуществ: отсутствие электродов и электрической дуги дает возможность полной изоляции металла от атмосферы и в связи с этим возможность ведения плавки в специально создаваемой газовой атмосфере или в вакууме, возможность получения сталей с очень низким содержанием углерода и малым угаром элементов. Плавка характеризуется высоким электрическим к.п.д., точным регулированием температуры. Однако шлак индукционной печи по сравнению со шлаком дуговой печи имеет более низкую температуру, которая недостаточна для протекания металлургических процессов между шлаком и металлом, что не позволяет удалять из расплава вредные примеси. Эти преимущества и недостатки печей обуславливают возможности плавки в них. В индукционных печах выплавляют сталь и сплавы методом переплава шихты с минимальным содержанием серы и фосфора.

Для разливки стали применяют ковши, имеющие отверстие в днище, закрываемое стопором. Расплавленный металл из такого ковша поступает в чугунные изложницы квадратного, круглого или прямоугольного сечения. Применяют следующие способы разливки стали: сверху, снизу (сифонная разливка) и непрерывную разливку.

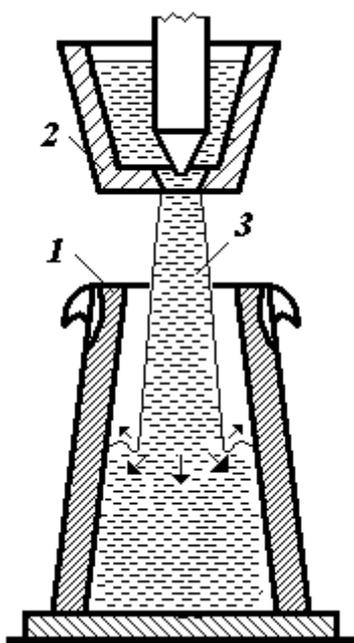


Рис. 11.5. Схема разливки стали сверху: 1 - изложница; 2 - ковш со стопорным устройством; 3 - струя металла.

При разливке сверху (рис. 11.5) каждая изложница 1 заполняется отдельно. При ударе струи жидкого металла 3 о дно изложницы происходит разбрызгивание металла, капли которого, окисляясь,

попадают на стенки изложницы, в последствии уже не свариваются со слитком и при прокатке образуют окисленные пленки на поверхности изделия. Разливка сверху применяется при производстве слитков большого размера.

При разливке снизу одновременно заполняется несколько изложниц (рис. 11.6), для чего их полости при помощи отверстий в днище соединяются системой каналов, выложенных огнеупорным кирпичом. Вся система заполняется расплавленным металлом через центральный литник. При разливке снизу металл заполняет изложницу спокойно, на стенках изложницы не имеется брызг.

Непрерывная разливка стали (рис. 11.7) обеспечивает высокую производительность, экономию металла на литниках и прибылях, а также возможность прокатки получаемых слитков без использования обжимных станов.

При непрерывной разливке сталь из промежуточной емкости 1 непрерывно подается в водоохлаждаемый кристаллизатор 2, в который перед началом разливки вводится затравка - кусок слитка, имеющий сечение, соответствующее сечению кристаллизатора.

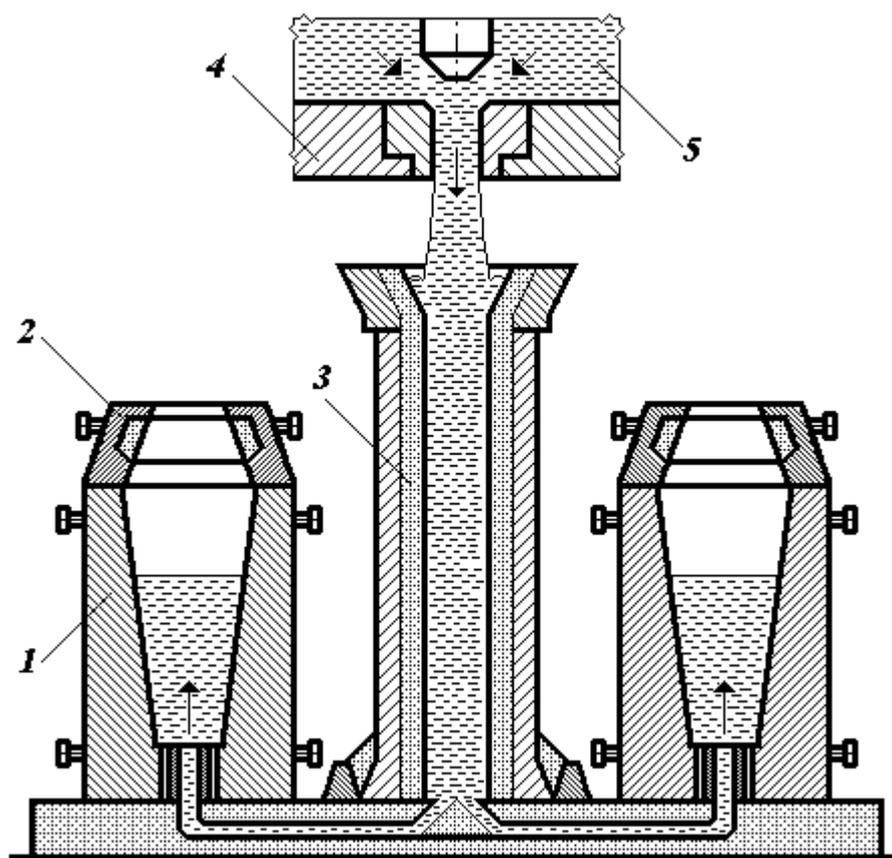


Рис. 11.6. Схема сифонной разливки стали: 1 – изложница; 2 – прибыльная надставка; 3 – стояк; 4 – поддон; 5 – жидкая сталь; стрелками указано движение расплава.

Затравка опускается вниз, вытягивая за собой затвердевающий слиток 3, сердцевина которого еще жидкая. На выходе из кристаллизатора слиток охлаждается водой из форсунок 4, установленных в зоне вторичного охлаждения. Тянущие 7 и обжимные 6 валки подают слиток в зону резки, где газовый резак 5 режет его на слитки заданной длины. Направленное затвердевание металла и непрерывное питание формирующегося слитка горячим металлом сверху обеспечивают плотную, мелкозернистую структуру слитка и отсутствие в нем усадочной раковины. Сечение слитка зависит от формы кристаллизатора и может быть квадратным, прямоугольным, круглым и т.д. Машины непрерывного литья могут иметь несколько кристаллизаторов, что позволяет одновременно получать несколько слитков.

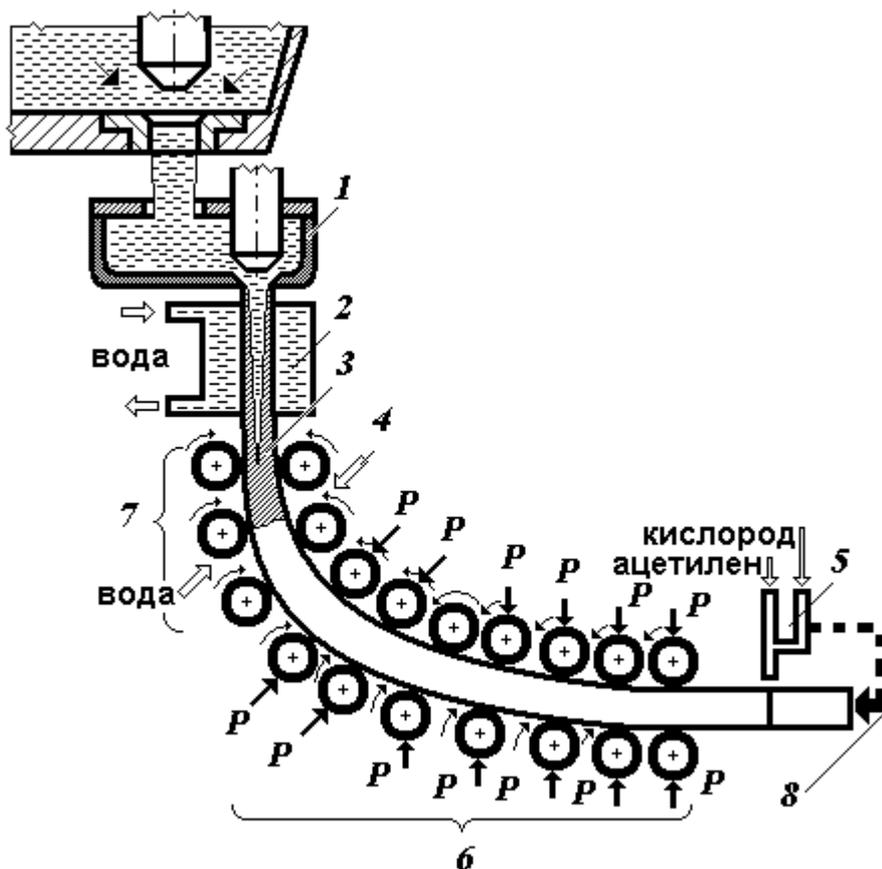


Рис. 11.7. Схема непрерывной разливки стали: 1 - промежуточная емкость со стопорным устройством; 2 - кристаллизатор; 3 - слиток; 4 - форсунки; 5 - газовый резак; 6 – обжимные валки; 7 – тянущие валки; 8 – подвижной упор газового резака; P – давление.

Залитая в изложницу сталь охлаждается неравномерно так как тепло отводится в направлении стенок изложницы и дна. В этих местах металл охлаждается быстро, поэтому кристаллизация начинается у стенок, а затем распространяется внутрь слитка. Сталь затвердевает в виде кристаллов древовидной формы – дендритов, размеры и форма которых зависят от условий кристаллизации. На строение стального слитка большое влияние оказывает степень раскисненности стали. При заполнении изложницы спокойной сталью около боковых стенок изложницы и дна с большой скоростью образуется тонкий слой мелких кристаллов 1 (рис. 11.8), следом за которым перпендикулярно стенкам изложницы начинается рост столбчатых кристаллов 2. По мере роста кристаллов направленный теплоотвод ослабевает и в центре слитка кристаллы растут в разных направлениях.

Появляется центральная зона крупных разноориентированных кристаллов 3. В нижней части слитка образуется зона осаждения 4 из мелких разноориентированных кристаллов. В верхней головной части слитка образуется усадочная раковина 5, а в средней части – усадочная осевая рыхлость 6. Для устранения усадочных дефектов слитки спокойной стали отливают с прибылью, сталь в которой длительное время остается жидкой и питает усадку, поэтому усадочная раковина образуется не в слитке, а в прибыли. Стальные слитки из спокойной стали неоднородны по химическому составу. Химическая неоднородность, или ликвация, возникает вследствие уменьшения растворимости примесей в железе при переходе из жидкого состояния в твердое. В слитках кипящей стали усадочные раковины не образуются, но при заливке стали раскисление продолжается в изложнице с выделением газа  $CO$ , который образует в слитке большое количество мелких пузырьков. При прокатке слитка газовые пузыри завариваются. Полуспокойная сталь сохраняет преимущества спокойной и кипящей сталей и не имеет их недостатков.

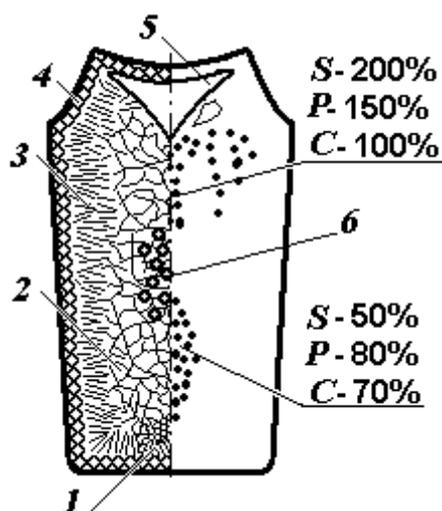


Рис. 11.8. Строение стального слитка спокойной стали:

1 – слой мелких кристаллов; 2 – зона столбчатых кристаллов; 3 – зона крупных разноориентированных кристаллов; 4 - зона осаждения из мелких разноориентированных кристаллов; 5 - усадочная раковина; 6 - усадочная осевая рыхлость.

Современное машиностроение, особенно его специальные отрасли предъявляют к качеству стали все более высокие требования. Однако в стали всегда имеются неметаллические примеси и растворенные газы, которые невозможно полностью удалить в сталеплавильных печах.

Для повышения качества стали используют различные методы, основными из которых являются: вакуумирование расплава, обработка расплавленного металла синтетическими шлаками, электрошлаковый переплав и др. методы. Вакуумная дегазация стали - это способ внепечной обработки стали, осуществляемым в ковше или изложнице. Вакуумирование позволяет сократить содержание растворенных в металле газов и неметаллических включений при понижении давления над зеркалом металла. Наиболее совершенным методом вакуумной обработки стали является вакуум-плавка, осуществляемая в индукционных печах. Сущность процесса состоит в том, что в плавильном пространстве печи создается и поддерживается в течение плавки вакуум, в результате чего газы и неметаллические включения, содержащиеся в расплаве удаляются из металла. Сущность обработки металла синтетическим шлаком заключается в том, что в ковш перед заливкой в него стали заливают специально приготовленный шлак. Выпускаемый в ковш металл интенсивно перемешивается со шлаком, вследствие чего поверхность контакта металла и шлака резко возрастает, т.е. процессы рафинирования металла протекают значительно быстрее чем в сталеплавильной печи. Электрошлаковый переплав (ЭШП) применяют для выплавки высококачественных сталей для различных отраслей промышленности. Переплаву подвергают выплавленный в электродуговой печи и прокатанный на круглые прутки металл. Источником тепла при ЭШП является шлаковая ванна, нагреваемая за счет прохождения через нее электрического тока. Сущность рафинирования металла при ЭШП подробно рассматривается в разделе «Сварка».

### ***11.5. Производство цветных металлов***

В машиностроительном производстве наиболее широкое применение находят медь, алюминий, магний, титан, цинк, никель, свинец, олово. Эти металлы используются как в чистом виде, так и в виде сплавов. Руды цветных металлов обычно отличаются небольшим содержанием ценного

компонента и комплексным характером залегания. Это определяет сложность технологического процесса извлечения ценных компонентов и более высокую себестоимость их получения.

Исходным материалом для производства меди служат руды, содержание меди в которых обычно составляет 1...6%. Медные руды встречаются в земной коре главным образом в виде комплексных соединений, содержащих, кроме меди, свинец, цинк, сурьму, мышьяк, золото и серебро. Известны также месторождения не только сравнительно чистых руд, но и самородной меди. В рудах медь находится большей частью в виде сернистых соединений  $CuS$  и  $Cu_2S \cdot CuFeS_2$ , окисные соединения меди встречаются реже и еще реже медь встречается в виде карбонатов.

Переработка медных руд может осуществляться пирометаллургическим или гидрометаллургическим способами. Пирометаллургическим способом (протекающим при высоких температурах) можно перерабатывать как сульфидные, так и окисленные руды. Гидрометаллургическим способом (перевод выделяемого металла в раствор) - только окисленные руды.

Пирометаллургический способ позволяет извлекать из руды кроме меди и драгоценные металлы. Этим методом получают основную массу меди.

Переработка медных руд является многоступенчатым процессом и складывается из следующих этапов: обогащение, обжиг, плавка на штейн, получение черновой меди, рафинирование меди.

Более 85% производимой меди получают пирометаллургическим способом (рис. 11.9, а). Перед плавкой медные руды обогащают флотацией, которая основана на различной смачиваемости частиц ценного компонента и пустой породы. Получаемый концентрат, содержащий до 30% меди, подвергают окислительному обжигу при температуре 750...800°C для уменьшения содержания серы. Продукт обжига - огарок является смесью сульфидов и оксидов. Огарок плавят в отражательных или электрических печах с целью получения медного штейна –  $Cu_2S$  и  $FeS$ , который содержит примерно 20...60% меди и около 20% серы. Расплавленный штейн заливают в

конвертеры и продувают воздухом для получения черновой меди, которая содержит до 1% примесей. Черновую медь рафинируют для удаления вредных примесей и газов. Рафинирование осуществляется в два этапа: огневое рафинирование для получения меди чистотой до 99,5%. Для получения более чистой меди (до 99,95%) применяют электролитическое рафинирование.

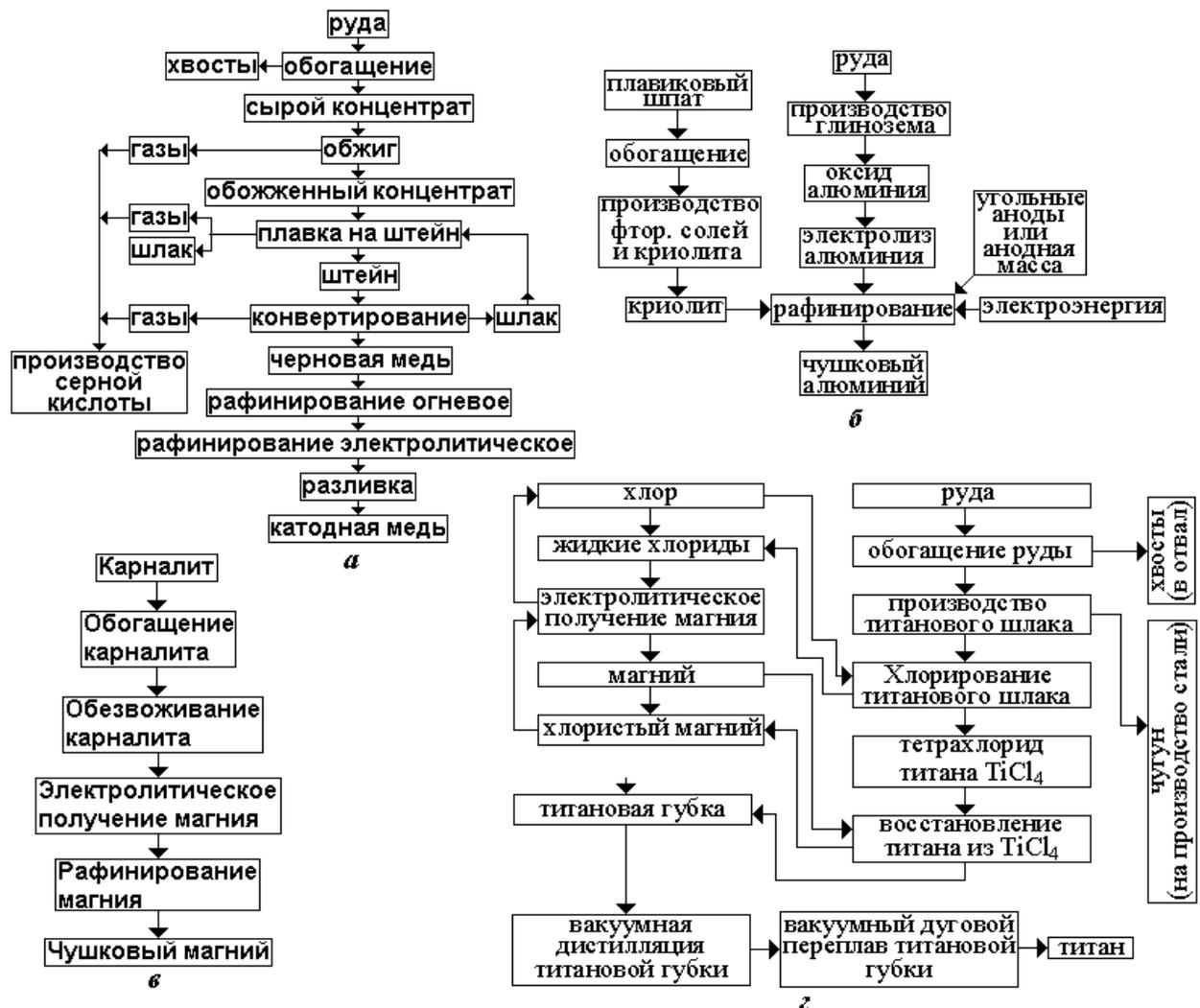


Рис. 11.9. Схемы производства цветных металлов: а – меди; б – алюминия; в – магния; г – титана.

По содержанию в земной коре алюминий занимает среди металлов первое место (около 7,5%). Алюминий очень активный металл, поэтому встречается в природе только в связанном виде (оксиды и гидроокиси). Основные алюминиевые руды: бокситы, нефелины, алуниты, каолины, из которых наибольшее значение имеют бокситы, содержащие 40-60% глинозема,

остальное - оксиды железа, кремния, кальция, титана и др. примесей. В нефелинах, алунитах и каолинах содержится 20...30% глинозема ( $Al_2O_3$ ). Процесс переработки алюминиевых руд складывается из двух самостоятельных этапов (рис. 11.9, б): получение глинозема и получение алюминия электролизом глинозема. В зависимости от состава руды применяются различные способы получения глинозема: щелочной, спекания или комбинированный, которые предусматривают одну цель- отделение от руды посторонних примесей и получение растворимого в воде соединения алюминия- алюмината натрия. Наиболее распространенный в отечественной и мировой практике щелочной способ предусматривает обработку измельченного боксита концентрированной щелочью в автоклавах при температуре  $150^\circ C$  и избыточном давлении, в результате которой образуется алюминат натрия  $Al_2O_3 \cdot Na_2O$ . Алюминат натрия переходит в водный раствор, а окись железа, двуокись титана и др. примеси, нерастворимые в щелочах, выпадают в осадок (красный шлам). Раствор алюмината натрия, отделенный от красного шлама, подвергают декомпозиции (выкручиванию), при которой происходит самопроизвольное разложение алюминатного раствора с выделением гидроксида алюминия -  $Al(OH)_3$ , выпадающего в осадок. Обезвоживание гидроксида алюминия (кальцинация) осуществляется при температуре  $1200^\circ C$  и приводит к получению глинозема  $Al_2O_3$ . Алюминий получают путем электролиза глинозема. Для проведения электролиза, глинозем необходимо расплавить, но он имеет очень высокую температуру плавления –  $2030^\circ C$ , поэтому глинозем растворяют в расплавленном криолите  $Na_3AlF_6$ , что позволяет снизить температуру электролиза до  $950...1000^\circ C$ . Электролиз проводят в электролизных ваннах-электролизерах. В ванну из углеродистого материала заливают расплав алюминия (который служит катодом) и электролит, состоящий из криолита, глинозема,  $AlF_3$  и  $NaF$ . Толщина слоя расплава – 250...300мм. Анодное устройство состоит из угольного анода, погруженного в электролит. Постоянный ток силой 70...75 кА и напряжением 4...5В подводится для электролиза и разогрева

электролита до температуры 1000°C. Глинозем в электролите диссоциирует; на катоде разряжается ион алюминия и образуется алюминий, а на аноде – ион кислорода, в результате чего электроды постепенно сгорают и заменяются новыми. Алюминий собирается на дне ванны под слоем электролита, откуда его периодически извлекают. Полученный электролизом алюминий-сырец содержит металлические и неметаллические примеси, газы, поэтому его рафинируют продувкой хлором. Для получения особо чистого алюминия производят электролитическое рафинирование, которое позволяет удалить и металлические примеси.

Магний – один из распространенных металлов в земной коре. Это очень активный металл, в свободном виде не встречается, является составляющей многих пород, в которых содержится в виде хлоридов или карбонатов, образуя магниевые руды: карналлит, магнезит, доломит, бишофит. Основным методом получения магния является электролитический способ переработка карналлита ( $MgCl_2 \cdot KCl \cdot 6H_2O$ ), однако выделить магний этим способом из водных растворов его солей невозможно, так как электрохимический отрицательный потенциал магния по абсолютной величине значительно больше отрицательного потенциала разряда ионов водорода на катоде.

Исходя из этого, проводят электролиз не водных растворов, а расплавленных солей магния (рис. 11.9, в). Электролитом является безводный хлористый магний, для снижения температуры плавления которого и повышения электропроводности в электролит добавляют  $NaCl$ ,  $CaCl_2$  и  $KCl$ . Хлористый магний получают хлорированием окиси магния или обезвоживанием карналлита. Электролитическое получение магния осуществляют в электролизере, в котором анодами служат графитовые пластины, а катодами – стальные пластины. Электролизер заполняют расплавленным электролитом и пропускают электрический ток. Удельная плотность магния меньше удельной плотности электролита, поэтому выделяющийся на катоде жидкий магний, не растворяясь в электролите, в виде капель всплывает на его поверхность, откуда его периодически сливают. Получаемый магний

содержит до 5 % примесей, поэтому его рафинируют переплавкой с флюсами или возгонкой.

Титан довольно широко распространен в земной коре. В природе он встречается в составе более семидесяти минералов, из которых наибольшее промышленное значение получили ильменит- $FeO \cdot TiO_2$  и рутил -  $TiO_2$ . Известно несколько способов получения титана из его руд, но во всех случаях, как и для большинства металлов, металлургической обработке всегда предшествует обогащение руды и получение концентрата. Основным методом переработки титановых руд является магниитермический способ, сущность которого заключается в получении четыреххлористого титана и восстановлении из него металлического титана с помощью магния (рис. 11.9, з). Ильменитовый концентрат плавят в смеси с древесным углем, антрацитом в рудно-термических печах, где оксиды железа и титана восстанавливаются. Образующееся железо науглероживается, и получается чугун, а низшие оксиды титана переходят в шлак. Чугун и шлак разливают отдельно в изложницы. Титановый шлак содержит 80...90%  $TiO_2$ , 2...5%  $FeO$  и примеси  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $CaO$  и др. Чугун используют в металлургическом производстве.

Титановый шлак подвергают хлорированию и получают четыреххлористый титан:  $TiO_2 + 2C + 2Cl_2 = TiCl_4 + 2CO$ . Четыреххлористый титан находится в парообразном состоянии в смеси с хлоридами других элементов, поэтому производят отделение и очистку  $TiCl_4$  от остальных хлоридов. Титан из четыреххлористого титана восстанавливают магнием при температуре 950...1000°C в атмосфере аргона. Между жидким магнием и четыреххлористым титаном происходит реакция:  $2Mg + TiCl_4 = Ti + 2MgCl_2$ . Твердые частицы титана спекаются в пористую массу-губку, а жидкий  $MgCl_2$  выпускают через летку реактора. Титановая губка содержит 35...40% магния и хлористого магния. Для удаления из титановой губки этих примесей ее нагревают до температуры 900...950°C в вакууме. Титановые губки для получения слитков плавят в вакуумных дуговых печах. Полученные слитки

могут иметь дефекты (раковины, поры). Поэтому их переплавляют, используя как расходные электроды. Чистота титана, после вторичного переплава, составляет 99,6...99,7%.

### ***Контрольные вопросы***

1. Что является исходным материалом при производстве чугуна, стали, титана?
2. Как удаляется углерод при переработке чугуна в сталь?
3. Что такое «кипение стали»?
4. Зачем производят раскисление стали?
5. Какими способами можно повысить качество стали?
6. В чем сущность процесса прямого восстановления железа?
7. В чем разница между пиromеталлургическим и гидromеталлургическим способам переработки руды?

## ГЛАВА 12. ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Литейное производство - отрасль машиностроения, изготавливающая заготовки или детали (отливки) заливкой расплавленного металла (расплава) заданного химического состава в полость литейной формы, имеющей конфигурацию отливки. При охлаждении, расплав затвердевает и сохраняет конфигурацию полости формы. Литьем можно изготавливать изделия очень сложной конфигурации, которые другими видами обработки - ковкой, штамповкой, сваркой - получить трудно или невозможно. Литьем изготавливают: заготовки деталей общего назначения, к которым не предъявляются особые требования по механическим и эксплуатационным свойствам; заготовки ответственных деталей, таких как детали двигателей внутреннего сгорания (блоки цилиндров, поршни), рабочие колеса и лопасти газовых турбин, и т.д. Масса отливок может быть от нескольких граммов (детали приборов) до десятков тонн (станины станков, роторы турбогенераторов).

Жидкий металл заливают в разовые формы (после изготовления отливки их разрушают) и многократные (в одной форме можно получить от десятка до нескольких десятков тысяч отливок). Разовые формы изготавливают из неметаллических материалов (формовочных смесей). Многократные формы изготавливают из сплавов на металлической основе.

### ***12.1. ОСНОВЫ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА***

Принципиальная схема литья (на примере разовой разъемной литейной формы) показана на **рис. 12.1, а**. Жидкий металл *10* из ковша *11* заливается в литейную форму и через систему каналов поступает в полость *4* формы *3*, заполняет ее и затвердевает. После затвердевания, извлечения из формы и обработки получается отливка (**рис. 12.1, б**). Для получения отверстий, полостей и других усложнений конфигурации отливок применяют стержни *б*, которые устанавливаются при сборке формы.

Для получения отливки необходимо наличие трех технологических элементов: литейный материал, технологическое литейное оборудование и технологическая литейная оснастка.

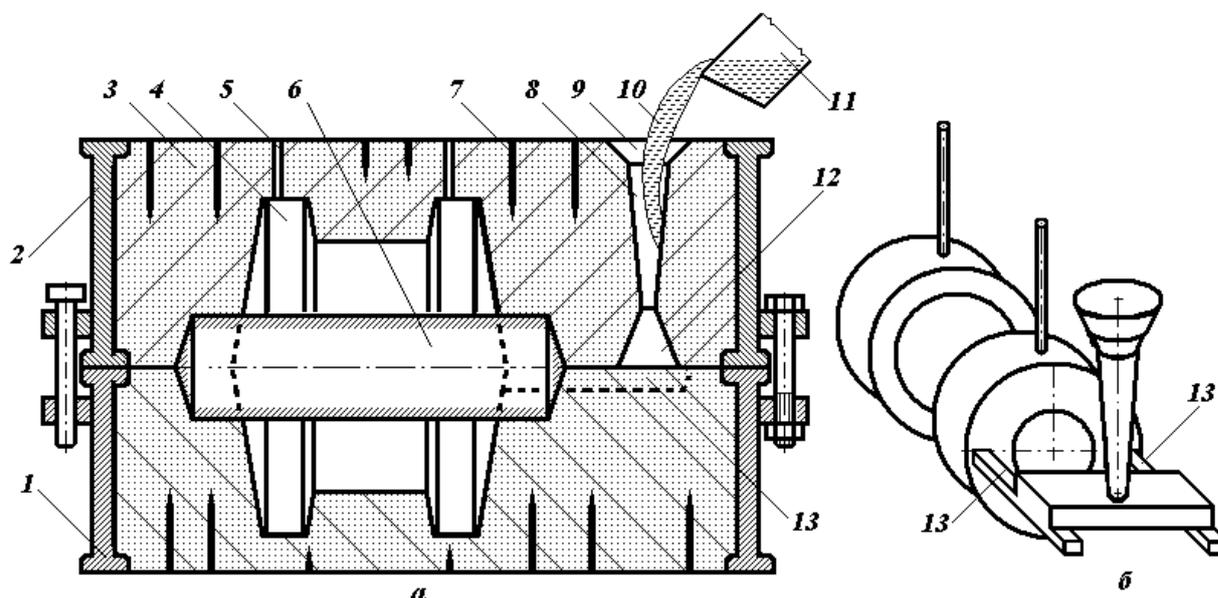


Рис. 12.1 Схема процесса литья в разовые разъемные формы: а – принципиальная схема; б – отливка после выбивки; 1,2 – нижняя и верхняя опоки; 3 – форма; 4 – полость формы; 5 – выпор; 6 – литейный стержень; 7 – вентиляционный канал; 8 – вертикальный канал (стояк); 9 - литниковая чаша (воронка); 10 - расплавленный металл; 11 - ковш; 12 – шлакоуловитель; 13 - горизонтальные каналы (питатели).

### *Литейные материалы*

Литейные материалы (металлические сплавы, пластмассы, резина, керамика) должны обладать высокими литейными (технологическими), механическими и эксплуатационными свойствами.

### *Литейные свойства сплавов*

При проектировании любой детали в первую очередь учитываются механические свойства сплава. При конструировании литой детали и разработке технологии процесса литья дополнительно необходимо учитывать литейные свойства сплава, которые определяют возможность получения качественной отливки, т.е. отливки, отвечающей заданным требованиям.

Наиболее важные литейные свойства сплавов: жидкотекучесть, усадка, склонность к ликвации и поглощению газов.

Жидкотекучесть - это способность жидких металлов и сплавов течь по каналам литейной формы, заполнять ее полости и четко воспроизводить рельеф отливки. Жидкотекучесть сплава зависит от его физико-химических свойств (прежде всего - температуры ликвидус) и технологических факторов, прежде всего - температуры заливки. Для сплавов затвердевающих при постоянной температуре (чистые металлы и эвтектические сплавы) или в узком интервале температур (до 30°C) характерно последовательное затвердевание с образованием сплошной твердой корки на поверхности канала формы. Внутри этой корки остается жидкая фаза, способная затекать в канал. Сплавы с широким интервалом температур кристаллизации затвердевают с образованием разветвленных дендритов по всему сечению потока. Эти расплавы теряют способность течь в канале формы при наличии твердой фазы 20...30% от объема. С повышением температуры перегрева сплава жидкотекучесть увеличивается.

Усадка - это свойство литейных сплавов уменьшаться в объеме и линейных размерах при затвердевании и охлаждении. Усадочные процессы протекают с момента заливки расплавленного металла в форму вплоть до полного охлаждения отливки. На величину усадки влияют, прежде всего, химический состав сплава, температура заливки и свойства литейной формы. С повышением температуры заливаемого сплава усадка отливки увеличивается. Различают линейную и объемную усадку. Линейная усадка - это уменьшение линейных размеров отливки при ее охлаждении от температуры заливки до температуры окружающей среды:  $\epsilon_{\text{лин}} = 100(l_{\text{ф}} - l_{\text{от}}) / l_{\text{от}}$ , где:  $\epsilon_{\text{лин}}$  - линейная усадка в %;  $l_{\text{ф}}$  и  $l_{\text{от}}$  - размеры полости формы и отливки при температуре 20°C в мм. Величина линейной усадки может варьироваться от 1% у серого чугуна до 1,5...2 % у сталей и цветных сплавов. Объемная усадка - это уменьшение объема сплава при его охлаждении в литейной форме:  $\epsilon_{\text{об}} = 100(V_{\text{ф}} - V_{\text{от}}) / V_{\text{от}}$ , где:  $\epsilon_{\text{об}}$  -объемная

усадка в %;  $V_{\phi}$  и  $V_{от}$  - размеры полости формы и отливки при температуре 20°C в мм. Объемная усадка приводит к образованию в отливках усадочных раковин, усадочной пористости, трещин и короблений. Усадочная раковина сравнительно крупная полость, расположенная в местах отливки затвердевших последними. Вначале кристаллизации чистых металлов, эвтектических сплавов и сплавов с узким температурным интервалом кристаллизации около стенок отливки образуется металлическая твердая корка (слой). Усадка жидкой фазы больше усадки твердой фазы, поэтому уровень расплава понижается. Послойное затвердевание расплава приводит к появлению усадочной раковины.

Усадочная пористость – рассредоточенное скопление пустот, образовавшихся в отливке в результате усадки в тех местах отливки, которые затвердевают последними без доступа к ним расплава. Вблизи температуры солидуса рост кристаллов сопровождается их сращиванием. Образуются изолированные области. Затвердевание металла происходит без доступа в эти области расплава. В результате усадки появляются пустоты. Если в отливке имеются различные по толщине части (например, ступенчатый клин), то вначале затвердевает самая тонкая часть. Образующаяся в ней усадочная пустота заполняется жидким металлом из средней части, которая охлаждается медленнее. Объемная усадка средней части клина питается жидким металлом из самой массивной его части, затвердевающей в последнюю очередь. Поэтому усадочные пустоты образуются обычно в толстых областях отливки. Для питания усадочной раковины в толстых частях отливки в литейной форме предусматривают дополнительные резервуары с расплавом - прибыли. Размеры и форму прибыли подбирают так, чтобы она затвердевала в последнюю очередь, поэтому прибыль должна быть массивнее самой толстой части отливки.

С усадкой сплава связаны многие затруднения в производстве отливок. При торможении усадки (выступами формы, стержнями) в отливке возникают напряжения, которые могут вызвать ее коробление или образование трещин.

В зависимости от того, в какой период охлаждения образовались трещины, различают трещины горячие и холодные. Горячие трещины появляются в температурном интервале кристаллизации под влиянием механических напряжений, возникающих из-за сопротивления формы и стержней усадке. Трещины, возникающие в затвердевшей отливке в результате внутренних напряжений (во время ее охлаждения), называют холодными. Холодные трещины образуются в отливках, имеющих большую разницу в толщине тонких и массивных частей, а, следовательно, охлаждающихся неравномерно. Если напряжения, образовавшиеся в отливках в результате неравномерного охлаждения ее частей, невелики, то трещины не образуются. Однако в процессе обработки резанием и эксплуатации отливки может произойти ее коробление под действием этих напряжений.

Для снятия усадочных напряжений применяют отжиг. Для этого отливки нагревают до высоких температур (но ниже температуры солидус) и медленно охлаждают вместе с печью. При медленном охлаждении (~ 20 градусов в час) перепада температур в разных точках отливки не будет, и, следовательно, все ее части будут усаживаться равномерно. Часто отливки после предварительной (черновой) механической обработки просто вылеживают длительное время перед окончательной обработкой.

Ликвация - это неоднородность химического состава по сечению отливки. Ликвация возникает в процессе затвердевания отливки из-за различной растворимости отдельных компонентов сплава в его жидкой и в твердой фазах. Чем больше это различие, тем неоднороднее распределяются компоненты.

Различают два основных вида ликвации: внутрикристаллическую (или дендритную), характеризующуюся неоднородностью зерна металла, и зональную, когда различные зоны отливки имеют различный химический состав. Простейший случай ликвации связан с большой разницей плотностей компонентов сплава. Так, при литье свинцовой бронзы в нижних частях отливки содержание свинца будет выше, чем в верхних частях.

Концентрация меди (более легкого компонента), наоборот, увеличится в верхних частях отливки.

В период затвердевания отливки из металла выделяются газы, которые растворены в расплаве. В результате этого в отливке образуются газовая пористость или газовые раковины, значительно понижающие комплекс механических свойств отливки. Источником газовых раковин может быть и форма при недостаточной ее газопроницаемости и при выделении ею большого количества газов. Газовые раковины чаще всего образуются около поверхности горизонтально расположенных стенок отливки, а также в местах, где затруднен газоотвод.

### Литейное оборудование

Механизация и автоматизация процессов изготовления отливок связана с применением специального технологического оборудования для литейного производства. Литейное оборудование – это совокупность машин, автоматов, установок, плавильных печей, заливочных устройств, манипуляторов, предназначенных для выполнения процессов, операций и переходов изготовления отливок при различных переделах и способах литья, включая специальные средства транспортирования и управления. Каждый литейный процесс (формовка, плавка, заливка и др.) использует свои виды оборудования (формовочное, плавильное и др.) в соответствии с ГОСТ 18111-93\*.

### Литейная оснастка

Технологическая оснастка литейного производства - средства технологического оснащения, дополняющие литейное технологическое оборудование для выполнения определенной части процесса получения отливок. К литейной оснастке по ГОСТ 17819-84\* относятся литейные формы, стержни, модели и другие средства технологического оснащения. Литейная форма – это система элементов, образующих рабочую полость, при заливке которой жидким металлом формируется отливка. Основные

требования, предъявляемые к литейным формам, следующие: Прочность - чтобы под действием напора расплава форма не только не разрушилась, но и не изменила размеры. Газопроницаемость - чтобы газы, находящиеся как в полости формы, так и в расплаве, могли удаляться (во избежание газовой пористости и газовых раковин в отливках). Стойкость к химическому взаимодействию с расплавом - чтобы обеспечить простоту извлечения и очистки отливок.

Литейный стержень – элемент литейной формы, предназначенный для образования отверстия, полости или иного сложного контура в отливке. Во многом благодаря применению стержней при литье возможно получение заготовок самой сложной конфигурации. Стержни, как и формы, могут быть разовыми и многократными, целиковыми и сборными.

Литниковая система – система каналов и устройств для подвода в определенном режиме жидкого металла к полости литейной формы, отделения неметаллических включений и обеспечения питания отливки при затвердевании.

Основными элементами литниковой системы являются (рис. 12.1, а):

Литниковая чаша 9 – элемент литниковой системы (ЭЛС) для приема струи жидкого металла и направления его движения в стояк 8 или непосредственно в литейную форму (для мелких отливок применяют литейные воронки).

Шлакоуловитель 12 – ЭЛС для задержания шлака и других неметаллических включений из потока заливаемого металла.

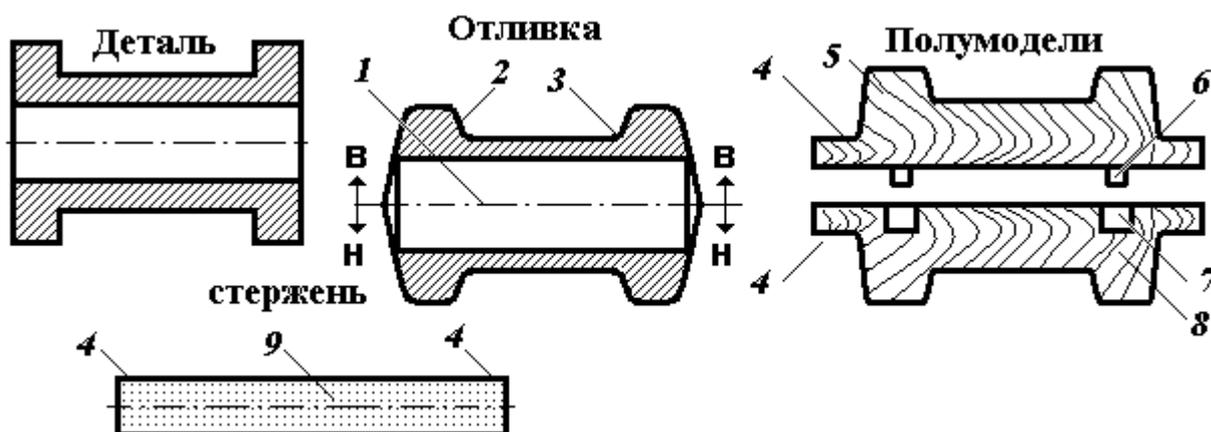


Рис. 12.2. Эскизы детали и модели: 1 – плоскость разъема формы; 2, 3 – литейные уклоны и радиусы; 4 – знаки; 5, 8 – верхняя и нижняя полумодели; 6, 7 – базирующие элементы; 9 – стержень; в; н – направление «верх» и «низ» по отношению к плоскости разъема полуформ.

Питатель 13 – ЭЛС, примыкающий непосредственно к рабочей полости литейной формы для подвода расплава. Выпор 5 – ЭЛС для вывода газов из полости литейной формы, наблюдения за заполнением литейной формы расплавом и для питания затвердевающей при усадке отливки жидким металлом. Прибыль – ЭЛС для питания отливки жидким металлом в период затвердевания и усадки.

Литниковые системы имеют разнообразное строение. В зависимости от применяемых сплавов и способов литья они могут быть горизонтальными и вертикальными, верхними и сифонными, по разъему литейной формы и вне разъема. При литье в разовые формы литниковая система выполняется при формовке. Для этого обычно используются модели элементов литниковой системы, которые собираются с моделями отливок и заформовываются вместе с ними. При литье в металлические формы элементы литниковой системы выполняются в форме в процессе ее изготовления литьем или обработкой резанием.

Для изготовления разовых форм применяются литейные модели, обеспечивающие образование в форме отпечатка, соответствующего конфигурации и размерам отливки. Чтобы получить отливку заданных размеров и качества, наружные размеры модели увеличивают на величину припусков на обработку резанием и линейную усадку, предусматривают скругления углов (галтели), формовочные уклоны и пр. Модели изготавливаются из дерева, пластмасс или металлических сплавов и могут быть разъемными и неразъемными, разовыми и многократными.

## Общая технология литья

Технология литья представляет собой совокупность большого количества отдельных процессов литейного производства, которые можно объединить в четыре этапа:

1. Технологическая подготовка процесса изготовления отливки. На основании конструкторской (чертеж детали, технические требования, условия работы детали в узле ...) и технологической документации (величина партии, технологический маршрут обработки...) осуществляется: выбор способа литья, разработка чертежа отливки, проектирование технологической оснастки (модель, стержни, литейная форма ...) разработка технологии, включая определение последовательности и технологических параметров отдельных процессов, операций и переходов.
2. Изготовление формы. На основании разработанных чертежей изготавливаются модель, стержни, необходимая технологическая оснастка. При литье в неметаллические формы наиболее ответственным и трудоемким процессом является формовка - изготовление литейных форм и стержней из формовочных и стержневых смесей. Чаще всего, литейная форма – разъемная (состоит из двух частей), что позволяет получать большинство отливок. Разовые формы, как и стержни, изготавливают уплотнением формовочной (стержневой) смеси в опоках (стержневых ящиках). Готовые части формы (полужелобки) и стержни поступают на операцию сборки форм, которая включает установку, соединение и закрепление литейных стержней в литейной форме и частей формы между собой. Параллельно с формовкой и сборкой в плавильном отделении литейного цеха производится плавка – получение расплава нужного химического состава и температуры.
3. Заливка форм и охлаждение металла отливок. Собранные формы при помощи ковша или литейной машины заливают расплавом. Температура расплава равна:  $t_{\text{заливки}} = t_{\text{ликвидус}} + (100...150)^\circ\text{C}$ . Заполнение формы расплавом требует определенного времени, что ограничивает производительность литья в целом. Свойства отливок формируются в

результате кристаллизации и охлаждения отливки в форме, когда происходят сложные процессы в литейном сплаве (усадка, выделение растворенных газов и пр.), в форме (нагрев и разупрочнение, деформирование и пр.) и на их границе (взаимодействие материалов отливки и формы). Влияя на эти процессы, можно существенно повысить качество отливок. Для этого используется воздействие центробежных сил, электромагнитных полей, ультразвука и т.д. После кристаллизации отливка должна охладиться в форме до определенной температуры, для чего в составе конвейеров и автоматических линий по производству отливок предусматривают охлаждающие ветви. Литье в металлические формы обеспечивает более быстрое охлаждение отливок, что увеличивает производительность и эффективность использования производственных площадей.

4. Извлечение из форм и обработка отливок. Охлажденная до заданной температуры отливка удаляется из формы, и из нее извлекаются стержни. При литье в разовые формы эта операция называется выбивкой, которая осуществляется на вибрационных решетках. Последующая обработка отливок включает операции, обеспечивающие выполнение заданных требований к отливкам, придание товарного вида. К этим операциям относятся: Обрубка - отделение от отливок элементов литниковой системы, заливов по разъёму формы и неровностей поверхности. Осуществляется с помощью пневмомолотков (отливки из чугуна) и пневмозубил, резкой газом или плазмой (стальные отливки), абразивным и другим инструментом. Очистка поверхности отливок от пригара, остатков формовочной и стержневой смеси. Для очистки применяют такие способы, как галтовка, дробеметный, электрохимический и др. Во вращающихся галтовочных барабанах пригар удаляется за счет трения поверхностей отливок друг о друга и о дополнительно загружаемые звездочки из белого чугуна. При дробеметном способе поверхность отливки очищается под воздействием потока чугунной или стальной дроби диаметром 1-3 мм. Скоростной поток дроби создается с помощью сжатого воздуха (в дробеструйных установках)

или вращающихся лопаток (в дробеметных установках). Наиболее высокое качество очистки как наружных, так и внутренних поверхностей отливок, достигается при электрохимическом методе. В этом случае отливки подвергаются электролизу в электролите из расплавленного технического каустика ( $NaOH$ ) при напряжении 5...10В и температуре 400...500°C.

Зачистка - механическая обработка поверхности отливок с целью приведения ее в соответствие с требованиями по качеству поверхности. При этом удаляются остатки питателей, заливы по плоскости разъема формы и у знаковых частей стержней. Зачистку чаще всего осуществляют с помощью шлифовальных кругов и на обрезающих прессах. Термообработка отливок производится при необходимости повышения прочности (закалка), пластичности, обрабатываемости резанием, снятия внутренних напряжений (отжиг). В последнем случае, часто ограничиваются длительным вылеживанием отливок на складе. Контроль качества отливок предусматривает проверку соответствия продукции техническим условиям, включая отсутствие дефектов строения. Внешний осмотр позволяет выявить наружные дефекты (раковины на поверхности, сквозные трещины, перекося и т.д.). Точность размеров и шероховатость поверхности определяют с помощью мерительного инструмента (штангенциркулей, шаблонов, калибров) и специального оборудования (профилометров, координатно-измерительных машин). Для контроля структуры отливок применяют металлографию. С помощью неразрушающих методов контроля, таких как ультразвуковой, вихретоковый, рентгеновский, контролируют внутреннее строение металла. Ответственным процессом является определение химического состава, которое необходимо, как для контроля за ходом плавки литейных сплавов, так и для оценки качества конечной продукции. Наибольшее применение нашли такие методы, как термографический, спектральный и химический.

## ***12.2. СПОСОБЫ ЛИТЬЯ***

В промышленности применяют множество способов литья, которые можно классифицировать по различным признакам. Наиболее часто все виды литья делят на литье в разовые формы (литье в песчаные формы, в оболочковые формы, литье по выплавляемым моделям ...) и литье в многократные формы (литьё в кокиль, под давлением, центробежное литье ...).

Выбор способа литья определяется типом литейного сплава (легкоплавкий, тугоплавкий), объемом производства, заданными параметрами точности размеров и шероховатости поверхности получаемых отливок, и другими факторами.

### ***Литье в песчаные формы***

Литье в песчаную форму (ЛПФ) – это литье металла, осуществляемое заливкой разовой литейной формы, изготавливаемой из песчаной формовочной смеси. ЛПФ получило наибольшее распространение, как наиболее дешевый и универсальный способ получения отливок.

### ***Формовка.***

Формовка - технологический процесс изготовления литейной формы. В зависимости от степени механизации различают формовку: ручную, машинную и автоматизированную. Ручная формовка – тяжелый и малопродуктивный процесс. Ее применяют в единичном и мелкосерийном производстве при изготовлении штучных отливок. В серийном производстве ее применяют для производства крупных и сложных отливок. Машинная и автоматизированная формовка применяется в серийном и массовом производствах.

Для получения отливки детали (**рис. 12.2**) разрабатывают чертеж отливки. На чертеже указывают: литейные радиусы 3 и литейные уклоны 2; положение плоскости разъема 1 формы. Далее изготавливают модель, состоящую из двух симметричных частей (полумоделей) 5 и 8. Полумодели имеют знаки 4,

предназначенные для получения полостей, в которые при сборке формы будут установлены знаковые части 4 стержня 9.

Формовка (рис. 12.3) осуществляется путем уплотнения формовочной смеси 1 вокруг полумодели 3 в опоках 2. Для облегчения выхода газов накалывают вентиляционные каналы. Опокой называют формовочное приспособление в виде жесткой рамы для удержания формовочной смеси при изготовлении формы, заливке расплава и транспортировке. Опоку изготавливают из чугуна, стали или алюминиевых сплавов. Отверстие в отливке формируется стержнем, который изготавливается уплотнением стержневой смеси в стержневом ящике.

После изготовления второй полуформы и извлечения (протяжки) моделей осуществляется нанесение противопригарных составов на рабочие поверхности полуформ, и сборка литейной формы (рис. 12.1).

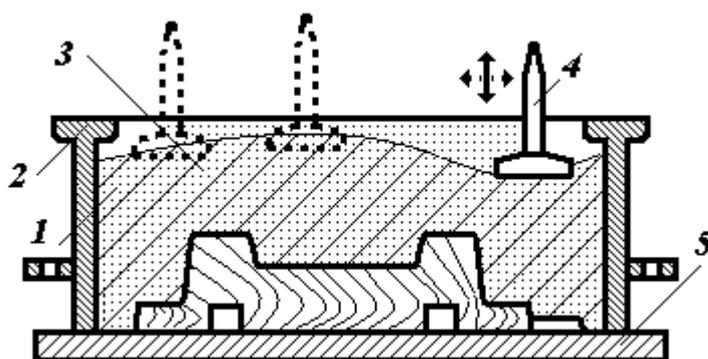


Рис. 12.3 Изготовление нижней полуформы: 1 – формовочная смесь; 2 – опока; 3 – нижняя полумодель; 4 – трамбовка; 5 – модельная плита.

При этом в нижнюю полуформу устанавливается стержень 6, верхняя полуформа устанавливается на нижнюю, по сборочным штырям. После соединения полуформ в литейной форме образуется рабочая полость 4, соответствующая наружным очертаниям отливки. Для предотвращения раскрытия формы под действием давления жидкого металла, полуформы скрепляют болтами, скобами или грузами. Заливка литейной формы производится из ковша 11 до заполнения дальнего от стояка выпора 5 или

прибыли. Жидкий металл заполняет полость формы по каналам литниковой системы и затвердевает в ней.

### Формовочные и стержневые смеси

Для изготовления разовых литейных форм и стержней используют разнообразные формовочные и стержневые смеси. Основу песчано-глинистых формовочных смесей составляет кварцевый песок, к которому в качестве связующего вещества добавляют глину (до 10...15%) и воду (до 5% сверх 100%). Кроме этих компонентов в формовочные смеси вводят специальные добавки обеспечивающие необходимые свойства формовочных смесей, а именно: высокую огнеупорность, пластичность, прочность, газопроницаемость, податливость, противопригарность и др. Огнеупорность – способность смеси выдерживать высокую температуру заливаемого металла, не размягчаясь, не расплавляясь и не пригорая к поверхности отливки. Прочность- сопротивляемость формы разрушающим усилиям, возникающим при сборке и транспортировке формы, и при заливке металла. Прочность формовочной смеси возрастает с увеличением в ней содержания глины, с уменьшением размеров зерен песка. Податливость - свойство формовочной смеси сжиматься при усадке металла. Увеличение податливости обеспечивается введением в состав смеси специальных добавок (древесные опилки, торф и др.), которые к моменту усадки выгорают, образуя поры, облегчающие некоторую деформацию смеси. Пластичность - способность формовочного материала отчетливо воспроизводить отпечаток модели. Пластичность зависит от соотношения в формовочной смеси глины и воды. Газопроницаемость - способность смеси обеспечить отвод газов из полости формы. Газопроницаемость тем выше, чем больше песка в формовочной смеси и чем он крупнее, а также чем меньше содержание глины в формовочной смеси. Противопригарность – способность формовочной смеси вступать в химическое или механическое

взаимодействие с металлом, залитым в форму, образуя пригар (корку) на поверхности отливки.

В зависимости от назначения формовочные смеси делятся на облицовочные, наполнительные и единые. Облицовочная смесь - это свежеприготовленная, высококачественная смесь, которая непосредственно соприкасается с жидким металлом и формирует качество поверхности отливки. Остальная часть формы заполняется наполнительной смесью - менее качественной и более дешевой. Она обычно представляет собой отработанную смесь, которую подвергают очистке от металлических частиц и кусков стержней и в которую добавляют небольшое количество исходных формовочных материалов. При машинной формовке применяют единые смеси, которые имеют промежуточные между облицовочной и наполнительной смесями состав и свойства.

Стержни при заливке форм металлом находятся в более тяжелых условиях, чем сама форма, так как они почти со всех сторон контактируют с жидким металлом. Поэтому стержневые смеси должны обладать более высоким комплексом свойств. Необходимая прочность стержневой смеси достигается применением связующих веществ - крепителей, которые при сушке стержня прочно связывают частицы песка. В качестве крепителей используются синтетические и природные смолы, отходы производства спирта, крахмала и др. Увеличение газопроницаемости обеспечивается минимальным содержанием глины. После уплотнения смеси в стержневом ящике стержни подвергают тепловой сушке.

### Модельный комплект

Модельный комплект – это комплект формообразующих изделий, необходимый для образования при формовке рабочей полости литейной формы. В модельный комплект входят модели, стержневые ящики, модели элементов литниковой систем, формовочные, контрольные и сборочные шаблоны.

Конструкция модельного комплекта обусловлена конфигурацией данной отливки и способом изготовления формы. Модельный комплект изготавливается по чертежу отливки. Конструкция модели должна обеспечить беспрепятственное извлечение ее из формы, без разрушения последней. Для небольших партий отливок модели и стержневые ящики изготавливают из дерева. Они дешевые, но недолговечные. В средне- и крупносерийном производстве используют, как правило, металлические модели и ящики. Для этих целей используются также пластмассы. Для разработки чертежа модели и стержневого ящика необходимо: Предусмотреть возможные упрощения конфигурации отливки. Так, для детали, изображенной на рис. 12.4, целесообразно отливать фланец без отверстий диаметром 22 мм, потому что получение длинных и тонких отверстий с помощью стержней усложняет процесс формовки.

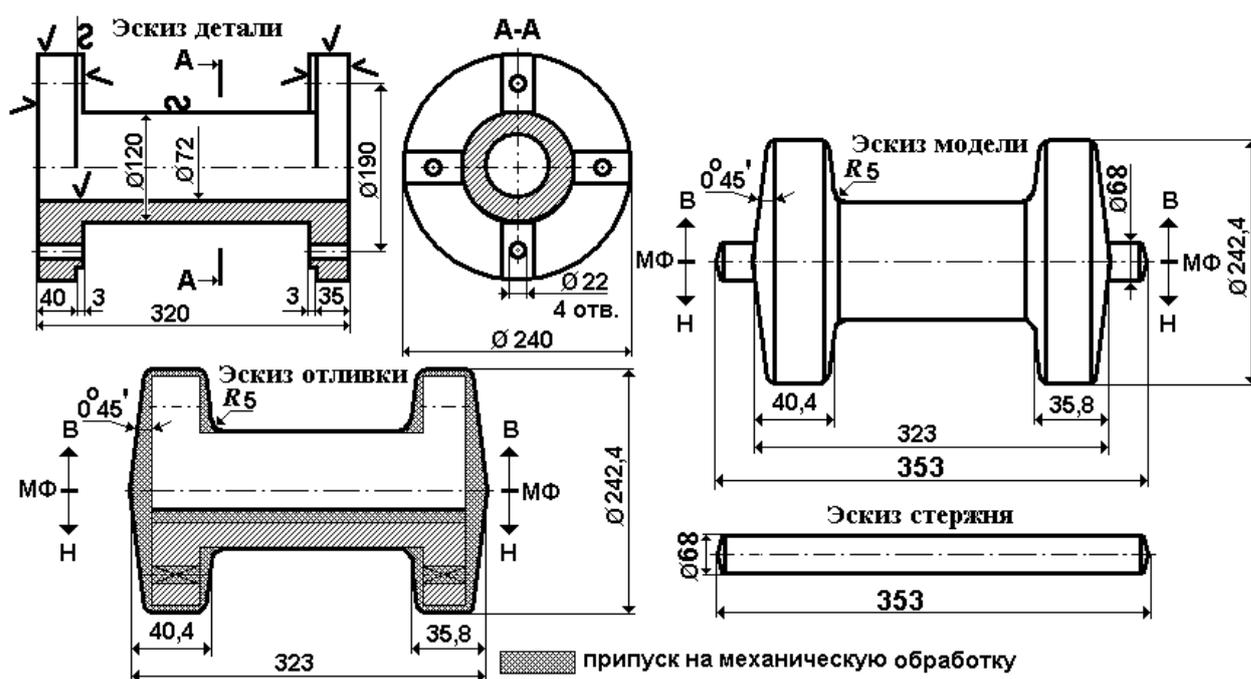


Рис. 12.4 Чертежи детали, отливки, модели и стержня.

- Выбрать поверхность разъема модели и формы (обозначена «МФ», т.е. разъем модели и формы) так, чтобы обеспечить возможность извлечения полумоделей из соответствующих полуформ. При этом следует учитывать, что литейные дефекты строения металла (усадочные и газовые раковины,

шлаковые включения) образуются, как правило, в верхней части отливки. Поэтому наиболее ответственные части отливки желательно располагать в нижней части формы.

- Назначить припуски на поверхности, подвергающиеся обработке резанием.
- Для облегчения извлечения модели из формы и стержня из стержневого ящика назначить литейные уклоны на поверхности, перпендикулярные плоскостям разъема формы и стержневого ящика. Назначить литейные радиусы. Формовочные уклоны и размеры стержневых знаков принимают по ГОСТ 3212-92.

Указанные изменения превращают чертеж детали в чертеж отливки. На полученном таким способом чертеже увеличивают все размеры на величину линейной усадки, предусматривают стержневые знаки, т.е. получают модельный чертеж, который и служит основанием для изготовления модели и стержневого ящика. Правила графического выполнения элементов литейных форм и отливок регламентированы ГОСТ 3.1125-88\*.

### Технология ручной формовки

В зависимости от конфигурации отливки и условий производства применяют различные методы ручной формовки: по моделям в почве (кессоне), в опоках, с подрезкой, с отъемными частями, с перекидным или подъемным болваном, с фальшивой опокой, по шаблону, в стержнях, по скелетным моделям.

Рассмотрим некоторые способы формовки.

Формовка по разъемной модели - наиболее распространенный способ формовки. При ручной формовке сначала изготавливают нижнюю полуформу (рис. 12.5, а). Затем изготавливают верхнюю полуформу (рис. 12.5, б). Для этого нижнюю полуформу переворачивают на 180°, на нижнюю половину модели шипам устанавливают верхнюю половину, монтируют модели шлакоуловителя, стояка и выпоров. Плоскость разъема (лад формы) посыпают разделительной смесью - графитом, мелкотертым кварцевым

песком. Верхнюю опоку устанавливают на нижнюю по направляющим штырям. В неё засыпают и уплотняют формовочную смесь, и получают верхнюю полуформу. После уплотнения смеси удаляют модели стояка и выпоров. Верхнюю полуформу снимают, переворачивают на 180°, удаляют из обеих полуформ модели (рис. 12.5, в), и приступают к сборке формы. Собранный и готовый к заливке форма показана на рис. 12.5, г.

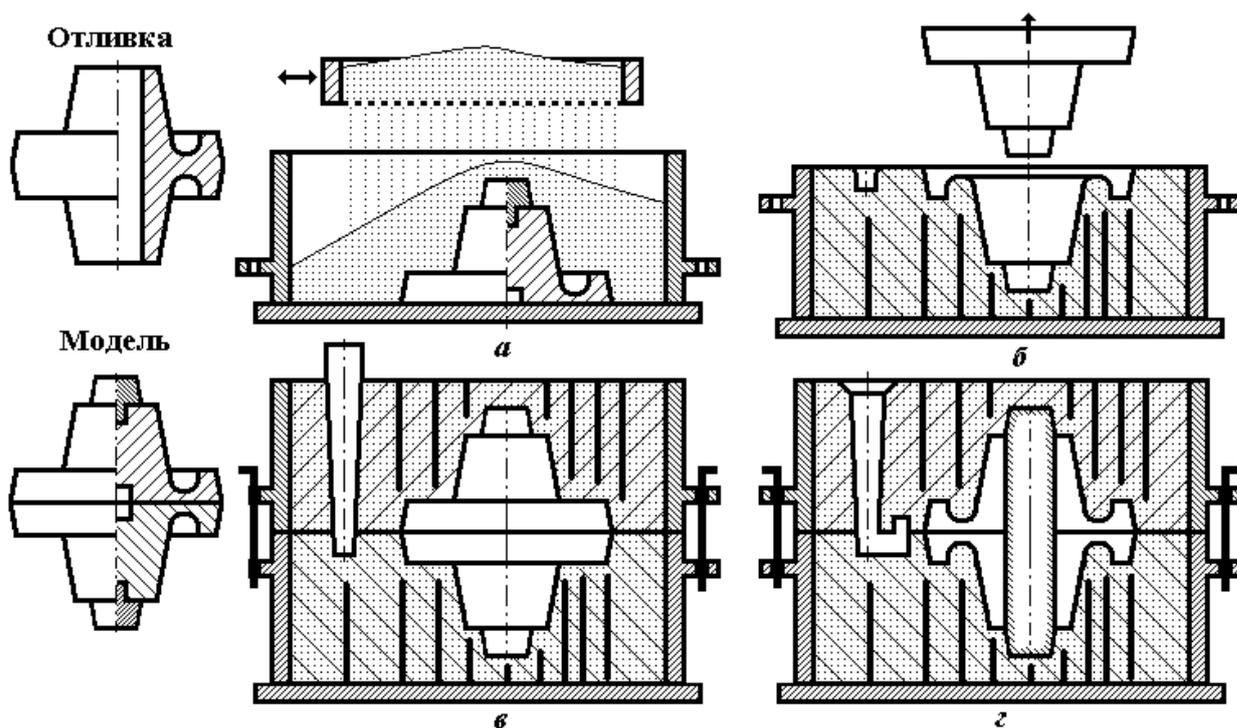


Рис. 12.5. Формовка по разъемной модели:

а - г – последовательность формовки; МФ – разъем модели и формы.

Отливку, показанную на рис. 12.6, при формовке невозможно извлечь без разрушения части формы (объем «К») (рис. 12.6, а). В таких случаях применяют формовку с подрезкой. Нижнюю полуформу уплотняют обычным способом и переворачивают. Срезают объем «К» (рис. 12.6, б).

Образовавшуюся поверхность тщательно заглаживают. При формовке верхней полуформы (рис. 12.6, в), на месте этого объема образуется болван. Разъем формы получается не плоским, а фасонным. Далее устанавливают модель верхнего знака 2, поверхность разрезки посыпают разделительной смесью. Дальнейшие операции формовки не отличаются от операций

формовки в опоках. При изготовлении больших серий отливок применяют фасонные модельные плиты 4 (рис. 12.6, з), оформляющие полость подрезки за счет кольцевой модели б.

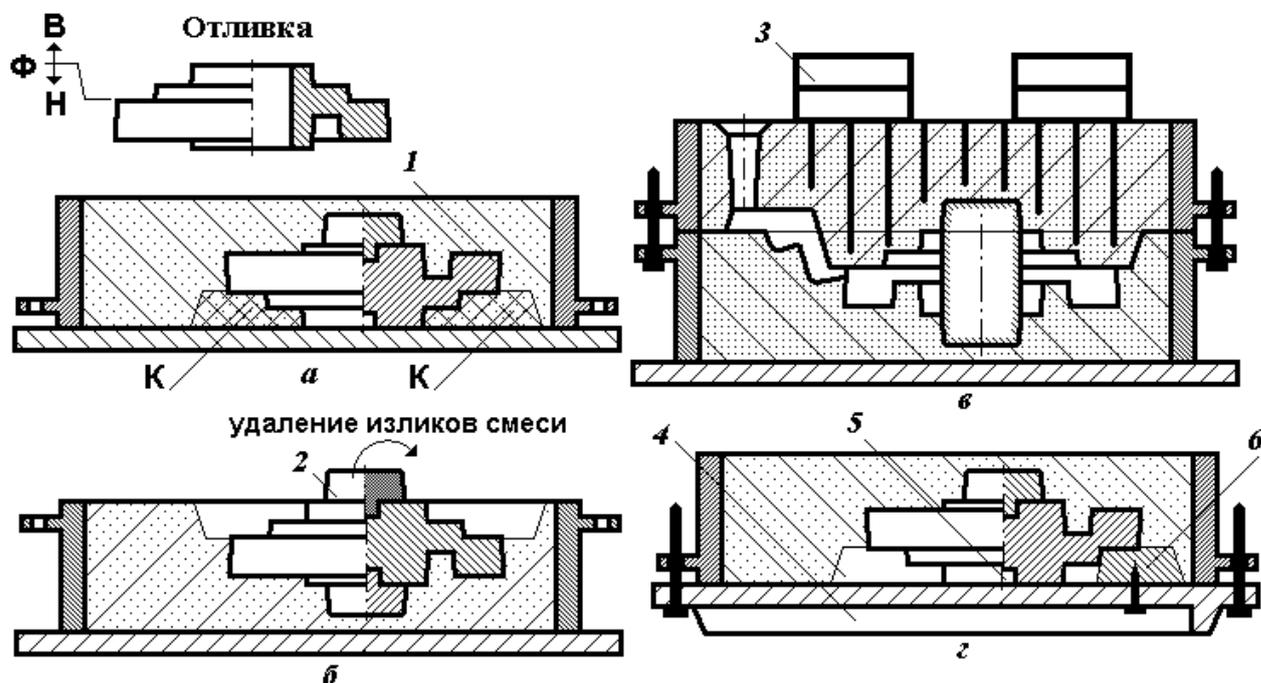


Рис. 12.6. Формовка с подрезкой: а – уплотненная нижняя полуформа; б – нижняя полуформа после удаления излишков смеси; в – форма в сборе; г – формовка по фасонной модельной плите; 1 – модель; 2 – модель верхнего знака; 3 – груз; 4 – модельная плита; 5 – гнездо знаков; б – модель подрезки; К – объем смеси, препятствующей извлечению модели; Ф – плоскость разъема полуформ; н – направление «верх» и «низ» по отношению к плоскости разъема полуформ.

Формовка по модели с отъемными частями применяется при изготовлении сложных по конфигурации отливок с выступающими элементами, когда применение модели с одним разъемом не позволяет извлекать ее половины из полуформ после уплотнения смеси. Отъемные части вида 1 (рис. 12.7, а, б) применяют при наличии в модели полости достаточной для удаления штифта 8. При формовке модели с отъемными частями вида 2 (рис. 12.7, а, в), смесь уплотняют до верхней плоскости отъемной части, затем извлекают шпильку

9 и заканчивают уплотнение. Крепление отъемной части 3 (рис. 12.7, а, з) называют «ласточкин хвост».

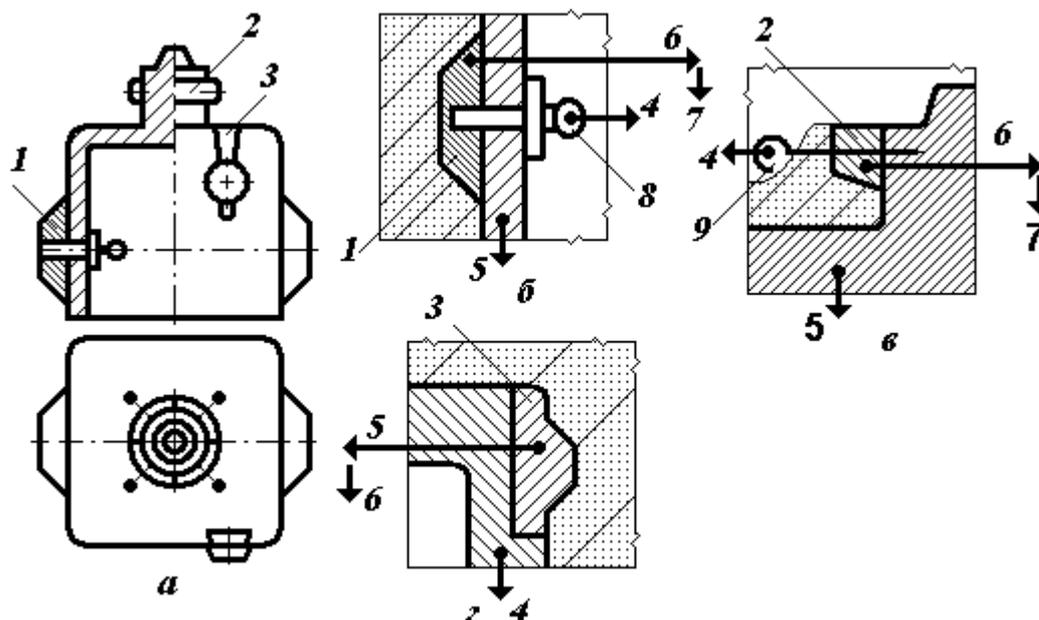


Рис. 12.7. Формовка по модели с отъёмными частями:

а – модель; б, в, г, - последовательность выполнения операций 4, 5, 6, 7 формовки; 1, 2, 3 – виды отъемных частей; 8 – штифт, 9 – шпилька; стрелками показаны перемещения отъемных частей, штифтов и шпилек.

Если невозможно расположить модель на плоской плите, применяют формовку с фальшивой опокой. В фальшивую опоку металл не заливают. Она служит только для формовки в качестве фигурной модельной плиты.

### Машинная формовка (МФ)

МФ применяется для производства отливок в серийном и массовом производстве. При МФ механизмуется установка опок на машину, засыпка формовочной смеси в опоку, уплотнение смеси и удаление моделей из формы. МФ обеспечивает более высокую геометрическую точность полости формы по сравнению с ручной формовкой, исключает трудоемкие ручные операции, сокращает цикл изготовления отливок. Изготовление верхней и нижней полуформ осуществляется, как правило, одновременно на двух машинах, что резко повышает производительность труда. При МФ смесь

уплотняют различными способами: прессованием, встряхиванием, пескометным и пескодувным способами, и др.

Уплотнение формовочной смеси прессованием осуществляется с помощью сжатого воздуха подаваемого в нижнюю часть цилиндра 8 (рис. 12.8, а) под давлением 0,5...0,8 МПа.

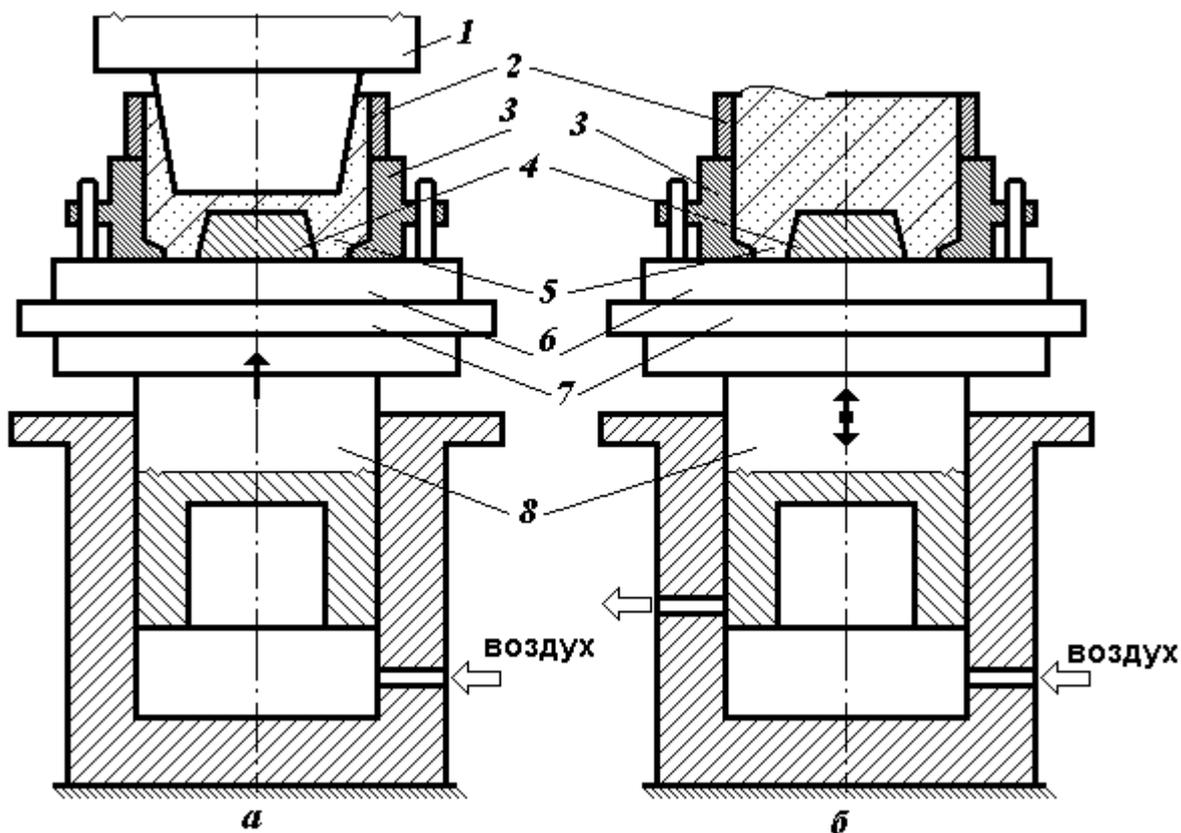


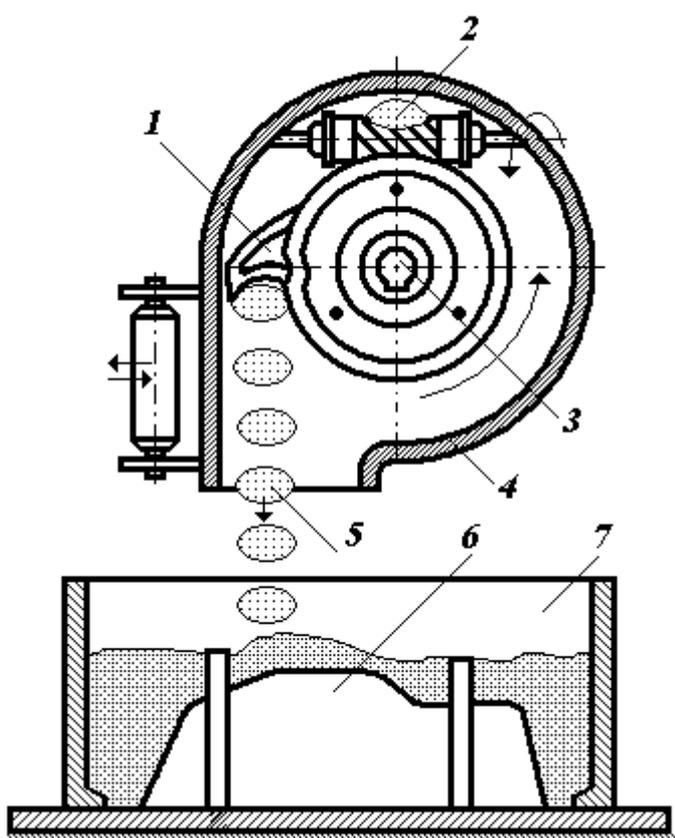
Рис. 12.8. Схемы машинной формовки: а – прессование; б – встряхивание; 1 – прессовая колодка; 2 – наполнительная рамка; 3 – опока; 4 – модель; 5 – формовочная смесь; 6 – модельная плита; 7 – рабочий стол; 8 – цилиндр.

Опока 3 с наполнительной рамкой 2 устанавливается на модельную плиту 6, закрепленную на рабочем столе 7, и засыпается формовочной смесью 5. Под действием сжатого воздуха поршень с рабочим столом 7 поднимается вверх, при этом смесь упирается в прессовую колодку 1 и уплотняется. Прессовые машины имеют высокую производительность. Однако вследствие трения формовочной смеси о стенки опоки плотность формовочной смеси уменьшается по мере удаления от прессовой колодки и не обеспечивается равномерной плотности. Неравномерность плотности формовочной смеси

тем больше, чем выше модели и опока, поэтому прессование обычно применяют для изготовления невысоких форм (до 200...250 мм) при внутренних размерах опок до 1250x800. Улучшение равномерности уплотнения формовочной смеси достигается установкой вибраторов. Такие – вибропрессовые - машины широко используются для формовки поршневых колец, крышек и других невысоких изделий.

Уплотнение формовочной смеси встряхиванием осуществляется за счет возвратно поступательного перемещения поршня 8 (рис. 12.8, б). На модельную плиту 6, закрепленную на рабочем столе машины, устанавливается опока 3 с наполнительной рамкой 2. В опоку засыпается формовочная смесь 5. Поршень с рабочим столом под действием сжатого воздуха поднимается вверх на 30...100 мм, открывая при этом в стенке цилиндра выхлопное отверстие. Давление воздуха под поршнем резко снижается, и поршень падает вниз, ударяясь о дно цилиндра. Отверстие в стенке цилиндра закрывается, и поршень снова поднимается, т.е. цикл повторяется. Удары стола о дно цилиндра повторяются с частотой 60...200 ударов в минуту. Резкое торможение формовочной смеси, падающей вместе с рабочим столом, приводит к ее уплотнению под действием сил инерции. При встряхивании обеспечивается высокая плотность смеси у модели, однако верхняя часть формы уплотняется недостаточно, поэтому применяют дополнительное ее уплотнение подпрессовкой. Встряхивающие машины обычно используются для изготовления более крупных полуформ, нежели прессовые, при внутренних размерах опок до 2500x2000 мм.

Пескометный метод формовки основан на подаче смеси вращающимся ковшом 6 (рис. 12.9). Формовочная смесь 2 поступает по транспортеру в головку пескомета 4, где подхватывается ковшом 6, закрепленным на вращающемся роторе 3. Ковш образует пакет смеси 5 и с силой выбрасывает его в опоку 7 через отверстие в головке пескомета. Соударение пакета с модельной плитой и моделью 6 приводит к уплотнению смеси. Головка пескомета может передвигаться над опокой, обеспечивая заполнение и



уплотнение всей полуформы.

Пескометры обеспечивают равномерную плотность набивки смеси и используются, чаще всего, для изготовления крупных форм. Производительность пескометров – до 50 м<sup>3</sup>/час.

Рис. 12.9. Пескометная формовка: 1 – ковш; 2 – формовочная смесь; 3 – ротор; 4 – кожух; 5 – пакет смеси; 6 – модель; 7 – опока

Пескодувный метод формовки (рис. 12.10) основан на подаче смеси в форму или стержневой ящик с помощью сжатого воздуха. Основным фактором уплотнения в этом случае является живая сила песчано-воздушной струи. Стержневая смесь 1 засыпается из бункера 2 в гильзу 5 пескострельной головки 4. Для прекращения засыпки используется шибер 3.

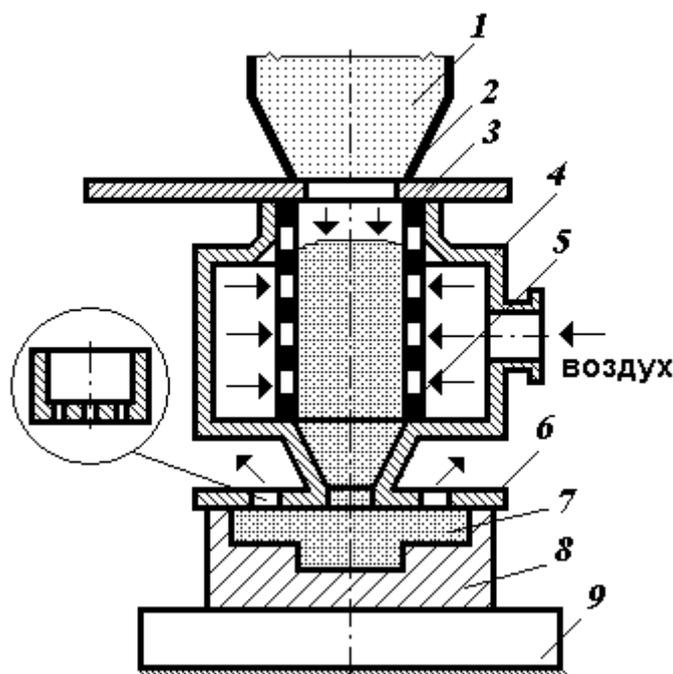


Рис. 12.10. Пескодудная формовка

1 – формовочная смесь; 2 – бункер; 3 – шибер; 4 – корпус головки; 5 – гильза;  
6 – вента; 7 – изготовленный стержень; 8 – стержневой ящик; 9 – стол.

Сжатый воздух поступает через перфорированные стенки гильзы и выдувает смесь в стержневой ящик 8. Венты 6 обеспечивают выход воздуха.

Пескодудный способ формовки обеспечивают высокую производительность, т.к. уплотнение смеси происходит за один цикл, но плотность набивки больших объемов смеси невысокая. Поэтому пескодудная формовка используются, в основном, для изготовления стержней, прочность которых определяется, главным образом, крепителями, а не плотностью набивки. Для изготовления же литейных форм чаще применяется комбинированный пескодудно-прессовый способ.

В вышеописанных процессах опоки являются обязательной формовочной оснасткой. Однако, применение безопочной формовки (рис. 12.11) позволяет снизить затраты на оснастку, ускорить охлаждение отливок, упростить выбивку и т.д. При этом пескострельная головка 4 заполняет формовочной смесью пространство между двумя модельными плитами с моделями 2 и 5, и предварительно ее уплотняет (А). Окончательное уплотнение формовочной смеси происходит при перемещении левой (прессовой) модельной плиты под

действием прессующего плунжера 1 (Б). По окончании уплотнения правая поворотная модельная плита (плита противодействия) поворачивается, и поршень перемещает ком спрессованной смеси вправо (Г), прижимая его к ранее полученным комьям 7. Отпечатки моделей, расположенные на двух сторонах комьев, образуют рабочие полости форм, заполняемые металлом при заливке. Процесс отличается высокой производительностью и широко применяется в современных литейных цехах.

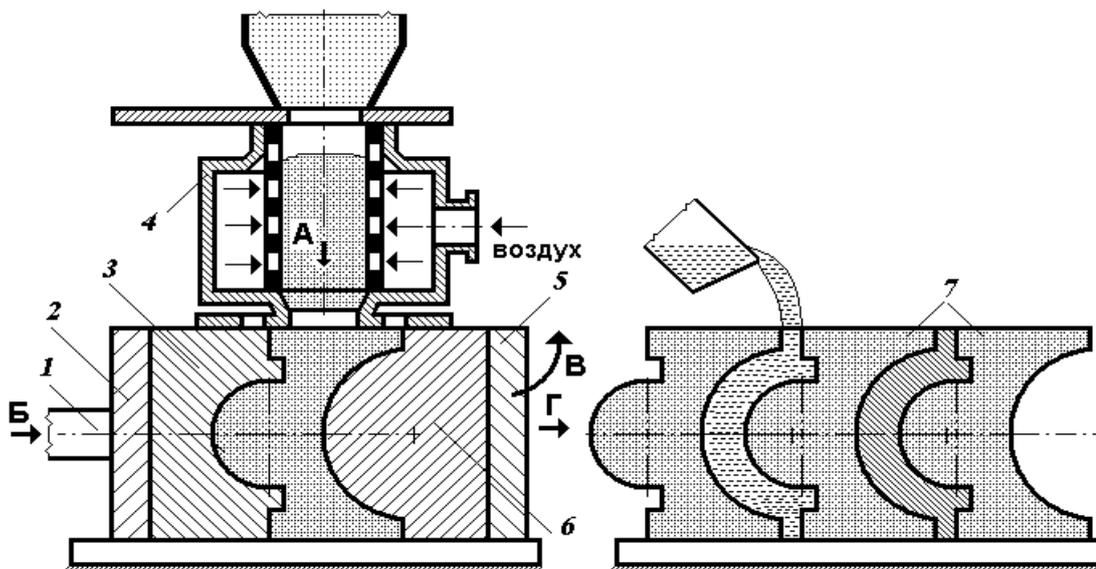


Рис. 12.11. Безопочная формовка: 1 – плунжер; 2 – прессовая плита; 3 – левая полумодель; 4 – пескострельная головка; 5 – поворотная плита противодействия; 6 – правая полумодель; 7 – полуформа; А, Б, В, Г – этапы формовки.

### Автоматизация и развитие процесса литья в песчаные формы

В современных литейных цехах широко применяются автоматизированные линии для изготовления отливок. Формовочные машины располагаются вдоль замкнутого конвейера 8 (рис. 12.12), который представляет собой ряд тележек, движущихся по рельсам.

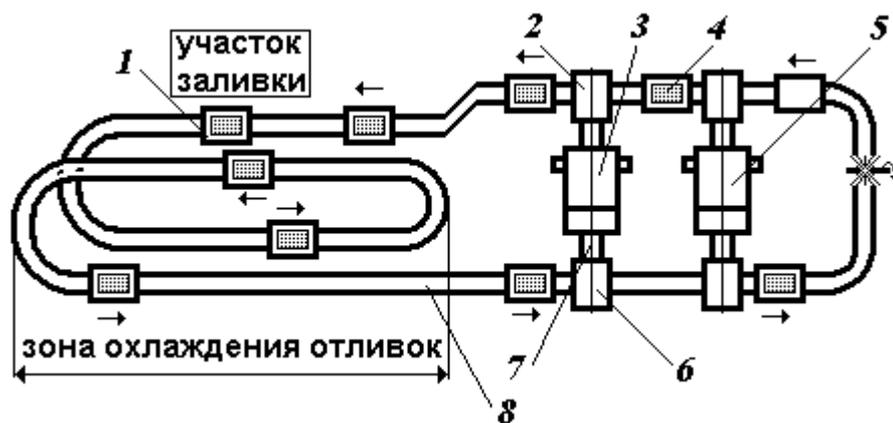


Рис. 12.12. Схема автоматической формовочной линии:

1 – заливка; 2 - сборка формы; 3 - изготовление верхней полуформы; 4 - установка стержней; 5 – изготовление нижней полуформы; 6 – распаривание опок; 7 – выбивка; 8 – замкнутый конвейер; стрелками указано направление движения конвейера.

Охлажденные формы с отливками подаются по конвейеру на поз. 6, где опоки распариваются (верхняя снимается с нижней). Опоки с остатками смеси поступают на позиции выбивки 7 и затем - к формовочным машинам, на которых производится изготовление верхней 3 и нижней 5 полуформ, соответственно. Нижние полуформы с формовочной машины направляются на позицию сборки форм 2. На позиции 4 в них устанавливаются стержни. Верхние полуформы также передаются с формовочной машины на позицию сборки форм. Собранные формы заливаются металлом на участке заливки 1 и затем охлаждаются на охлаждающей ветви конвейера.

Развитие литья в песчаные формы связано с применением перспективных материалов и технологий. В двадцатом веке нашли применение жидкие самоотвердеющие смеси (ЖСС) на жидкостекольных связующих. После заполнения формы наливной формовкой ЖСС отверждаются при продувке углекислым газом или за счет реакций с заранее введенным отвердителем, например феррохромистым шлаком. В настоящее время широкое применение получают холоднотвердеющие смеси (ХТС), содержащие в качестве связующих синтетические смолы (карбамидные, фурановые, фенольные) кислотного, аминового или эфирного отверждения.

Горячетвердеющие смеси с фенолформальдегидными и другими связующими послужили основой для литья в оболочковые формы, но применяются и для изготовления стержней. Повышение качества литых заготовок достигается также применением прогрессивных способов формовки – импульсного, пленочно-вакуумного, пескодувно-прессового и др.

Благодаря универсальности и экономичности способом литья в песчаные формы изготавливают большинство отливок, в первую очередь, из черных сплавов – чугуна и стали. Однако, механические свойства отливок невысоки, точность их размеров обычно находится в диапазоне  $IT\ 14\dots 17$ , шероховатость поверхности -  $Rz - 320\dots 20$  мкм.

### ***Специальные виды литья***

Применение специальных видов литья позволяет повысить производительность труда, точность размеров, качество поверхности и механические свойства отливок. Это достигается за счет каких-либо принципиальных изменений технологии (способа формовки, заливки) или средств технологического оснащения (моделей, форм), что увеличивает себестоимость отливок. Поэтому каждый из этих способов имеет определенные области применения, в которых достигается наибольшая эффективность.

### ***Литьё в оболочковые формы (ЛОФ)***

ЛОФ основано на применении горячетвердеющих формовочных смесей со связующими из терморезистивных смол. При нанесении смеси на горячую модельную плиту смола переходит из твердого в вязкотекучее состояние, воспроизводит очертания моделей и затем необратимо затвердевает, сохраняя полученную конфигурацию.

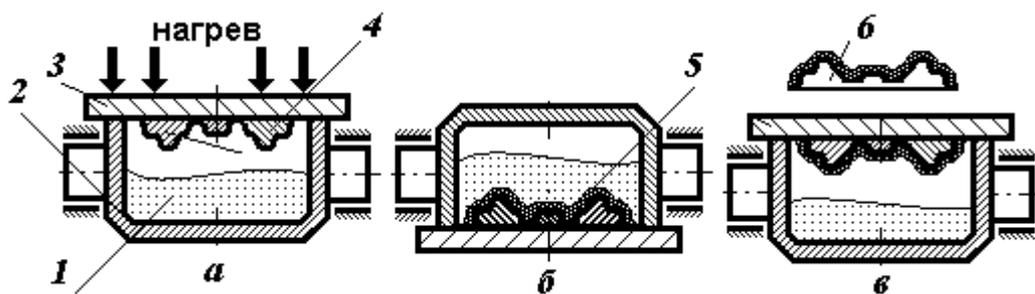


Рис. 12.13. Схема формовки при литье в оболочковые формы:  
 а – подготовка; б – обсыпка; в – переворот; 1 – формовочная смесь; 2 – бункер; 3 – модельная плита; 4 – модель; 5 – оболочка; 6 – готовая полуформа.

Технологический процесс изготовления оболочковых полуформ, осуществляемый на одно - и многопозиционных машинах, состоит из нескольких этапов: Вначале (рис. 12.13, а) производится нагрев модельной плиты 3 до температур 200...250°С и покрытие ее разделительным составом для предупреждения прилипания оболочки. Затем производится засыпка нагретой модельной плиты термореактивной смесью, состоящей из кварцевого песка и связующего - термореактивной смолы, например фенолформальдегидной. Для этого бункер 2 со смесью 1 накрывают модельной плитой и переворачивают на 180° (рис. 12.13, б). Формовочная смесь нагревается, смола переходит в вязко-текучее состояние, и смесь воспроизводит очертания модели, образуя оболочку 5, которая через 20...30 с отверждается. Затем бункер переворачивают, и незатвердевшая смесь сыпается в него, а оболочка толщиной 6...12 мм остается на модельной плите (рис. 12.13, в). Окончательное отверждение полуформы происходит при нагревании ее на модельной плите в печи при 280...320°С. При этом процесс поликонденсации смолы завершается, и полуформа приобретает заданную прочность. Оболочковая полуформа б снимается с модельной плиты при помощи толкателей.

Вторую полуформу получают аналогично на другой модельной плите. Затем производится склеивание полуформ и заливка формы расплавом.

Относительно крупные оболочковые формы перед заливкой засыпают чугунной дробью в опоках для повышения прочности.

К достоинствам ЛОФ относятся: Минимальный брак отливок по горячим трещинам и газовым раковинам, т.к. после заливки формы и ее прогрева расплавом, терморезактивная смола начинает разлагаться (при  $t > 450^{\circ}\text{C}$ ), чем обеспечивается, как незатрудненная усадка отливки, так и отвод газов.

Простота механизации и автоматизации процесса. Повышенная точность размеров ( $IT\ 13\dots 14$ ) и качество поверхности отливок ( $Rz\ 40\dots 10\ \mu\text{м}$ ). К недостаткам относятся: высокая стоимость и вредность терморезактивных смол, сложность регенерации смесей.

ЛОФ традиционно получают ответственные отливки, прежде всего из чугуна, такие как ребристые цилиндры двигателей воздушного охлаждения, коленчатые и распределительные валы и др. Однако, в связи с вредностью и энергоемкостью процесса, его все чаще заменяют на литье в песчаные формы из холоднотвердеющих смесей.

#### Литьё по выплавляемым моделям (ЛВМ)

ЛВМ основано на применении моделей из легкоплавкого состава, которые после формовки выплавляются из формы (не извлекаются механически), что позволяет получать отливки наиболее сложной конфигурации с высокой точностью размеров.

Технологический процесс литья, осуществляемый на автоматических линиях, состоит из следующих этапов: Модели отливок 1 (рис. 12.14, а) с элементами литниковой системы изготавливают в разъемной пресс-форме 2 запрессовкой в нее легкоплавкого модельного состава, например 50% парафина и 50% стеарина.

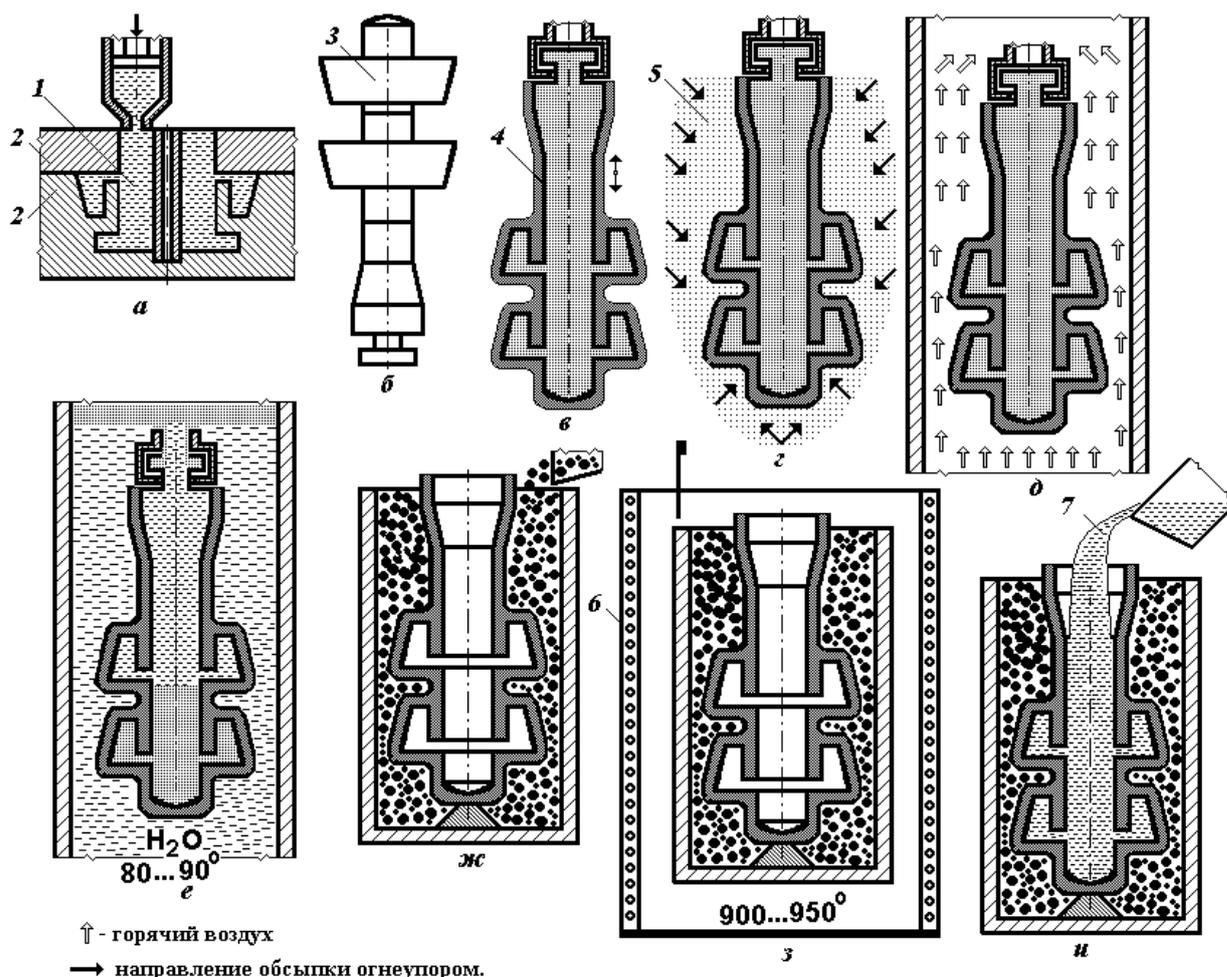


Рис. 12.14. Технология литья по выплавляемым моделям:

а – изготовление модельных звеньев; б – сборка модельного блока; в – формовка окунанием; г – обсыпка огнеупором; д – сушка; е – выплавление моделей; ж – засыпка; з – прокаливание формы; и – заливка; 1 – модель; 2 – пресс-форма; 3 – блок моделей; 4 – слой суспензии; 5 – огнеупор; 6 – нагревательная печь; 7 – расплав.

Полученные звенья моделей собирают в блоки с моделью воронки пайкой, сваркой или механически на металлической оправке. Формовка осуществляется погружением моделей в жидкую формовочную смесь. Блок моделей 3 (рис. 12.14, б) окунают в сосуд с огнеупорной суспензией, содержащей около 90 % тонко измельченного огнеупорного материала (кварцевого песка, корунда) и жидкого связующего (раствора гидролизованного этилсиликата). На поверхности модели образуется тонкий слой суспензии 4 (рис. 12.14, в). С целью увеличения толщины этого слоя его

обсыпают огнеупором 5 (рис. 12.14, з). Для получения необходимой толщины формы нанесение суспензии и обсыпку производят несколько раз с промежуточной сушкой. Каждый слой высушивают горячим воздухом (рис. 12.14, д). Просушенную форму помещают в сосуд с горячей водой (рис. 12.14, е) или ванну с модельным составом и выплавляют модели. После выплавления модельного состава форму сушат на воздухе, а затем помещают в металлический контейнер (опоку) и засыпают снаружи песком, который уплотняют вибрацией, что повышает жесткость формы (рис. 12.14, ж). Для упрочнения формы ее прокаливают в нагревательной печи 6 (рис. 12.14, з). Одновременно происходит выгорание остатков модельного состава, которые могли бы привести к образованию газовых раковин в отливках. Раскаленная форма заливается расплавом 7 (рис. 12.14, и). Высокая температура формы обеспечивает повышение жидкотекучести расплава и получение тонкостенных отливок сложной конфигурации. После кристаллизации расплава и охлаждения отливки форму разрушают. Остатки растрескавшейся керамической оболочки на поверхности отливки удаляют выщелачиванием в растворе едкого натра при температуре 120°C.

К достоинствам ЛВМ относятся: Возможность получения отливок самой сложной конфигурации с тонкими стенками – от 1 мм, т.к. нет механического извлечения моделей, а заливка осуществляется в горячую форму. Высокая точность размеров (*IT* 8...11) и качество поверхности (*Rz* 40...10 мкм), т.к. нет механического извлечения моделей и используется мелкий огнеупор. Отсутствие перекосов в отливках (форма неразъемная).

К недостаткам процесса можно отнести: Сложность технологического процесса и, соответственно, высокая стоимость отливок. Возможность окисления, обезуглероживания поверхностного слоя, крупнозернистость. Газонасыщенность отливок из-за низкой газопроницаемости формы. ЛВМ применяют, прежде всего, при производстве небольших отливок сложной конфигурации из стали и тугоплавких сплавов. Способ особенно эффективен, если отливки по качеству поверхности и точности

удовлетворяют предъявляемым к детали требованиям, и нет необходимости в последующей обработке резанием. Этим способом получают коромысла клапанов двигателей, детали швейных машин, стрелкового оружия, ювелирные изделия, а также лопатки газотурбинных двигателей, мерительный и режущий инструмент.

### Кокильное литье (КЛ)

КЛ (или литье в кокиль) – это литье, осуществляемое свободной заливкой многократной металлической формы. Главной особенностью КЛ является высокая скорость охлаждения отливок из-за большой теплопроводности формы, что имеет весьма разнообразные последствия (высокие механические свойства продукции, но пониженная стойкость самого кокиля; высокая производительность, но ограниченность минимальной толщины стенки и т.д.).

Изготавливаются кокили литьем из чугуна (СЧ20, ВЧ40 и др.) или стали (15Л, 20Л и др.) с последующей обработкой резанием (для повышения точности размеров и получения вентиляционной системы для вывода газов). Кокили бывают разъемные и неразъемные (вытряхные), с горизонтальным и вертикальным разъемом. Для получения отверстий и полостей используют стержни, чаще всего металлические, изготовленные из жаропрочных легированных сталей (30ХГС, 35ХГСА и др.). При сложной конфигурации отверстий и полостей применяют песчаные или разъемные металлические стержни.

На рисунке (рис. 12.15) изображен кокиль для получения поршня. Кокиль состоит из двух половин 1, 5 и нижней плиты 6. Для получения отверстий в поршне используются металлические стержни. Причем, если боковые стержни под поршневые пальцы 7, будут затем извлекаться из отливки без особых затруднений, то извлечь центральный стержень можно только, если он разъемный. После охлаждения отливки сначала извлекается центральная клиновидная часть 2, а затем боковые 3.

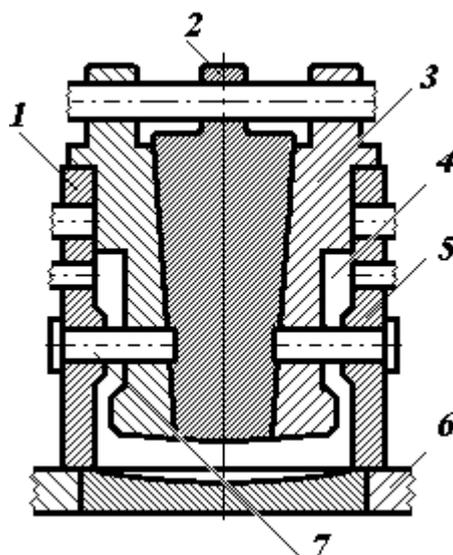


Рис. 12.15. Кокиль для получения поршня: 1 – левая половина кокиля; 2 – клиновая часть центрального стержня; 3 – боковые части центрального стержня; 4 – полость формы; 5 – правая половина кокиля; 6 – нижняя плита; 7 – боковые стержни.

Технология ЛК включает следующие операции: Подогрев кокиля перед заливкой до  $150...350^{\circ}\text{C}$  и нанесение защитного огнеупорного покрытия толщиной  $0,3...0,5$  мм (например, окиси цинка на жидкостекольном связующем при литье алюминиевых сплавов). При литье чугуна наносят достаточно толстый слой огнеупорной футеровки (футерованные кокили). Сборка кокиля, включающая соединение его частей, установку стержней. Заливка расплава через литниковую систему. Кристаллизация и охлаждение отливок до заданной температуры. Раскрытие кокиля, извлечение стержней и отливок.

К достоинствам ЛК относятся: Комплекс высоких механических свойств отливок (прочности, пластичности, ударной вязкости) благодаря образованию мелкозернистой структуры из-за высокой скорости охлаждения расплава. Повышенные точность размеров ( $IT\ 12...15$ ) и качество поверхности отливок ( $Rz\ 80...10\ \mu\text{м}$ ). Высокая производительность в результате автоматизации и сокращения трудоемких операций смесеприготовления, формовки, очистки отливок.

К недостаткам процесса можно отнести: Трудность получения тонкостенных отливок из-за высокой скорости охлаждения расплава и плохой заполняемости кокиля. Из-за интенсивного охлаждения возможно появление нежелательных структурных изменений, например отбела в отливках из чугуна. Высокие внутренние напряжения в отливках из-за большой разности температур по сечению отливки и неподатливости кокиля. Относительно высокая стоимость кокиля.

Наиболее широко ЛК применяется для получения ответственных отливок из цветных сплавов (на основе алюминия, меди и др.) в серийном и массовом производстве, например головок блоков цилиндров, поршней и т.д. отливки из чугуна ЛК получают при необходимости искусственно вызванного отбела на поверхности и, соответственно, высокой износостойкости у прокатных валков, распределительных валов и др.

#### Литьё под давлением (ЛД).

ЛД характеризуется принудительным заполнением формы расплавом под избыточным давлением. Металлические формы для ЛД, называемые пресс-формами, имеют более сложную конструкцию и изготавливаются более тщательно, чем кокили. Формы и стержни для литья под давлением делают стальными. Применение песчаных стержней исключено, т.к. струя металла под давлением может их разрушить. Для осуществления процесса необходимо применение специальных машин, которые могут быть с вертикальной и горизонтальной, с горячей и холодной камерой прессования. Принципиальная схема получения отливки на машине для ЛД с холодной горизонтальной камерой прессования поршневого типа приведена на **рис. 12.16.**

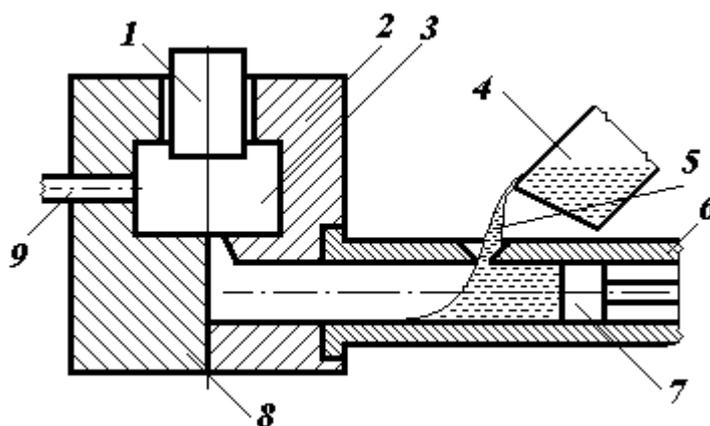


Рис. 12.16. Схема литья под давлением: 1 - стержень, 2 - неподвижная половина пресс-формы; 3 - рабочая полость; 4 – ковш; 5 – расплав; 6 - камера прессования; 7 – поршень; 8 - подвижная половина пресс-формы; 9 – выталкиватель.

Технология литья под давлением обычно включает следующие операции: Подогрев пресс-формы до 120...300°С для снижения температурного перепада и повышения разгаростойкости; Смазка - опрыскивание полости пресс-формы разделительным составом. Соединение половин пресс-формы 2 и 8, установка стержня 1. Заливка расплава 5 в окно камеры прессования 6 и подача металла под давлением поршня 7 в полость пресс-формы 3 (запрессовка). Кристаллизация и охлаждение металла до заданной температуры. Извлечение стержня из отливки, раскрытие пресс-формы, извлечение отливки из формы с помощью выталкивателей 9.

Преимущества ЛД перед другими способами: Наиболее высокая для литья производительность (до 1000 отливок/час). Наиболее высокие точность размеров ( $IT\ 8...13$ ) и качество поверхности отливок ( $Rz\ 10...40\ \mu\text{м}$ ). Наименьшая толщина стенок отливок (от 0,4 мм для сплавов на основе цинка). Недостатки способа: Газовая пористость отливок (из-за быстрого заполнения формы и затрудненного выхода газов), что ведет к снижению плотности, механических свойств и ограничивает возможности упрочнения сплавов термообработкой. Прочность повышают путем армирования отливок – установки в пресс-форму стальных упрочняющих элементов, которые остаются в отливке. Габаритные размеры отливок ограничиваются усилием

запирания пресс-формы (до 12,5МН). С увеличением температуры заливки резко снижается стойкость пресс-форм, которые выдерживают: 150...300 тыс. запрессовок при литье сплавов алюминия; 50...80 тыс. – магния; 5...10 тыс. - меди.

ЛД широко применяется в серийном и массовом производстве тонкостенных отливок из цветных сплавов. В машиностроении способ применяют для изготовления широкой номенклатуры корпусных отливок, в том числе в автомобилестроении – для блоков цилиндров, картеров, а также крышек генераторов и других армированных отливок. Для решения проблем газонасыщенности отливок применяют вакуумирование пресс-формы, регулирование состава газов в ней.

#### Центробежное литьё (ЦЛ)

ЦЛ – это литье, осуществляемое при заливке расплава в металлическую вращающуюся форму. При ЦЛ заливка и кристаллизация расплава происходит в поле действия центробежных сил, что благоприятно сказывается на строении и свойствах отливок.

Для центробежного литья применяют специальные формы - центробежные изложницы, изготавливаемые обычно из чугуна с внутренней огнеупорной облицовкой. Процесс осуществляется на специальных машинах с горизонтальной (рис. 12.17, а), вертикальной (рис. 12.17, б) или наклонной осью вращения.

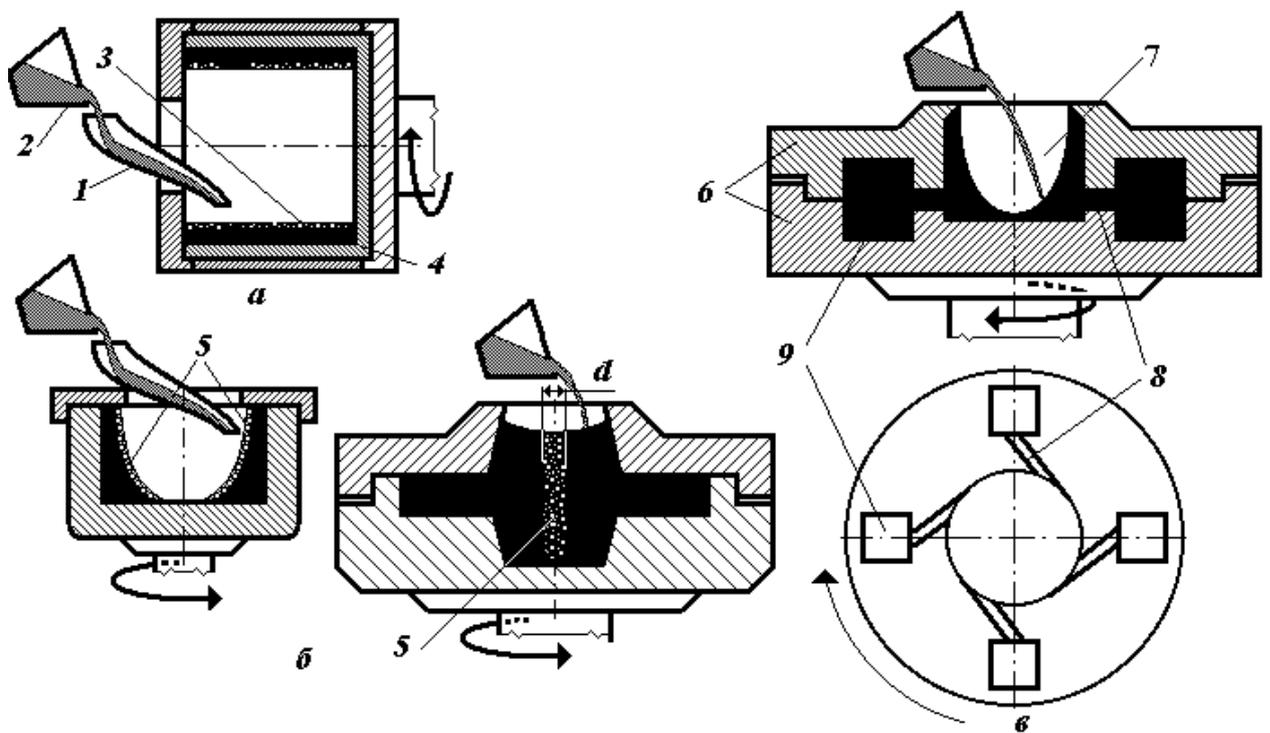


Рис. 12.17. Схемы центробежного литья:

а – с горизонтальной осью вращения; б - с вертикальной осью вращения; в - центрифугирование; 1 – заливочный желоб; 2 – ковш; 3 – отливка; 4 – изложница; 5 - дефектный слой; 6 - полуформы; 7 - стояк; 8 - питатели; 9 – форма; d – диаметр дефектного слоя.

Технология ЦЛ включает следующие операции (рис. 12.17): Покрытие внутренней поверхности изложницы 4 огнеупорным составом для снижения термохимического взаимодействия с расплавом; Установка крышки, препятствующей вытеканию металла из формы или позволяющей усложнить конфигурацию отливки. Приведение изложницы во вращение. Заливка расплава из ковша 2 по желобу 1 во вращающуюся форму. Охлаждение отливки до заданной температуры. При этом происходит направленная кристаллизация расплава - от наружной поверхности отливки к внутренней. Более тугоплавкие составляющие литейного сплава, закристаллизовавшиеся первыми (как более тяжелые), центробежными силами смещаются к периферии, а менее тяжелые (в том числе шлаковые включения и газы) - к внутренней свободной поверхности. За счет этого происходит очистка

металла от примесей и повышение механических свойств. Снятие крышки и извлечение отливки 3 из формы.

На машинах с вертикальной осью вращения (рис. 12.17, б) металл из ковша заливают в изложницу сверху. Центробежными силами расплав прижимается к боковой цилиндрической стенке, образуя жидкий кольцевой слой. Форма вращается до полного затвердевания и охлаждения металла, после чего ее останавливают и извлекают отливку. При вертикальной оси вращения отливки имеют параболическую внутреннюю поверхность. Толщина верхней части отливки меньше, чем нижней, т.к. под действием силы гравитации металл стекает вниз. Таким способом получают отливки небольшой высоты (короткие втулки, кольца, венцы червячных зубчатых колес и др.). Получать отливки без центрального отверстия (рис. 12.17, б) нежелательно, т.к. центральная их часть всегда будет иметь дефекты строения 5 – пористость и неметаллические включения. Для производства труб применяют труболитейные машины с наклонной осью вращения. Ось вращения изложницы имеет наклон ( $\sim 5^\circ$ ), что наряду с наличием подвижного желоба, позволяет получать трубы длиной до 10 м.

Достоинства ЦЛ: Высокое качество металла отливки из-за плотной структуры, отсутствия неметаллических включений и пористости. Способ характеризуется наиболее высоким технологическим выходом годного из-за отсутствия затрат металла на литниковую систему. Отсутствие стержней для оформления центральных отверстий ведет к существенной экономии. На рис. 12.17, в приведена схема использования центробежных сил для повышения плотности отливок – центрифугование. Дефекты в этом случае располагаются в стояке 7, а качество самих отливок повышается. Этим способом трудно получать отливки из сплавов, склонных к ликвации, которая, в данном случае, инициируется центробежными силами. Получаемые центральные отверстия имеют невысокую точность размеров и качество поверхности, что вызывает необходимость снятия больших припусков при последующей обработке резанием.

ЦД чаще всего применяется для получения отливок из чугуна и медных сплавов в форме тел вращения: труб, втулок, колец и др., например, гильз цилиндров и поршневых колец двигателей.

Кроме описанных выше применяют много других специальных видов литья: литье под регулируемым давлением, вакуумным всасыванием, электрошлаковое и др., которые позволяют повысить качество отливок.

### ***12.3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОТЛИВОК ИЗ РАЗЛИЧНЫХ СПЛАВОВ***

В отечественном машиностроении около 70% всех отливок изготавливают из чугуна, около 17% - из стали, остальное - из цветных сплавов.

#### ***Производство отливок из чугуна***

Плавка чугуна осуществляется в вагранках и в электропечах. Вагранка - это печь шахтного типа, принцип работы которой похож на принцип действия доменной печи. Стальной кожух футеруется изнутри огнеупорным материалом, обычно шамотом. Загрузка шихты осуществляется порциями (колошами) с помощью подъемника. В состав металлической колоши могут входить доменные чушковые чугуны, чугунный и стальной лом, возврат (литники и брак), брикетированная стружка, природно-легированные чугуны и ферросплавы. Вагранка обычно работает на коксе, а в качестве флюса используется известняк. Топливо (кокс) - сгорает в струе воздуха, вдуваемого через фурмы, шихта расплавляется и происходят химические реакции, необходимые, прежде всего, для удаления из чугуна избытка примесей. Жидкий чугун вытекает в копильник, установленный перед вагранкой и оттуда раздаточными ковшами подается на заливку. Электрические плавильные печи - дуговые и индукционные, широко используемые в современных литейных цехах, - позволяют повысить технико-экономические и санитарно-гигиенические показатели плавки.

Важнейшими факторами, определяющими структуру чугуновой отливки, являются химический состав и скорость охлаждения. Углерод и кремний способствуют образованию графита, т.е. являются графитизирующими

элементами. Сера и хром препятствуют графитизации - увеличение их содержания приводит к образованию структуры белого чугуна (отбелу). Содержание серы и фосфора в чугуне должно быть ограничено, так как сера, кроме того, снижает жидкотекучесть, а фосфор придает чугуну хрупкость. Скорость охлаждения отливки влияет на образование той или иной структуры чугуна. С увеличением скорости охлаждения отливки повышается содержание в чугуне цементита (уменьшается содержание свободного углерода), с уменьшением скорости охлаждения отливки увеличивается содержание в чугуне графита. Поэтому отливки со стенками разной толщины (охлаждающиеся с различной скоростью) при одном и том же химическом составе имеют разную микроструктуру, а, следовательно, и прочность. Толстая часть отливки, охлаждающаяся медленнее, содержит больше графита, ее металлическая основа мягкая, ферритная. По мере уменьшения толщины стенки отливки (увеличения скорости охлаждения) уменьшается количество графита, металлическая основа становится более прочной, так как в ней увеличивается доля перлита. В самых тонких частях отливки может образоваться структура белого чугуна. Отбел, получающийся в тонких частях и на поверхности отливки, охрупчивает ее и затрудняет дальнейшую обработку резанием, так как цементит, входящий в состав белого чугуна имеет очень высокую твердость и хрупок. Для устранения отбела отливки подвергают отжигу, т.е. нагреву, выдержке при температуре 900°C и медленному охлаждению. При этом цементит распадается с образованием углерода отжига - в виде хлопьевидного графита. Иногда получение отбеленного слоя на поверхности отливок необходимо для увеличения его твердости и износостойкости (например, поверхность кулачка распределительного вала). В этом случае в форму устанавливаются холодильники (чугунные или стальные вставки), обеспечивающие увеличение скорости охлаждения поверхности отливок. Серый чугун является самым дешевым и наиболее распространенным материалом для изготовления различных отливок. Он обладает хорошими

литейными свойствами - высокой жидкотекучестью и низкой усадкой (1%), что позволяет получать из него отливки самой сложной конфигурации.

Механические свойства серого чугуна повышаются путем модифицирования. При модифицировании в жидкий чугун за 5...10 минут до разливки вводят в измельченном виде небольшое количество (до 1%) модификатора - ферросилиция, силикокальция и др. Мелкие частицы модификатора увеличивают число центров кристаллизации (зародышей) и тем самым приводят к измельчению зерен в структуре отливки, а, следовательно, и к увеличению ее прочности. Так получают чугуны СЧ24...СЧ35.

Заэвтектический ферритный серый чугун состоит из мягкого и пластичного феррита и пластинок графита, т.е. почти весь углерод находится в свободном состоянии. Из-за низкой прочности его применяют для отливок неответственного назначения: СЧ10 - малоответственные отливки (строительные колонны, фундаментные плиты); СЧ15 - малонагруженные детали сельскохозяйственных машин, станков, автомобилей.

Доэвтектический перлитно-ферритный серый чугун в своей структуре содержит перлит, феррит и графит. В этом чугуне часть углерода находится в графите, а часть - связана с железом (в цементите, входящий в состав перлита) и феррите. Этот чугун обладает повышенной прочностью, его широко используют для получения машиностроительных отливок: (СЧ20, СЧ25, СЧ30, СЧ35 - станины станков, картеры коробок передач, тормозные барабаны). Эвтектический перлитный серый чугун состоит из перлита и пластинчатого графита. Углерод, как и в феррито-перлитном чугуне, находится частично в свободном состоянии – в виде графита, а частично в виде цементита перлита. Этот чугун обладает высокой прочностью (благодаря прочности перлита) и используется для получения отливок ответственного назначения.

Чугун с вермикулярным графитом имеет более высокую прочность, чем серый чугун, и превосходит его по показателям пластичности ( $\delta$  до 3%). Обладая, кроме того, хорошими литейными свойствами, чугун с

вермикулярным графитом позволяет изготавливать ответственные отливки с толщиной стенок до 500 мм.

В высокопрочном чугуна графит имеет наиболее компактную шаровидную форму. Для получения графита шаровидной формы чугун модифицируют магнием, церием и титрием. Чугун, подвергаемый модифицированию, должен быть низкосернистым, так как повышенное содержание серы приводит к увеличению расхода модификатора и к образованию дефектов структуры. Жидкотекучесть высокопрочного чугуна почти такая же, как и у серого чугуна, при одном и том же химическом составе и прочих равных условиях (температуре заливки, скорости охлаждения и др.). Линейная усадка высокопрочного чугуна выше, чем серого, что затрудняет изготовление отливок без усадочных дефектов и часто требует применения прибылей. Высокопрочный чугун используется для изготовления ответственных отливок: коленчатые и распределительные валы автомобилей, детали прокатного, кузнечно-прессового и горнорудного оборудования, а также дизелей, паровых, газовых и гидравлических турбин и т.д. Отливки изготавливаются всеми рассмотренными выше способами, кроме литья под давлением.

Ковкий чугун используется для изготовления ответственных деталей, работающих при динамических и знакопеременных нагрузках. Из ферритных чугунов (КЧ 30-6, КЧ 33-8, КЧ 35-10 КЧ 37-12) изготавливают фланцы, кронштейны рессор, картеры редукторов, ступицы, пробки системы охлаждения. Из перлитных чугунов (КЧ 45-7, КЧ 50-5, КЧ 55-4, КЧ 60-3, КЧ 65-3, КЧ 70-2, КЧ 80-1,5) - вилки карданных валов, втулки, муфты, тормозные колодки, звенья и ролики цепей конвейеров.

Однако, в связи со сложностью технологии получения и высокой стоимостью, ковкий чугун все чаще заменяется чугуном с вермикулярным графитом.

Из легированного чугуна изготавливают детали, работающие в условиях значительного износа и больших механических нагрузок. хромистые чугуны

ЖЧХ1...ЖЧХ30 применяются для изготовления жаростойких и износостойких отливок, никелевые – ЧНХТ, ЧН15Д3Ш (нирезист), ЧН20Д2Ш (никросилал) и др. – для износостойких и коррозионностойких.

### *Производство стальных отливок*

Стали, применяемые для изготовления отливок по ГОСТ 977-88, делятся на углеродистые и легированные. Углеродистые стали – качественные - содержат от 0,15 до 0,55 % С (ГОСТ 977-88) и маркируются, соответственно, 15Л...55Л, где буква "Л" обозначает принадлежность к литейным сталям.

Низкоуглеродистая сталь имеет феррито-перлитную структуру (с преобладанием феррита) с невысокой прочностью. С повышением содержания углерода увеличивается количество перлита в структуре отожженной стали, при этом прочность возрастает, а пластичность падает. Литейные стали имеют более низкие литейные свойства, чем чугуны. Усадка углеродистой стали значительно больше усадки серого чугуна, что приводит к необходимости борьбы с усадочными дефектами путем установки в форме прибылей, питающих бобышек и холодильников. Жидкотекучесть стали меньше, чем чугуна, что требует более высокой температуры заливки, повышенной суммарной площади сечения питателей и применения прибылей.

Для плавки литейных сталей обычно используют электропечи. В качестве шихтовых материалов применяют стальной лом, отходы собственного производства, передельный чугун, флюсы и др. Отливки из сталей чаще всего получают литьем в песчаные формы, по выплавляемым моделям, под давлением. Литая сталь имеет крупнозернистую структуру и низкие механические свойства. Для измельчения структуры, снятия внутренних напряжений и повышения свойств отливки подвергают отжигу, нормализации и другим видам термической обработки.

Область применения литейных углеродистых сталей: сталь 15Л - неотчетственные детали; сталь 25Л - корпусные детали; сталь 30Л - станины,

ступицы колес; сталь 35Л - балки задних мостов; сталь 45Л - зубчатые колеса, тормозные диски; сталь 55Л - валки горячей прокатки.

Легированные стали используют в энергомашиностроении, химической и нефтегазовой промышленности, металлургии и пр. Из них изготавливают турбинные лопатки, клапаны гидропрессов, арматуру химической промышленности и др. Например, высоколегированная сталь 110Г13Л (сталь Гадфильда), содержащая ~1,1% углерода и ~13% марганца, применяется для производства особоизносостойких деталей.

### ***Производство отливок из алюминиевых сплавов***

Для производства отливок применяют алюминиевые сплавы на основе систем *Al-Si*, *Al-Cu*, *Al-Mg* и др. по ГОСТ 1583-93.

Литейные алюминиевые сплавы отличаются высокой удельной прочностью, пластичностью, обрабатываемостью резанием, стойкостью к окислению.

Наиболее распространенные сплавы - силумины (сплавы на основе системы *Al-Si*) - имеют высокую жидкотекучесть и небольшую усадку, большинство остальных литейных алюминиевых сплавов имеют более низкую жидкотекучесть, повышенную усадку, в расплавленном состоянии сильно поглощают водород, что ухудшает свойства.

Плавку алюминиевых сплавов осуществляют обычно в электрических печах сопротивления и индукционных печах. Для защиты расплава от окисления и газонасыщения плавку ведут под слоем покровного флюса, представляющего собой смесь хлористых солей натрия и калия. Перед разливкой алюминиевые сплавы подвергают рафинированию, задача которого заключается в очищении жидкого сплава от газов, оксидов и неметаллических включений.

Рафинирование производят, например, пропусканием через ванну жидкого металла газообразного хлора, который захватывает растворенные газы и неметаллические включения. Для повышения механических свойств силумины подвергают модифицированию хлористыми и фтористыми солями натрия и калия, в результате чего улучшается структура сплава.

Основными методами получения отливок из алюминиевых сплавов являются литье в кокиль, под давлением, в песчаные формы. Из-за высокой склонности к газонасыщению алюминиевых сплавов применяют фильтрацию расплавов через сетчатые фильтры в литниковой системе (для удаления неметаллических включений), расширяющиеся литниковые системы (для плавного заполнения литейных форм и уменьшения окисления) и т.д. Отливки из алюминиевых сплавов широко используются в авиационной и ракетной технике, автомобильной, приборостроительной, машиностроительной, судостроительной и электротехнической промышленности. Из алюминиевых сплавов изготавливают блоки цилиндров, головки блоков, корпуса насосов, судовые винты, авиационные детали и др.

### ***Производство отливок из магниевых сплавов***

Магниевые сплавы имеют малую плотность и, соответственно, высокую удельную прочность при  $\sigma_{\text{в}}$  до 450 МПа, приемлемую пластичность ( $\delta$  до 9%). Они хорошо работают при динамических нагрузках, имеют удовлетворительную коррозионную стойкость, хорошо обрабатываются резанием. Упрочняющая термическая обработка значительно повышает механические свойства магниевых сплавов. Магниевые сплавы легко окисляются, сильно растворяют водород и склонны к самовозгоранию при плавке и заливке форм. Поэтому плавку магниевых сплавов проводят в тигельных электрических печах сопротивления и индукционных печах под слоем хлористых флюсов или в среде защитных газов. Для измельчения зерна сплавы модифицируют, например, введением углеродсодержащих веществ (мела, мрамора и др.). Для предотвращения возгорания сплава при заливке форм струю расплавленного металла припыливают порошком серы, связывающий кислород воздуха.

Магниевые сплавы имеют низкие литейные свойства - пониженную жидкотекучесть, повышенную усадку, склонны к образованию трещин. Для

получения отливок из магниевых сплавов применяют литье в песчаные формы, в кокиль и другие способы. Для предупреждения образования усадочных раковин и пористости в формах предусматривают прибыли и холодильники, в формовочные смеси добавляют серу и борную кислоту, обеспечивают плавный подвод расплава через расширяющиеся литниковые системы, сам расплав фильтруют для очистки от неметаллических включений.

Для отливок наибольшее применение нашли сплавы систем *Mg-Al-Zn* и *Mg-Zn*. Из этих сплавов изготавливают корпуса приборов, детали двигателей - крышки головок блоков цилиндров, картеры, бензوماлярную аппаратуру и др.

### ***Производство отливок из медных сплавов***

Медные сплавы обладают достаточно высокой прочностью, пластичностью, коррозионной стойкостью и высокими антифрикционными свойствами.

Оловянные бронзы имеют хорошую жидкотекучесть, относительно высокую усадку (до 1,6%), в отливках из этих бронз из-за большого интервала кристаллизации часто образуется пористость. Безоловянные бронзы также обладают высокой жидкотекучестью, но усадка у них выше, чем у оловянных (до 2...2,4 %), что вызывает опасность образования усадочных раковин.

Литейные латуни отличаются довольно высокой прочностью ( $\sigma_B$  до 705 МПа), пластичностью ( $\delta$  до 20%), антикоррозионными и антифрикционными свойствами. Латуни имеют удовлетворительную жидкотекучесть, но высокую усадку (до 2,2 %), в отливках часто имеются и усадочные раковины и пористость. Все медные сплавы склонны к образованию трещин.

Медные сплавы плавят в индукционных канальных низкочастотных печах, дуговых с горизонтальным расположением электродов под слоем древесного угля, либо в среде защитных газов или в вакууме.

Для получения отливок из медных сплавов применяют литье в песчаные и оболочковые формы, реже - кокильное, центробежное, под давлением. Для

предупреждения образования усадочных раковин и пористости, в форме предусматривают прибыли и холодильники. Для предупреждения появления трещин используют литейные смеси с высокой податливостью. Способы борьбы с неметаллическими включениями те же, что и для других цветных сплавов – применение фильтров, расширяющихся литниковых систем и др. Из оловянных бронз изготавливают арматуру, шестерни, подшипники, втулки и др. Безоловянные бронзы используют как заменители дорогих оловянных. Их применяют для изготовления гребных винтов крупных судов, шестерен и зубчатых колес, корпусов насосов, деталей химической аппаратуры. Латунни применяют для изготовления различной арматуры для морского судостроения, втулок и сепараторов подшипников, деталей прокатных станов.

### ***Производство отливок из сплавов на основе никеля***

Для производства отливок используют жаропрочные сплавы никеля с хромом (до 22%), вольфрама и молибдена (для твердорастворного упрочнения), с добавками алюминия и титана (для дисперсного упрочнения), микродобавок бора и циркония (для измельчения зерен и очистке их границ). После закалки и старения сплавы имеют высокую длительную прочность при температурах 800...1200°C благодаря мелкодисперсным частицам интерметаллидов  $Ni_3Al$  и  $Ni_3(Al, Ti)$ . Это позволяет изготавливать из них особо ответственные детали для высокотемпературной эксплуатации – лопатки газовых турбин, сопла и камеры сгорания газотурбинных двигателей, и др.

Литейные никелевые сплавы плавят в индукционных печах под слоем флюса с последующей продувкой инертными газами для дегазации. Отливки получают литьем по выплавляемым моделям, что позволяет получать почти готовые изделия с высокой точностью размеров и минимальной шероховатостью поверхности, требующие только электрополировки.

Наиболее высокое качество отливок достигается при плавке и заливке в вакууме, и при направленной кристаллизации металла в форме.

### ***Изготовление отливок из тугоплавких сплавов***

Поскольку температурный порог эксплуатации сплавов напрямую связан с температурой плавления основы, для изделий, работающих при высоких температурах применяются сплавы тугоплавких металлов – молибдена, вольфрама, титана и др. Для повышения жаропрочности литых сплавов используется механизм дисперсионного твердения.

Все тугоплавкие металлы склонны к поглощению газов при высоких температурах, что ведет к охрупчиванию изделий. Поэтому плавку и заливку проводят в вакууме или в среде инертных газов. Поскольку сплавы трудно обрабатываются резанием, сложные отливки из них получают литьем по выплавляемым моделям в формы из графита и тугоплавких оксидов циркония.

В машиностроении широко применяются сплавы на основе титана. Благодаря низкой плотности титана его сплавы отличаются наиболее высокой удельной прочностью, а также коррозионной стойкостью. Благодаря узкому интервалу кристаллизации титановые литейные сплавы отличаются хорошими литейными свойствами – жидкотекучестью, малой линейной усадкой (около 1%). Литые заготовки получают, как правило, в разовых графитовых и керамических оболочковых формах. Для повышения механических свойств дополнительно может проводиться термоводородная обработка и горячее изостатическое прессование. Титановые сплавы их применяются в судостроении, авиастроении, электронной и вакуумной технике.

### ***12.4. ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ***

Конструкция литой детали должна обеспечивать высокий уровень механических и служебных характеристик. При разработке такой конструкции обычно удается спроектировать ее в нескольких вариантах, равноценных с точки зрения работоспособности. Однако эти варианты могут

существенно отличаться по сложности изготовления отливки, обусловленной особенностями литейного производства. Нерациональность конструкции литой детали приводит к увеличению трудоемкости изготовления моделей, перерасходу формовочных и стержневых смесей, усложнению процесса формовки, образованию различных дефектов в отливках.

Особенное влияние на процесс формовки оказывает конфигурация внешней поверхности отливки. В ряде случаев изменение внешних очертаний детали, не влияющее на ее работоспособность, приводит к упрощению технологического процесса и снижению себестоимости изготовления отливки.

Бобышки необходимо выполнять на одной высоте (рис. 12.18, а), чтобы при изготовлении модели была возможность их совместной обработки за один проход без переналадки станка. Криволинейное очертание кронштейнов (рис. 12.18, б), неоправданно усложнит изготовление модели. Выступающие бобышки, расположенные выше плоскости разъема (рис. 12.18, в), приведут к необходимости использовать формовку с отъемными частями или применить дополнительные стержни. Желательно избегать конструкций с консольными стержнями (рис. 12.18, г). В корпусных деталях желательно выполнять открытые полости (рис. 12.18, д). При выполнении внутренних полостей желательно избегать многоступенчатости, так как из-за усадки отливки в ней могут возникнуть горячие или холодные трещины. Ребра жесткости желательно располагать во взаимно-перпендикулярных направлениях относительно плоскости разъема (рис. 12.18, е). В конструкциях с внутренней полостью необходимо учитывать высокую вероятность пригара из-за перегрева стержня внутри полости (рис. 12.18, ж). На отливках, подвергаемых механической обработке, имеются базовые поверхности, которые служат опорой для крепления отливки на станке при механической обработке.

нетехнологичные технологичные

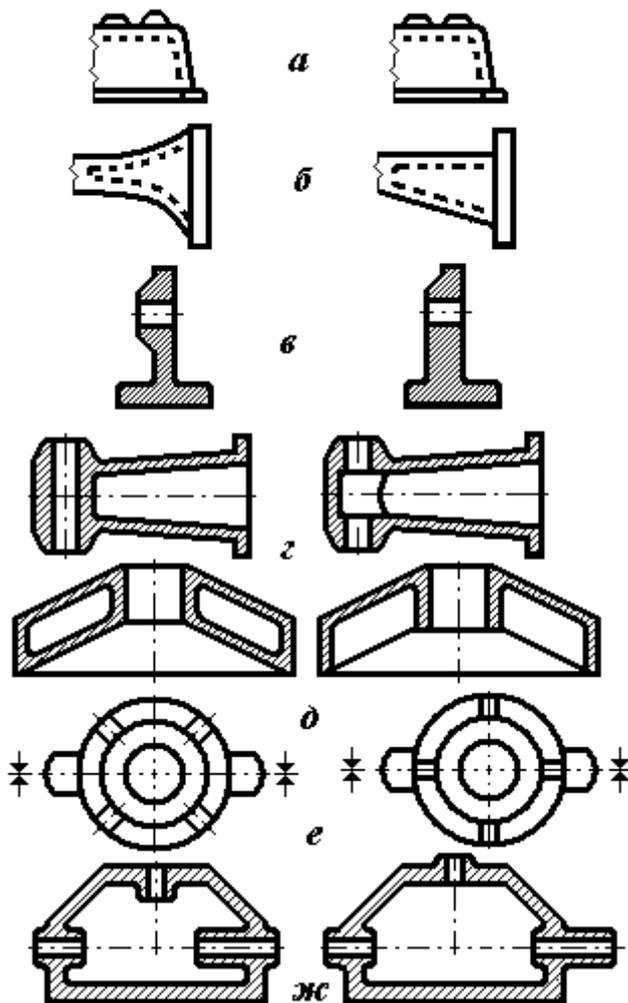


Рис. 12.18. Нетехнологичные и технологичные конструкционные исполнения (а...ж) литых деталей.

Базовую и обрабатываемую поверхности располагают в одной полуформе или стержне, не допуская пересечения их плоскостью разъема. При конструировании литой детали желательно предусмотреть

равномерную толщину стенок в отливке, так как различные по толщине части отливки охлаждаются неравномерно, что приводит к образованию внутренних напряжений, вызывающих коробление отливок, образование трещин. Для крупных отливок, изготовленных из сплавов, имеющих большую объемную усадку, при изготовлении формы предусматривают прибыли. Прибыль должна затвердевать в последнюю очередь, поэтому она должна быть массивной. Располагают прибыль на самых толстых частях отливки. При производстве сравнительно небольших по сечению отливок устранение усадочных дефектов достигается созданием конструкции отливки с равномерной толщиной стенок без большого скопления металла в отдельных местах.

При конструировании литой детали желательно предусмотреть равномерную толщину стенок отливки, т.к. различные по толщине части охлаждаются

неравномерно, следовательно, и уменьшение их размеров происходит с различной скоростью. Эта неравномерная усадка тонких и толстых частей отливки приводит к образованию внутренних напряжений, которые могут вызвать коробление и даже образование трещин в отливках. Возникновение внутренних напряжений в отливке маховика, имеющего тонкие спицы и массивный обод (рис. 12.19, а), объясняется тем, что спицы охлаждаются быстрее, чем обод. Однако отрыва спиц от обода не происходит, т.к. при усадке спицы вытягивают из обода металл, который находится в пластичном состоянии. Таким образом, длина спиц после охлаждения не меняется. После того, как в процессе охлаждения обод приобретает упругие свойства, усадка его будет затруднена остывшими жесткими спицами. Возникающие при этом напряжения могут привести к образованию в отливке трещин. Для уменьшения внутренних напряжений спицы в таких отливках выполняют изогнутыми (рис. 12.19, б). В этом случае при усадке обода уменьшение диаметра приведет к дополнительному их изгибу. При этом изгибающие напряжения в изогнутой спице будут незначительны, по сравнению со сжимающими в прямой спице. Снижению внутренних напряжений способствуют также наклонные спицы в шкивах и маховиках (рис. 12.19, в).

Конструкция детали оказывает существенное влияние на образование усадочных пустот. Затвердевание отливки начинается с образования корочки металла на ее поверхности, температура этой корочки ниже, чем температура расплава внутри нее. После полного охлаждения отливки объем жидкости, заключенной в первоначальной твердой оболочке, уменьшится больше, чем объем самой оболочки, в результате чего внутри отливки образуются полости, не заполненные металлом. Поскольку давление внутри усадочной раковины ниже атмосферного, последнее деформирует корку и на поверхности отливки образуется утяжина. В местах скопления металла будут образовываться концентрированные усадочные раковины и пористость. Такие скопления металла образуются обычно при неправильном сопряжении стенок корпусных деталей при конструировании.

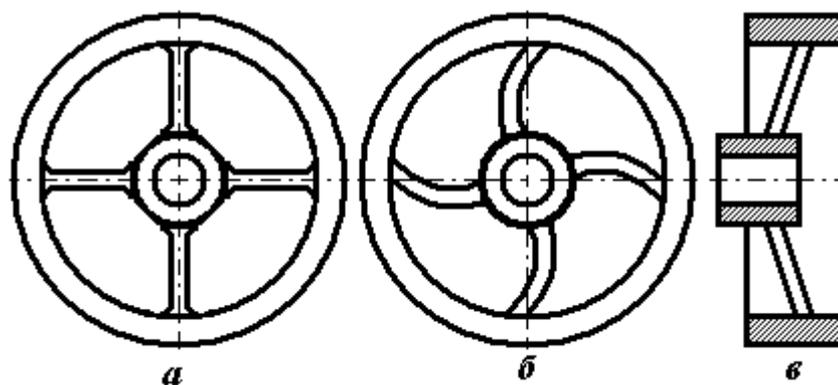


Рис. 12.19. Примеры конструирования маховиков: а – нетехнологично; б, в – технологично.

Специальные виды литья предъявляют дополнительные требования к технологичности конструкции деталей. Так, литьем по выплавляемым моделям можно получать отливки с толщиной стенки от 1 мм при соотношении толщин стенок до 1:4. Увеличение прочности отливок достигается применением ребер жесткости, а не увеличением толщины стенок, т.к. в толстых стенках вероятно появление газовой и усадочной пористости. Следует избегать узких полостей и глубоких пазов, их глубина не должна превышать двойной ширины. Внутренние полости в деталях нежелательно проектировать с уширениями. Отверстия под крепеж (диаметром от 2 мм) выполняют с посадочными поверхностями на выступах и бобышках на наружных поверхностях детали - во избежание усложнения пресс-форм для получения моделей.

Литьем в оболочковые формы получают отливки с толщиной стенки, как правило, 2...12 мм с отверстиями диаметром от 6 мм. Желательно, чтобы конфигурация наружной поверхности детали была не очень сложной, чтобы можно было получать отливку в форме с одной плоскостью разъема без отъемных частей у модели.

При литье в кокиль следует учитывать главные особенности процесса – использование металлической формы и высокую скорость охлаждения отливки. Наружная конфигурация литой детали должна быть, по

возможности, не очень сложной, чтобы обеспечить минимальное количество разъемов кокиля (желательно плоских). Желательно, чтобы и конфигурация внутренней поверхности обеспечивала ее получение одним металлическим стержнем. Применение песчаных и разъемных металлических стержней допустимо, но снижает технико-экономические показатели процесса.

Минимальная толщина стенок отливки ограничена пониженной жидкотекучестью, определяется площадью поверхности и составляет: 2,2 мм для алюминиевых сплавов, 3 мм – магниевых, 4 мм – медных сплавов и чугуна, 8 мм – для стали. Кокильное литье требует особого внимания к развязыванию тепловых узлов и предотвращению трещинообразования из-за низкой податливости формы. Необходимо предусматривать конфигурацию отливок без острых углов, резких переходов поверхностей и сечений, без высоких ребер и глубоких полостей. Например, толщина ребер жесткости должна составлять 0,7 толщины стенки.

При литье под давлением удастся решить проблемы получения тонкостенных отливок и на первый план выходят другие: газовая пористость в отливках, продление срока службы дорогих пресс-форм и обеспечение высокой производительности. Поэтому детали должны проектироваться тонкостенными (с толщиной стенки 0,5...5 мм в зависимости от сплава и площади поверхности) и, по возможности, с близкой толщиной стенок.

Повышение прочности и жесткости достигается применением ребер жесткости (с толщиной стенок 0,8...0,9 толщины стенки отливки) и армированием стальными вставками. Сложность наружной поверхности целесообразно уменьшать для упрощения процесса и повышения производительности, а внутренней – просто необходимо, т.к. применение песчаных стержней недопустимо, а разъемных металлических – нежелательно из-за снижения производительности.

При центробежном литье следует обратить внимание на то, что наряду с высоким качеством металла отливки, ее внутренняя поверхность всегда будет иметь дефекты строения и невысокую точность размеров. При

получении же отливок без центрального отверстия дефектной будет их осевая часть. Поскольку под действием центробежных сил ускоряются ликвационные процессы, для отливок, как правило, следует выбирать малоликвирующие сплавы.

### ***Контрольные вопросы***

1. Как получают полости в отливках?
2. Что такое модель?
3. Зачем на модели и стержнях предусматривают знаки?
4. Какие технологические требования предъявляются к заготовке полученной литьем в песчаные формы?
5. С какой целью наносят покрытия на внутреннюю поверхность кокиля?
6. Какие технологические требования предъявляются к заготовке полученной литьем в кокиль?
7. Почему при литье под регулируемым давлением получают более качественные отливки, чем при литье под высоким давлением?
8. Какие технологические требования предъявляются к заготовке полученной литьем под давлением?
9. Можно ли на литейных машинах с горизонтальной осью вращения получать отливки с глухой центральной полостью?
10. Каковы общие принципы конструирования литых деталей?
11. В чем заключаются особенности конструирования внешней поверхности литых деталей?
12. В чем заключаются особенности конструирования внутренней поверхности литых деталей?
13. Каковы особенности конструирования деталей, получаемых литьем по выплавляемым моделям и в оболочковые формы?
14. Каковы особенности конструирования деталей, получаемых литьем в кокиль и под давлением?

## ГЛАВА 13. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Обработка металлов давлением (ОМД) – технологический процесс формоизменения металлического тела (заготовки) за счет пластической деформации под воздействием на тело внешних сил.

Все технологические процессы ОМД, принято делить на процессы, завершающие металлургический цикл (прокатка, прессование, волочение) и процессы производства заготовок деталей и готовых деталей, применяемые в машиностроении (ковка, горячая штамповка, холодная и полугорячая объёмная штамповка, штамповка с локальным нагружением, листовая штамповка, а также накатка и другие специализированные процессы).

### *13.1. Физико-химические основы ОМД*

#### *Особенности строения металлов и сплавов*

Все металлы и сплавы в твердом состоянии являются веществами кристаллическими, т.е. атомы их расположены в определенном, периодически повторяющемся порядке. Кристаллическое строение металлов и сплавов предопределяет одинаковость их свойств только в физически эквивалентных плоскостях и направлениях. Векторные свойства кристалла (упругость, пластичность, твердость, прочность, электропроводность, магнитная проницаемость, скорость растворения в коррозионной среде и др.) неодинаковы в различных плоскостях и направлениях. Неравномерность свойств в различных плоскостях и направлениях кристалла называется анизотропией. При рассмотрении анизотропии свойств самыми характерными являются плоскости и направления с наибольшей плотностью атомов, в которых расстояние между атомами минимально. В этих плотноупакованных плоскостях и направлениях силы связи максимальны, атомные и электрические взаимодействия более интенсивны. У аморфных тел свойства в различных направлениях одинаковы. Это явление называется изотропией.

В металлических кристаллах атомы удерживаются в определенных положениях металлическими связями. При металлической связи все атомы, присутствующие в данном кристалле, участвуют в обобществлении имеющихся внешних (валентных) электронов, которые могут свободно перемещаться внутри кристалла. Таким образом, в узлах кристаллической решетки металлов находятся фактически не атомы, а положительно заряженные ионы, окруженные слабо связанными с ними электронами (так называемым “электронным газом”). Металлическая связь обуславливает наличие у металлов, в отличие от неметаллических кристаллов, высокой пластичности, а также металлического блеска, высоко тепло- и электропроводности.

Металлические тела, обычно получаемые в технике, представляют собой не монокристалл, а состоят из множества различно ориентированных кристаллов, т.е. имеют поликристаллическое строение. Монокристаллы металлов выращивают в особых условиях и применяют, главным образом, в полупроводниковой технике. Вследствие отсутствия условий для свободного роста в процессе кристаллизации каждый кристалл, входящий в поликристалл, имеет неправильную форму и называется, в отличие от монокристалла, зерном. Величина зерна поликристалла колеблется от нескольких миллиметров до 1...2 нм. Если зерна в теле расположены беспорядочно, то среднестатистические свойства тела в различных направлениях будут одинаковы. Это явление называется квазиизотропией (ложной изотропией), так как свойства каждого зерна зависят от выбранного направления.

Строение зерен и поликристалла в целом не идеально. Дефекты поликристалла можно разделить на субмикроскопические, микроскопические и макроскопические. К субмикроскопическим дефектам относятся несовершенства атомно-кристаллического строения, отклонения от идеального расположения атомов в пространственной решетке: точечные, линейные, а также более сложные поверхностные и объемные дефекты.

Точечные дефекты - это вакансии, межузельные атомы и их комплексы. Вакансия - это дефект, при котором в узле решетки атом отсутствует, например, отсутствует атом в одной из вершин куба. Межузельный атом - это дефект, при котором атом находится между узлами решетки. Линейные дефекты кристаллического строения - это дефекты, размеры которых в двух направлениях соизмеримы с атомным диаметром, а в третьем – размер на несколько порядков больше, и может быть соизмерим с размерами зерна. К числу линейных дефектов относится краевая дислокация - область несовершенства кристалла вокруг края экстраплоскости (рис. 1.5, б). Если краевая дислокация находится сверху, то ее принимают положительной и обозначают знаком « $\perp$ », а если внизу - то отрицательной и обозначают « $\dashv$ ».

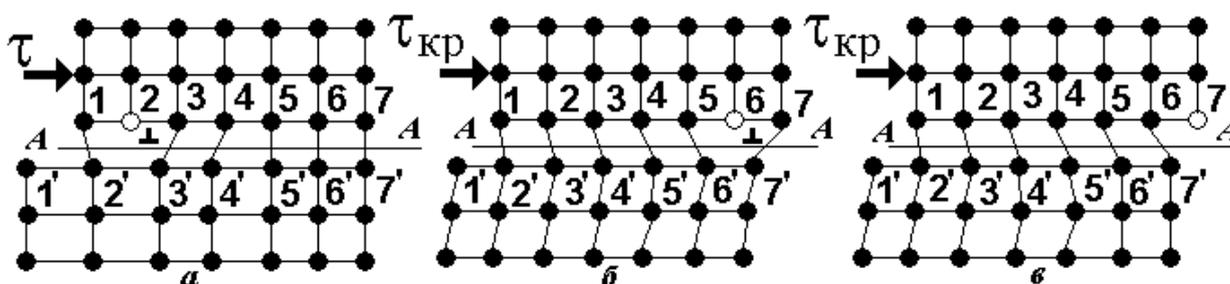


Рис. 13.1. Схема пластического сдвига как результат движения краевой дислокации: а, б, в – стадии пластического сдвига; 1–7 – вертикальные ряды атомов;  $\tau$  – сдвигающее напряжение;  $\tau_{кр}$  – критическое напряжение; А-А – плоскость скольжения.

### Физические процессы при ОМД

Процессы ОМД - это процессы деформирования. Металлическое тело, подвергаемое обработке давлением, называется деформируемым телом. Детали устройства или приспособления, непосредственно соприкасающиеся с деформируемым телом, через которые передается внешняя сила или создается препятствие движению тела, называются инструментами. Движения инструментов вызывает взаимное перемещение частиц деформируемого тела, т.е. процесс деформирования.

При ОМД различают силы поверхностные (внешние), объемные (массовые) и внутренние. Поверхностные силы действуют на поверхность контакта инструмента с деформируемым телом. К поверхностным силам относятся и силы трения, направление которых противоположно направлению движения металла по поверхности контакта с инструментом. Поверхностные силы, в том числе силы трения, делятся на активные (способствующие формоизменению) и реактивные (препятствующие заданному формоизменению). Объемные силы выражают действие массы деформируемого тела и его ускорения; в рассматриваемых процессах ими можно пренебречь, за исключением особо оговоренных случаев.

Связи между частицами деформируемого тела и реактивные силы трения оказывают противодействие движению инструментов, стремящихся вызвать взаимное перемещение частиц. Противодействие деформируемого тела взаимному перемещению его частиц называется сопротивлением деформации. Поверхностные силы уравниваются внутренними силами, которые выражают взаимодействие частиц деформируемого тела и их сопротивление деформации. Внешние силы уравниваются внутренними силами. Интенсивность внутренних сил, т.е. отношение элементарной силы к элементарной площадке  $F_a$  называется напряжением. Напряжение может быть разложено на нормальное напряжение  $\sigma$ , перпендикулярное рассматриваемой площадке и касательное (сдвигающее) напряжение  $\tau$ , действующее в плоскости площадки. Нормальные напряжения сжимают или растягивают тело по направлению нормали и в зависимости от производимого воздействия считаются отрицательными (сжатие) или положительными (растяжение). Касательные напряжения стремятся сдвинуть частицы тела относительно друг друга, их знак зависит от выбора осей. В результате взаимодействия инструментов и деформируемого тела, форма и размеры тела изменяются, происходит деформация (искажение).

Деформацией принято также называть количественную оценку процесса формоизменения. В общем случае деформация состоит из трех

последовательных и совмещающихся этапов: упругой деформации, пластической деформации и разрушения.

Напряженное состояние кристаллического тела – результат стремления атомов (ионов) вернуться к местам своего устойчивого равновесия, из которых они были выведены в результате механического воздействия на тело (в общем случае физического или физико-химического процесса). В результате механического воздействия на тело происходит повышение потенциальной энергии кристаллической решетки. При повышении потенциальной энергии атомы отклоняются от положения устойчивого равновесия, происходит изменение межатомных расстояний, ведущее к деформации (изменению формы и размеров тела). После удаления причин, вызвавших повышение потенциальной энергии, величина последней станет минимальной, напряженное состояние тела исчезнет, атомы вернуться к местам устойчивого равновесия, форма и размеры тела восстановятся.

Деформация, исчезающая после удаления причин, ее вызвавших, называется упругой деформацией. Упругая деформация происходит в металле за счет изменения межатомных расстояний кристаллической решетки. Значение отклонения атома от места своего устойчивого равновесия не превышает расстояния между соседними атомами. Практически полная обратимость имеет место, если напряжения в теле не превышают предела пропорциональности. Прямая пропорциональность между напряжением  $\sigma$  и деформацией  $\varepsilon$  выражается в виде закона Гука:  $\sigma = E\varepsilon$ , где  $E$  - коэффициент пропорциональности (модуль продольной упругости). При упругой деформации в продольном направлении (направлении растяжения) происходит увеличение размера, в поперечном уменьшение. Отношение поперечного сжатия  $\varepsilon_s$  к продольному удлинению  $\varepsilon_r$  называется коэффициентом Пуассона:  $\mu_r = \varepsilon_s/\varepsilon_r$ , значение которого характеризует изменение объема деформируемого тела при упругой деформации.  $E$  и  $\mu_r$  - основные константы упругой деформации.

При увеличении напряжений выше предела пропорциональности, кроме упругой  $\epsilon_e$ , происходит пластическая  $\epsilon_p$  деформация. Пластическая деформация - это деформация, остающаяся после удаления причин, ее вызывающих. Следовательно, при пластической деформации, деформация  $\epsilon$  равна сумме упругой  $\epsilon_e$  и пластической  $\epsilon_p$  деформации, т.е.  $\epsilon = \epsilon_e / \epsilon_p$ .

Пластическая деформация представляет собой необратимое относительное перемещение атомов или их групп деформируемого тела и при обработке давлением является следствием движения инструмента. После прекращения воздействия инструмента происходит снятие упругой деформации инструмента и деформируемого тела. Эти изменения необходимо учитывать при выборе размеров инструмента и технологии обработки. Изменения размеров деформируемого тела, по сравнению с размерами заданными инструментами, называют пружинением. Пружинение - это изменение размеров деформируемого тела вследствие снятия упругой деформации  $\epsilon_e$ , сопровождающей пластическую деформацию, после снятия внешней силы и прекращения воздействия инструмента.

Пластическая деформация поликристалла происходит путем скольжения внутри зерен, а также направленного перемещения атомов, поворота и относительного перемещения зерен и др. Скольжение - это необратимое перемещение атомов внутри кристалла под действием сдвигающего напряжения, достигшего некоторой критической точки. Скольжение происходит в определенных, характерных для данного вещества и его кристаллической структуры, плоскостях и направлениях, как правило, с наибольшей плотностью атомов. Современная физика объясняет процесс скольжения на основе теории дислокаций. Установлено, что дополнительно к первичным дефектам, возникшим при кристаллизации, в процессе пластической деформации образуются новые, т.е. увеличивается количество вакансий, дислокаций и других дефектов. Вначале сдвигающее напряжение  $\tau$  вызывает упругое смещение атомов вертикальных рядов 1, 2, 3 относительно плоскости скольжения  $A-A$  (рис. 13.1, а). С увеличением сдвигающего

напряжения ряд атомов 1 над плоскостью скольжения  $A-A$  проскакивает нейтральное положение между двумя вертикальными рядами 11 и 21, а ряд атомов 2 превращается в экстраплоскость и образует линейную дислокацию « $\perp$ ». При достижении сдвигающим напряжением критической величины  $\tau_{кр}$  это напряжение вызывает волну последовательных смещений вертикальных рядов атомов не более чем на одно межатомное расстояние. В результате прохождения этой волны экстраплоскость перемещается из ряда 2 в ряд 3, из ряда 3 в ряд 4 и т.д. до положения, показанного на [рис. 13.1, б](#). Далее дислокация выйдет на поверхность и исчезнет ([рис. 13.1, в](#)).

Все способы обработки давлением основаны на пластичности металлов и сплавов. Пластичность - это свойство металлов и сплавов под внешним воздействием необратимо изменять формы и размеры без разрушения.

Разрушение - это процесс, в результате которого происходит нарушение сплошности деформируемого тела вследствие движения (образования и распространения) одной или множества трещин. Разрушению, как правило, предшествует пластическая деформация. Если пластическая деформация до разрушения незначительная, металл называют хрупким, если значительная - пластичным.

Пластичность  $\epsilon_p$  измеряют значением пластической деформации до момента появления первой макротрещины. От пластичности зависит возможность получения заданной формы, интенсивность формоизменения, качество операций, производительность процесса обработки давлением.

Технологическим свойством при обработке давлением, кроме пластичности, является сопротивление деформации. Сопротивление деформации определяет величину деформирующей силы, а, следовательно, силовые и энергетические параметры оборудования, стоимость инструмента и его стойкость. Сопротивление деформации измеряют значением напряжения текучести, которое равно отношению силы, действующей на деформируемое тело, к площади сечения тела в один и тот же момент времени. Таким образом, напряжение текучести является действительным или истинным

напряжением. Пластичность и сопротивление деформации металла или сплава определяют из испытаний на растяжение, сжатие и кручение, в условиях, соответствующих стандарту.

Пластическая деформация поликристалла сопровождается упрочнением. Если необходимо упрочнение при пластической деформации отличить от упрочнения при термической и других видах обработки, его называют деформационным упрочнением. Деформационное упрочнение - сложный физико-химический процесс, при котором изменяются структура и все свойства металла. Зерна вытягиваются в направлении наибольшей деформации растяжения, и структура становится волокнистой. Происходит переход от беспорядочного расположения зерен к упорядоченному.

Плоскости скольжения постепенно занимают некоторое определенное положение по отношению к направлению действующих сил, и появляется ориентировка или текстура. Ориентировка (текстура) и волокнистость ведут к анизотропии свойств. Прочность при растяжении и сжатии в направлении волокна больше, чем поперек волокна. Сопротивление срезу поперек волокна больше, чем вдоль. Анизотропия свойств деформированного тела должна учитываться при конструировании деталей машин и приборов и выборе технологии их изготовления. Направление максимальных (растягивающих и сжимающих) напряжений, возникающих при работе деталей, должно совпадать с направлением волокон, а направление максимальных касательных напряжений должно быть перпендикулярно. Волокна, полученные при обработке давлением, должны огибать контур детали. При обработке резанием волокна надрезаются, прочность и надежность в работе деталей уменьшаются. Если анизотропия нежелательна, то для ее уменьшения деформацию производят в различных направлениях. Значительное снижение анизотропии, а иногда и её полное устранение, может быть достигнуто при рациональном режиме термической обработки. Волокнистость структуры может быть также результатом неправильного расположения примесей и оксидных пленок, находящихся на границах зерен.

В этом случае следствием резко выраженной волокнистости (строчечности структуры) может быть слоистость (шиферность) излома, что снижает качество деталей.

Процесс пластической деформации сопровождается искажением кристаллической решетки и накоплением внутризеренных и межзеренных дефектов. Это вызывает увеличение твердости, прочности, сопротивления деформации, уменьшение пластичности. При достижении некоторого предела упрочнения, зависящего от природы металла и условий деформации, происходит разрушение. Накопление дефектов ведет к уменьшению плотности, снижению тепло- и электропроводности. Пластическая деформация неравномерна, вследствие чего после пластической деформации в теле остаются остаточные напряжения, взаимно уравновешивающиеся внутри тела. Остаточные напряжения в большинстве случаев нежелательны, так как снижают сопротивление коррозии и со временем самопроизвольно снимаются, вызывая изменения форм и размеров, коробление деталей. Однако в некоторых случаях в поверхностных слоях деталей создают остаточные напряжения сжатия (дробеструйной обработкой, обкаткой и др.), что существенно увеличивает срок службы. В результате упрочнения изменяются магнитные свойства: коэрцитивная сила и потеря на гистерезис увеличиваются, максимальная магнитная проницаемость уменьшается. Волокнистость и текстура повышают электропроводность в определенных направлениях. Повышает ее также и строчечность. Химическая устойчивость в различных средах уменьшается.

Если деформированное, т.е. упрочненное тело нагреть, то происходит процесс, обратный деформационному упрочнению - разупрочнение. Для разупрочнения производят низкотемпературный отжиг и рекристаллизационный отжиг. При низкотемпературном отжиге значительно уменьшаются остаточные напряжения, увеличивается пластичность, незначительно уменьшаются твердость, прочность, сопротивление деформации, повышается сопротивление коррозии. Частично

восстанавливаются другие свойства. Практически полное разупрочнение наступает при рекристаллизационном отжиге: зерна вытянутой формы становятся равноосными; уничтожается, а иногда изменяется текстура деформации и связанная с нею анизотропия свойств, значительно увеличивается пластичность и уменьшается сопротивление деформации. Полностью снимаются остаточные напряжения, повышается химическая устойчивость и другие свойства изменяются в обратном, по сравнению с упрочнением, направлении. Рекристаллизационный отжиг основан на процессе рекристаллизации. Рекристаллизация - это процесс образования новых, т.е. неупрочненных зерен из ориентированных вытянутых, т.е. упрочненных, зерен деформированного поликристалла. Температура начала рекристаллизации ( $T_{н.р}$ ) для металлов высокой чистоты  $T_{н.р} = (0,1...0,2) T_{пл}$ , для обычных металлов  $T_{н.р} = (0,3...0,4) T_{пл}$ , для сплавов гомогенных  $T_{н.р} = (0,4...0,6) T_{пл}$ , для сплавов гетерогенных  $T_{н.р} = (0,6...0,8) T_{пл}$ , где  $T_{пл}$  - температура плавления в абсолютных градусах (градусах Кельвина). Различают две основных стадии рекристаллизации, которые практически происходят одновременно: первичная и собирательная. Первичная рекристаллизация - это процесс образования зародышей, из которых растут новые (неупрочненные) зерна. Собирательная рекристаллизация - это процесс роста зерен из образовавшихся зародышей. Процесс роста происходит до достижения равновесного состояния, определяемого температурой нагрева. Интенсивность протекания процессов рекристаллизации и разупрочнения в целом зависит от физической природы металла или сплава, увеличивается с повышением температуры разупрочняющей термообработки и увеличением деформации тела перед термообработкой. Поскольку процесс рекристаллизации не мгновенный, то для завершения рекристаллизации требуется определенное время. Если время недостаточно, то процессы рекристаллизации, а соответственно и разупрочнения, пройдут не полностью.

Большая часть механической энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию ( $\approx 75 \dots 90 \%$ ) переходит в тепловую. Это явление называется тепловым эффектом. Следовательно, фактическая температура тела, его деформации  $T_{\text{деф}} = T_{\text{н}} + \Delta T$ , где  $T_{\text{н}}$  - температура деформируемого тела до деформации (температура окружающей среды или температура нагрева);  $\Delta T$  - повышение температуры тела из-за теплового эффекта (температурный эффект).

Если  $T_{\text{деф}} > T_{\text{н.р}}$ , то пластическая деформация тела сопровождается протеканием двух противоположных процессов: упрочнения и разупрочнения. Величина упрочнения определяется физической природой вещества и степенью деформации, степень разупрочнения - полнотой процесса рекристаллизации. Рекристаллизация происходит во времени с определенной скоростью, зависящей от температуры и природы вещества (содержание примесей). Чем выше температура и степень деформации, тем больше скорость рекристаллизации. Время разупрочнения определяется скоростью деформации. Чем выше скорость деформации, тем меньше времени для разупрочнения. Кроме того, процесс усложняется тем, что увеличение скорости деформации уменьшает время для рассеивания тепла. Таким образом, факторы температуры, скорости и степени деформации неотделимы и их следует рассматривать совместно. Совокупность значений температуры, скорости и степени деформации называют термомеханическим режимом обработки давлением. Так как условия рекристаллизации при отжиге и в процессе пластической деформации отличаются, то рекристаллизацию при отжиге называют статической рекристаллизацией, в процессе деформации - динамической рекристаллизацией.

В зависимости от термомеханического режима деформации различают следующие виды пластической деформации: Холодная деформация, при которой происходит упрочнение и отсутствует разупрочнение. Неполная холодная или подобная холодной, при которой происходит упрочнение и разупрочнение вследствие возврата. Неполная горячая деформация, при

которой происходят упрочнение и частичная (неполная) рекристаллизация, т.е. неполное разупрочнение. Горячая деформация, при которой происходят упрочнение и практически полная рекристаллизация, т.е. полное разупрочнение.

Наиболее распространена в технике горячая деформация, которая, как правило, предшествует холодной. При горячей деформации слитка литая (дендритная) структура разрушается, уменьшается химическая и структурная неоднородность. По сравнению с литым, горячедеформированный металл имеет большую прочность, и, особенно, пластичность, большую ударную вязкость. Пластичность в ряде случаев возрастает в 1,5...2 раза и более, что позволяет вести дальнейший процесс с большими степенями деформации, т.е. более производительно. При применении высоких степеней деформации (отношении сечений до и после деформации, равном 10 или более) увеличивается прочность не только при обычных, но и знакопеременных нагрузках. Структура после деформации получается практически полностью рекристаллизованной. Однако вытянутость примесей и структурных неоднородностей в направлении максимальной деформации растяжения ведет к волокнистости и в некоторых случаях к слоистости (шиферности излома). В случае объемного сжатия происходит частичное заваривание неокисленных пустот и раковин. Сопротивление деформации при горячей обработке, по сравнению с холодной, меньше в 5...15 раз. Благодаря этому уменьшаются затраты энергии на обработку, повышается в 2...3 раза производительность и сокращается потребная мощность оборудования. К недостаткам горячей деформации относятся окисление поверхности, окисление и возгонка окисляющихся и летучих компонентов в поверхностном слое, меньшая точность размеров, что увеличивает расход металла и объем отделочных операций обработкой резанием.

Холодная деформация по сравнению с горячей имеет следующие преимущества: Высокое качество поверхности и значительная точность размеров, что сокращает расход материала и удешевляет, а иногда и

полностью исключает отделочные операции обработки резанием.

Повышаются прочность и упругость, равномерность и стабильность свойств и структуры. В сочетании с термической обработкой обеспечивается возможность получения заданных физико-механических свойств (ударной вязкости, штампуемости, постоянства удельного электросопротивления и т.д.).

Для рационального выбора вида деформации необходимо знание зависимости пластичности и сопротивления деформации от температуры.

Губкиным С.И. на основе фундаментальных исследований и обобщения передового производственного опыта предложено все металлы, обрабатываемые давлением, разделить на три группы:

1. Металлы, имеющие высокую пластичность и обрабатываемые давлением в условиях холодной и горячей деформации (медь, алюминий, никель, конструкционная сталь и алюминиевые сплавы, большинство латуней и бронз, медноникелевые сплавы и др.).

2. Металлы, имеющие высокую пластичность и обрабатываемые давлением только в условиях холодной и неполной холодной деформации (горячеломкие металлы и сплавы). Это металлы и сплавы, содержащие легкоплавкие составляющие, располагающиеся по границам зерен. К горячеломким сплавам относятся бронзы, содержащие фосфор, олово, свинец и др.

3. Металлы, имеющие высокую пластичность и обрабатываемые давлением только в горячем состоянии (холодноломкие металлы и сплавы). К группе холодноломких металлов и сплавов относятся магний и магниевые сплавы. Сопротивление деформации с повышением температуры монотонно уменьшается. Исключение составляют низкоуглеродистые стали с повышенным содержанием азота. У этих сталей при нагревании до 300°C и незначительной скорости деформации сопротивление деформации увеличивается. Пластичность в этом интервале температур уменьшается. При повышении скорости деформации максимум для сопротивления деформации

и минимум для пластичности смещается с 300°С до 500°С. Эти стали не рекомендуется применять для холодной деформации и недопустимо применять для листовой штамповки крупногабаритных деталей, в том числе кузовных деталей автомобилей.

На пластичность и сопротивление деформации существенно влияет напряженное состояние деформируемого тела и его неравномерность. Чем больше сжимающие напряжения, тем больше пластичность. Создавая всестороннее неравномерное сжатие и исключая концентрацию напряжений можно обрабатывать хрупкие в обычных условиях материалы. Наличие растягивающих напряжений снижает пластичность (сравните при дальнейшем изучении курсы процессы выдавливания, волочения и вытяжки при листовой штамповке).

При действии одноименных напряжений (только растягивающих или только сжимающих) сопротивление деформации увеличивается, разноименных (растягивающих и сжимающих) сопротивление деформации уменьшается.

### *13.2. Процессы, завершающие металлургический цикл*

#### Прокатка

Прокатка - процесс пластической деформации заготовки между вращающимися валками с целью получения заданных форм, размеров и физико-механических свойств.

Прокатку принято делить на продольную и специальную. Специальные виды прокатки: поперечная, поперечно-винтовая, поперечно-клиновья, а также профилирование плоского проката (листов и лент).

Продольной прокатке подвергают до 75...80 % всей выплавляемой стали и большую часть сплавов цветных металлов. При продольной прокатке (рис. 13.2) заготовка 1 подается к двум вращающимся в разные стороны валкам 2. Оси валков параллельны, заготовка движется поступательно.

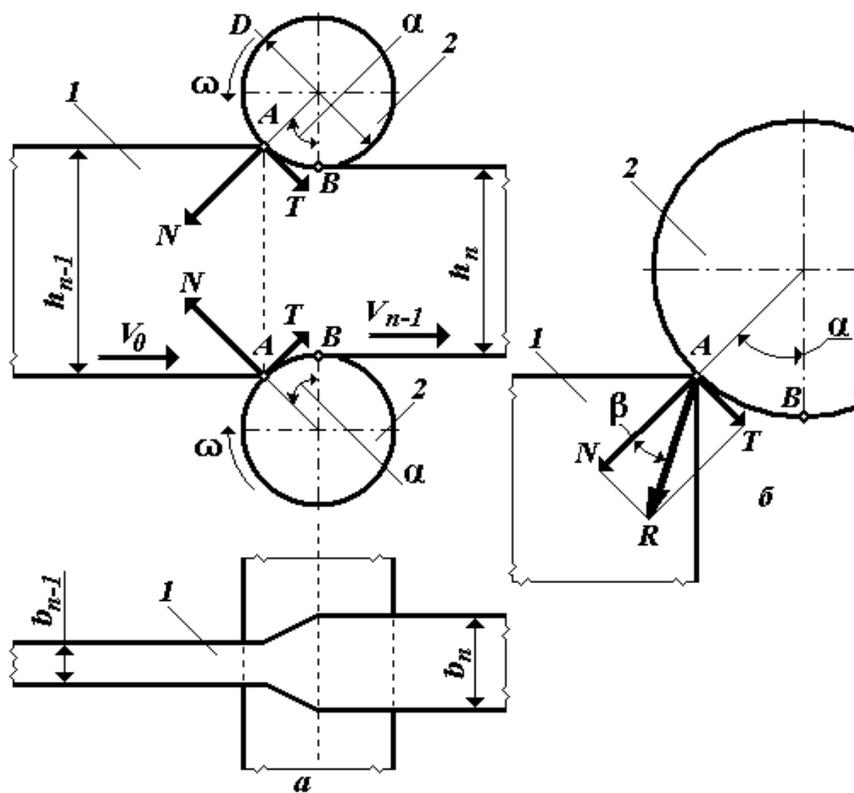


Рис. 13.2. Схема продольной прокатки: а - установившийся процесс; б - силы, действующие на заготовку в момент захвата; 1 – заготовка; 2 – валок;  $N$  – нормальная сила;  $T$  – сила трения;  $R$  – равнодействующая сила; А-В – дуга

захвата;  $\alpha$  - угол захвата;  $\beta$  - угол трения;  $h_{n-1}$ ,  $b_{n-1}$  – толщина и ширина заготовки;  $h_n$ ,  $b_n$  – толщина и ширина изделия;  $D$  – диаметр валка.

В точках соприкосновения заготовки с валками возникает нормальная сила  $N$ , направленная по радиусу, и сила трения « $T$ », направленная по касательной к окружности. Сила  $R$  - равнодействующая сил  $N$  и  $T$ . Дугу  $AB$  называют дугой захвата, центральный угол  $\alpha$  - углом захвата, угол  $\beta$  между силами  $N$  и  $R$  - углом трения,  $\text{tg } \beta = \mu$  - коэффициентом трения при пластической деформации.

В зависимости от значений сил  $N$  и  $T$  равнодействующая  $R$  может быть направлена по разному. Если проекция  $R$  на направление прокатки ( $R_x$ ) направлена в сторону, противоположную направлению вращения валков ( $\alpha > \beta$ ), то валки оттолкнут заготовку. Если  $R_x = 0$  ( $\alpha = \beta$ ), то произойдет проскальзывание заготовки в валках. Если  $R_x$  направлена в сторону вращения валков ( $\alpha < \beta$ ), то произойдет захват заготовки валками и осуществится процесс прокатки. Для практических расчетов более удобно использовать

неравенство:  $\mu > \operatorname{tg}\alpha$ . Осевая сила для облегчения захвата металла валками при продольной прокатке, как правило, не прикладывается. Значение коэффициента трения зависит от физической природы и состояния контактных поверхностей обрабатываемого металла и валков, термомеханического режима обработки и других факторов.

Процесс поперечной прокатки осуществляют на двух (рис. 13.3, а) или трех вращающихся в одну сторону валках 1. Заготовка 2 в виде прутка, кольца или трубы круглого сечения в процессе прокатки вращается в другую сторону.

Оси валков и заготовки параллельны, в процессе прокатки обычно сближаются. Процесс поперечно-винтовой прокатки осуществляют на двух или трех (рис. 13.3, б) косорасположенных валках, вращающихся в одну сторону. Оси валков могут пересекаться или скрещиваться. В процессе прокатки заготовка получает вращательное, противоположную по отношению к валкам сторону, и поступательное движение. Если сил трения для обеспечения захвата металла валками при поперечно-винтовой прокатке недостаточно, то к заготовке прикладывают осевое усилие или на начальном этапе, или на протяжении всего процесса прокатки. При прокатке в двух валках для устойчивости положения заготовки устанавливают направляющие холостые валки или направляющие линейки.

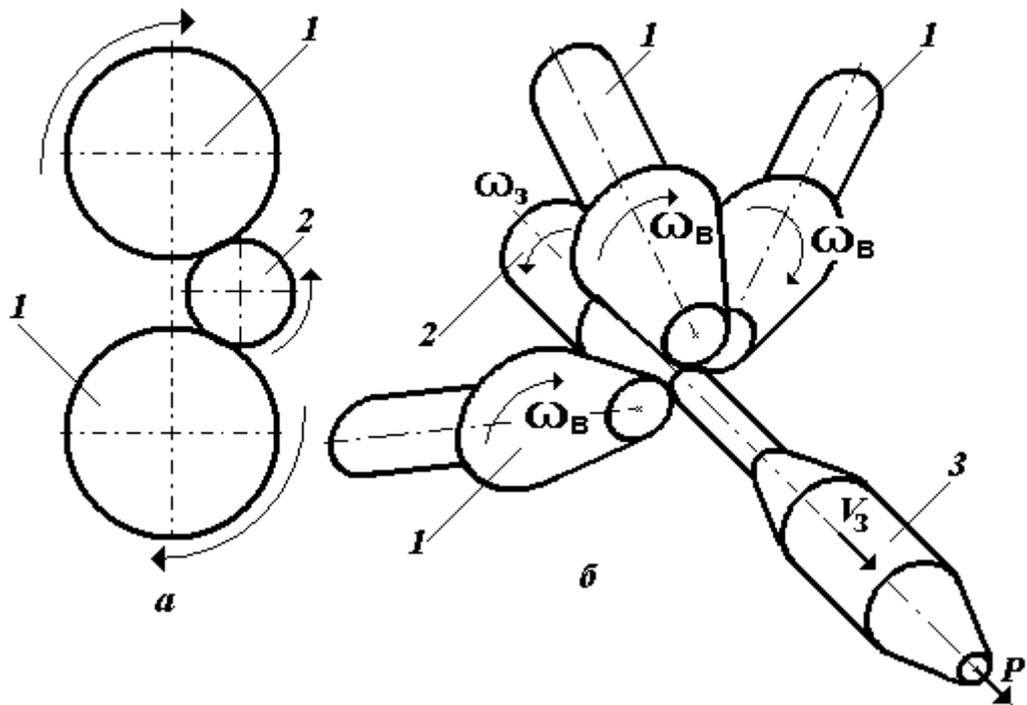


Рис. 13.3. Схемы прокатки: а – поперечной в двух валках; б - поперечно-винтовой прокатки профиля переменного по длине сечения с пересекающимися осями валков; 1 - валок; 2 - заготовка; 3 – изделие;  $\omega_B$  - направление вращения валков;  $\omega_3$ ,  $V_3$  - вращательное, и поступательное движения заготовки;  $P$  – осевая сила.

Процесс поперечно-клиновой осуществляют двумя валками с клиновыми ручьями (рис. 13.4), оси валков и заготовки параллельны. Валки вращаются в одну сторону, заготовка в другую. Заготовка кроме вращательного, получает поступательное движение, ручки обычно вытаскивают не на валке, а на сменных сегментах, закрепленных на валках.

Продукция, получаемая прокаткой, называется прокатом. Перечень выпускаемого проката с указанием профиля, размеров и допусков на них называется сортаментом. Сортамент проката принято делить на четыре группы: сортовой прокат, плоский прокат, трубы и специальные виды проката.

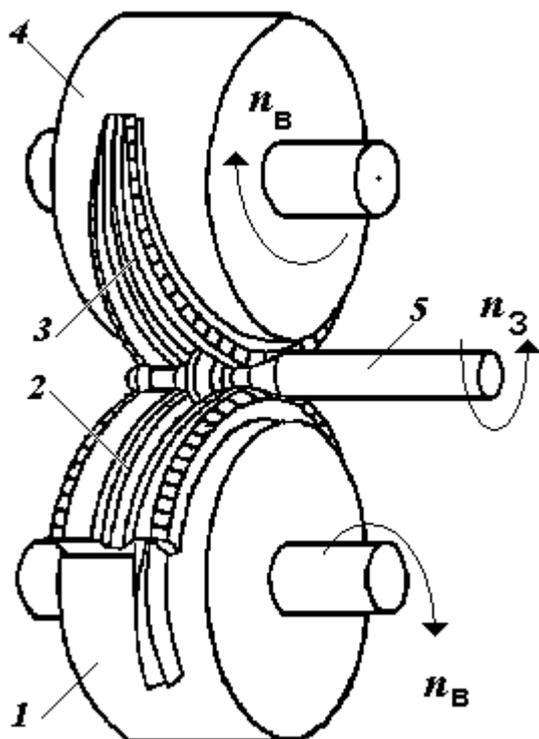


Рис. 13.4. Схема поперечно-клиновой прокатки: 1 - нижний валок; 2, 3 - клиновые ручьи; 4 - верхний валок; 5 - заготовка;  $n_B$  - направление вращения валков;  $n_3$  - вращательное движение заготовки.

Продольной прокаткой получают сортовой, плоский и трубный прокат.

Сортовой прокат имеет постоянное по длине сечение простой или сложной формы. Его, как правило, получают горячей прокаткой. К профилям простой геометрической формы относятся блюм, квадрат (сторона квадрата 6...250 мм и более), круг (диаметр 4...300 мм), прямоугольник (толщина 1...60 мм, ширина 10...600 мм), правильный многоугольник (в т.ч. шестигранник), треугольник, овал, полукруг, сегмент, ромб. Простой сортовой прокат может служить исходным материалом для прокатки фасонных профилей, волочения прутков и проволоки, заготовок для горячей и холодной объемной штамповки и для изготовления деталей обработкой резанием.

Прямолинейный прокат называют прутком. Прокат в виде проволоки, свернутой в бухту называют катанкой. Катанку выпускают диаметром от 4 до 35 мм, используют для получения деталей обработкой резанием, производства проволоки волочением, для объемной штамповки. Катанку диаметром до 35 мм применяют для горячей и холодной объемной штамповкой на автоматах, что позволяет, по сравнению с прутками, увеличить производительность, сократить технологические отходы, улучшить условия работы автомата. Катанку и прутки, подвергнутые одной или несколькими протяжкам для повышения точности размеров сечения и

качества поверхности, называют калиброванным прокатом. Калиброванный прокат необходим для холодной объемной штамповки. Фасонные профили (уголок равнобокий и неравнобокий, швеллер, двутавр, тавр, рельс, зетовый профиль, колонный профиль) широко применяют в строительстве, машиностроении, в тракторо- и сельхозмашиностроении. Плоский прокат - листы, ленты и фольга (листы или ленты толщиной менее 0,1 мм). Листы выпускают горячекатаные и холоднокатаные. Ленты и фольга, как правило, холоднокатаные. Наибольшее применение для листовой штамповки кузовных и других деталей в автостроении имеют ленты и листы (в рулонах) холоднокатаные толщиной от 0,05...4 мм и шириной 200...2300 мм.

Применение лент и рулонного проката обеспечивает повышение: производительности штамповочного оборудования; качества изделий и улучшение условий работы инструмента (за счет использования при прокатке современных средств повышения качества и точности проката); уменьшение технологических отходов. Трубы выпускают бесшовные горячекатаные и холоднокатаные с наружным диаметром 5...650 мм при толщине стенок от 0,5 мм (холоднокатаные) до 40 мм, также трубы сварные, свернутые из листа или ленты, с наружным диаметром до 2000 мм и более при толщине стенки до 15 мм. Трубы сварные значительно уступают по надежности в эксплуатации трубам бесшовным, но они дешевле, их сортамент в области больших диаметров значительно шире. Надежность в эксплуатации сварных труб может быть значительно повышена специальными видами обработки давлением. Заготовки для продольной прокатки бесшовных труб из стали получают горячей поперечно-винтовой прокаткой; из алюминия, меди, никеля, титана и сплавов на их основе - прессованием; из вольфрама, молибдена и других тугоплавких металлов и сплавов - методами порошковой металлургии.

Продольной прокаткой изготавливают ограниченное количество по массе и сортаменту профилей переменного по длине сечения. Поперечной прокаткой получают заготовки цилиндрических шестерен с зубьями (модуль 7...15 мм

при горячей деформации, модуль 5...7 мм при холодной), а также бочкообразные ролики подшипников и другие детали с заданным внешним и внутренним профилем. Поперечно-винтовой прокаткой получают гильзы, сортовой прокат, круглые сплошные и полые переменного по длине сечения профили, в том числе периодический прокат, заготовки деталей в виде сплошных и полых тел вращения (специальный прокат).

Гильза - тонкостенная относительно небольшой длины труба, служит заготовкой для раскатки труб заданных размеров продольной и поперечно-винтовой прокаткой. Параметры прокатки (соотношение диаметров валков и заготовки, угол между осями валков и заготовки и наклона конической части валка) подбираются так, чтобы из-за неравномерности деформации в центральной части заготовки создались растягивающие радиальные напряжения. Под действием этих напряжений металл в центральной зоне заготовки разрыхляется и образуется полость. Чтобы предупредить образование трещин на поверхности полости и получить заготовку трубы заданных размеров, устанавливают оправку. Оправку устанавливают с опережением момента самопроизвольного образования полости. Оправку укрепляют на стержне, конец которого закреплен во вращающейся опоре. После окончания прокатки гильзу снимают со стержня и направляют на трубопрокатные станы.

Прокат переменного по длине сечения, в том числе периодический прокат, поперечное сечение которого периодически изменяется, используют в виде фасонной заготовки при горячей штамповке, что позволяет применить более простые штампы, увеличить производительность при штамповке, снизить отходы и улучшить качество продукции. Периодический прокат применяют также в виде заготовок для обработки резанием, что позволяет значительно повысить производительность, сократить расход металла и объем доделочных операций. Периодической прокаткой получают заготовки полуосей автомобиля, шатунов автомобильного двигателя, осей вагонов и тепловозов, лопаток турбин и др.

Поперечно-винтовой прокаткой получают заготовки шаров диаметром 18...125 мм для подшипников качения, шаровых мельниц и др. назначения, колец и роликов подшипников качения, втулок заднего колеса велосипеда, ватерных колец для текстильной промышленности и кольцевых деталей, червячных колес, винтов и сверл, теплообменников грузовых автомобилей и других профилированных труб, а также бандажи колес и колеса локомотивов и др.

Поперечно-клиновой прокаткой получают заготовки ступенчатых валов, крупных шаровых пальцев и других деталей переменного по длине сечения. Поперечно-клиновая прокатка значительно более производительна, чем поперечно-винтовая, дает большую точность размеров за счет наличия калибрующей части ручья, в которой расстояние между поверхностями заготовки и валков не изменяется.

За последние годы получила распространение холодная поперечно-клиновая прокатка относительно небольших деталей для получения поперечных канавок и других элементов, которые не могут быть получены холодной объемной штамповкой и накаткой по известным схемам.

Гнутые профили сложной формы получают путем холодной гибки листа и ленты. Применение гнутых профилей позволяет экономить до 35 % металла, по сравнению с горячекатаными профилями. Гнутые профили применяют в автомобильной (ветровые рамки, радиаторные трубки) и авиационной промышленности, строительстве (профили для оконных и фонарных переплетов, поручни лестниц и др.) и т.п. Гнутые профили значительно дешевле прессованных, но уступают им по прочности, сложности сечения и точности размеров. Гнутые профили могут быть изготовлены только из пластичных металлов (алюминия, низкоуглеродистых сталей и т.п.).

Инструментом для прокатки являются валки. Прокатные валки (рис. 13.5) состоят из рабочей части или бочки 1, опорных частей или шеек 2 и соединительной части 3. Прокатка листов и лент производится на валках с гладкой бочкой, имеющей цилиндрическую, слегка выпуклую или вогнутую

поверхность (13.5, а). Сортовую прокатку производят в калиброванных валках, на бочке которых вытачивают вырезы 4 (13.5, б). Вырез, сделанный на одном валке, называют ручьем. Вырезы двух валков и зазор между ними образуют калибр. Границу калибра, т.е. переход от калибра с одного валка на другой, называют разделом калибра. Если раздел калибра осуществляется по линии, параллельной осям валков (по калибру), то такой калибр называют открытым (13.5, б). Калибр, у которого раздел находится вне предела калибра, называют закрытым (13.5, в). Разработку системы последовательных калибров, обеспечивающих получение заданного профиля и размеров проката, называют калибровкой. Калибры делятся на обжимные (уменьшающие сечение заготовки), черновые (приближающие сечение заготовки к заданному профилю) и чистовые или отделочные, дающие заданные размеры и профили.

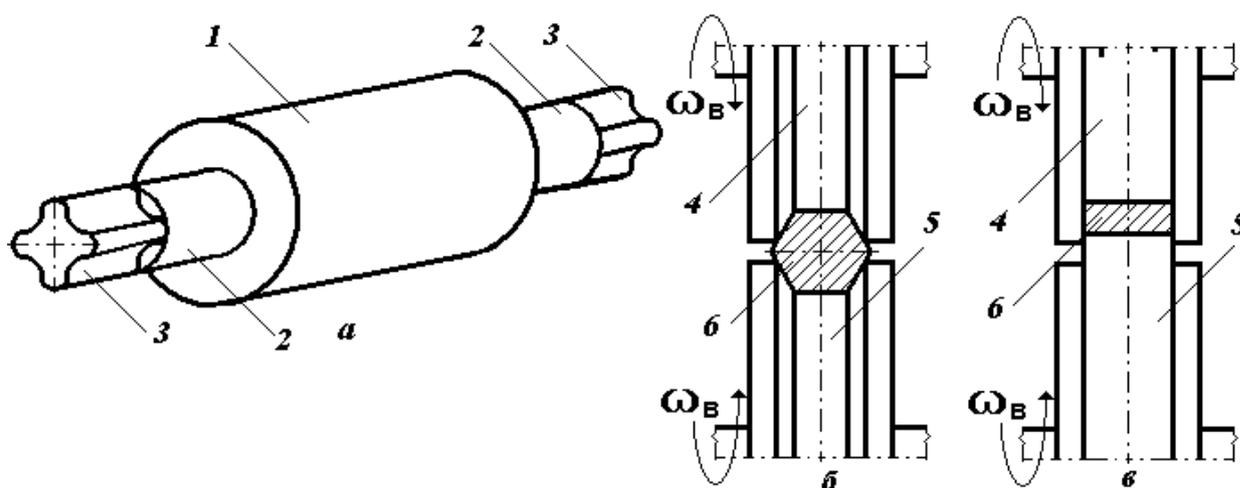


Рис. 13.5. Прокатные валки: а - с гладкой бочкой; б - ручьевые с открытым калибром; в - ручьевые с закрытым калибром; 1 - рабочая часть (бочка); 2 - опорная часть (шейка); 3 - соединительная часть; 4 - ручей верхнего валка; 5 - ручей нижнего валка; 6 - калибр.

Валки изготавливают из чугуна, литой и ковальной углеродистой и легированной стали и твердых сплавов. Число валков, диаметр и длина бочки рабочего валка являются основными параметрами прокатного стана.

Прокатка производится на прокатных станах. Главная линия прокатного стана (рис. 13.6) состоит из рабочей клетки, соединительных шпинделей,

шестеренной клетки, муфт, редуктора, маховика, двигателя. На мощных прокатных станах (блюминги, слябинги и др.) каждый приводной валок получает вращение от самостоятельного двигателя постоянного тока специальной конструкции. Рабочая клеть предназначена для деформирования металла. Она состоит из двух станин, в которых располагаются валки, подшипники для валков и механизмы для установки положения валков.

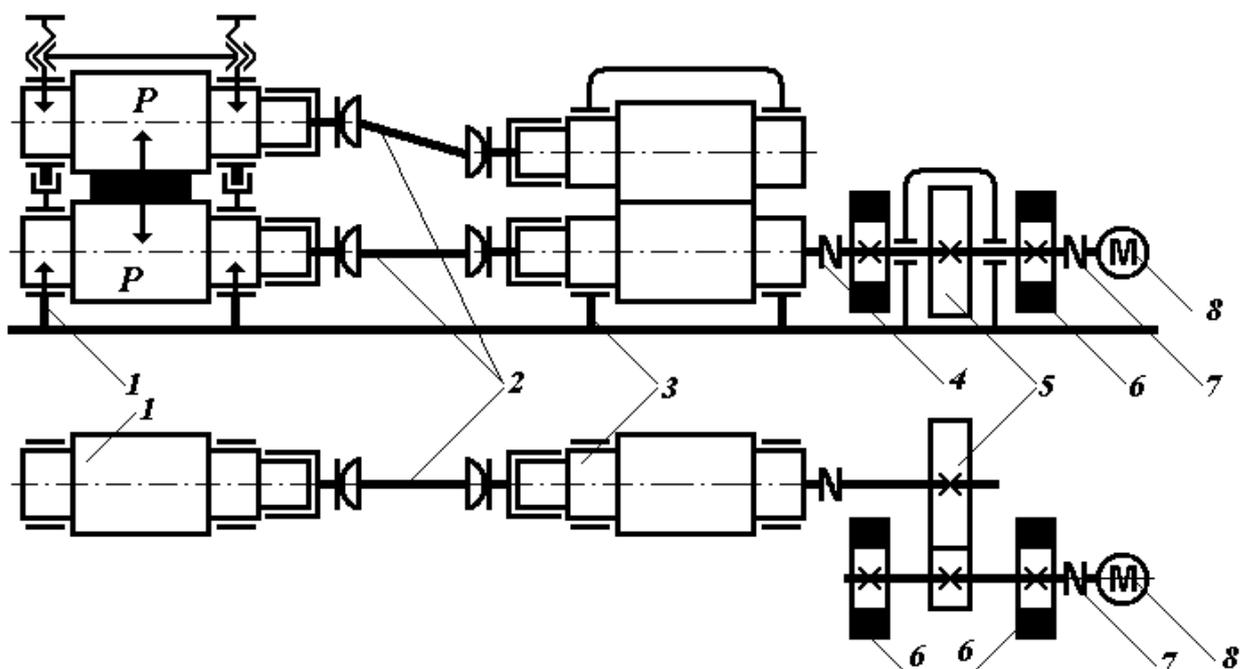


Рис. 13.6. Главная линия прокатного стана: 1- рабочая клеть; 2 - соединительные шпиндели; 3 – шестеренная клеть; 4, 7 – муфты; 5 – редуктор; 6 – маховик; 8 – двигатель; P – усилие прокатки.

### Прессование

Прессование - выдавливание металла из замкнутой полости через отверстие в инструменте. Применяют ряд методов прессования. Основные методы: прямой и обратный. При прямом прессовании (13.7, а) металл заготовки 3 выдавливается пуансоном 2 и пресс-шайбой 5 через отверстие матрицы 4. При получении полого профиля прямым прессованием (13.7, б) металл выдавливается через зазор, образованный отверстием в матрице и иглой 6. При обратном прессовании усилие прессы передается через пуансон (13.7, в) на матрицу. Матрица перемещается относительно стенок контейнера. Металл

заготовки выдавливается через отверстие матрицы, образуя изделие 7.

Аналогично осуществляется обратное прессование полого профиля.

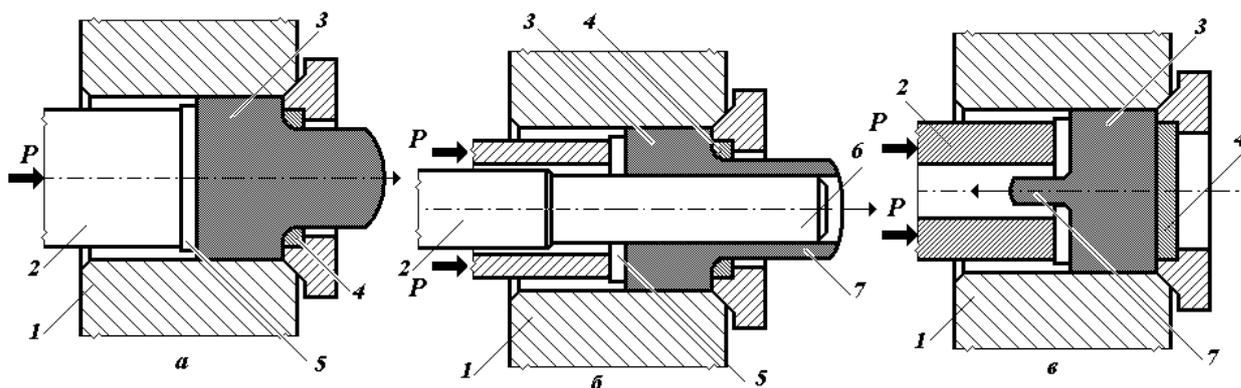


Рис. 13.7. Схемы прессования: а - прямое прессование сплошного профиля; б - прямое прессование полого профиля; в - обратное прессование сплошного профиля; 1 - контейнер; 2 - пуансон; 3 - заготовка; 4 - матрица; 5 - пресс-шайба; 6- игла; 7 - прессованное изделие; P – усилие прессования.

При прямом прессовании направление движения пуансона и выдавливаемого металла совпадают. Отличительной особенностью прямого метода прессования является перемещение металла заготовки относительно стенок контейнера 1. Благодаря трению о стенки контейнера центральные слои металла опережают внешние. Это явление еще больше усиливается при охлаждении внешних слоев стенками контейнера. На некотором этапе прессования по центру со стороны пуансона (пресс-шайбы) образуется воронка, через которую в центральную часть изделия втягиваются поверхностные загрязненные окислами и смазкой слои, образуя так называемую пресс-утяжину. Наличие пресс-утяжины в изделии недопустимо. Поэтому прессование на этой стадии прекращают, годное изделие отделяют, а оставшийся в контейнере металл (пресс-остаток) направляется в переплавку.

При обратном прессовании направление движения выдавливаемого металла и пуансона противоположны. Относительное перемещение металла заготовки и стенок контейнера, следовательно, контактное трение между

металлом и стенками контейнера практически отсутствует. При обратном прессовании течение металла более равномерно, чем при прямом, из-за сокращения потерь на трение усилие меньше прессования уменьшается на 25...30%, уменьшается величина пресс-остатка, но конструктивное оформление рабочего инструмента (матрицы, пуансона) при обратном прессовании сложнее, чем при прямом.

Прессованием получают прутки диаметром 3...250 мм, проволоку диаметром 1...6 мм, трубы диаметром 20...600 мм с толщиной стенки 1,0...1,5 мм и более, сплошные и полые профили. Прессованию подвергают цинк, олово, свинец, алюминий и алюминиевые сплавы, магний и магниевые сплавы, медь и медные сплавы, никель и никелевые сплавы, углеродистые и легированные стали, титан и титановые сплавы. При прессовании наибольшее распространение получили специализированные гидравлические горизонтальные и вертикальные прессы. Вертикальные прессы с номинальным усилием до 30 МН применяют, главным образом, при производстве труб, горизонтальные прессы изготавливают с номинальным усилием до 100 МН.

К прессовым инструментам относятся: игла, матрица, контейнер, пресс-шайба (в порядке повышения температуры при эксплуатации). Температура заготовки на поверхности контакта с инструментом при прессовании легких сплавов достигает 500°C, меди и медных сплавов - 900°C, сталей, никеля и титана - 1250°C. Напряжения достигают 150 МПа. Для изготовления инструмента применяют жаропрочные штамповые стали типа 3X2B8, 4XBC, 5XBC и др. Для увеличения стойкости матриц иногда применяют вставки из твердых сплавов. Большое влияние на силу прессования и стойкость матриц оказывает профиль рабочей части матрицы. Обычно применяют конические матрицы с оптимальным для данных условий углом наклона.

Прессование, как правило, производится в условиях горячей деформации. Исходной заготовкой обычно служит слиток цилиндрической формы или многогранник, полученный непрерывным литьем, реже применяется катаная

заготовка. Обычно отношение длины к диаметру слитка равно 1,5...2 для полых профилей и 2...3 для сплошных. Оптимальная температура нагрева выбирается в зависимости от пластичности и сопротивления деформации металла, окисления поверхности, схватывания (сварки) металла с инструментом и т.д. Для выравнивания скоростей течения металла применяют подогрев контейнера, матрицы и пресс-шайбы до 200...300°C и иглы до 350...400°C. Перед прессованием рабочие части инструмента покрываются технологической смазкой. Применяют также плакирование (покрытие) заготовок пластичными металлами.

Преимущества прессования перед другими видами обработки заключаются в следующем: Возможность получения сплошных и полых профилей сложного сечения, которые не могут быть получены другими методами, применяемыми в технике, в том числе прокаткой. Переналадка прессы на новый профиль производится значительно быстрее, чем при прокатке, точность размеров профиля при прессовании выше, шероховатость поверхности меньше. Возможность получения тонкостенных бесшовных труб большого диаметра с малой разностенностью. Возможность обработки давлением металлов и сплавов с пониженной пластичностью (высокопрочные алюминиевые сплавы, бронзы, жаропрочные стали и сплавы и др.). Пластичность при прессовании увеличивается, т.к. металл находится в условиях всестороннего неравномерного сжатия. Возможность высоких степеней деформации (92 % по сечению и более), что обеспечивает высокие механические свойства, в том числе вибропрочность и сопротивление усталости.

Недостатки прессования: Значительный износ инструмента, матриц и особенно игл, из-за больших контактных напряжений и температур, особенно при прессовании никелевых сплавов, сталей и жаропрочных сталей и сплавов. Высокая стоимость инструмента. Неравномерность механических свойств по длине прессованного изделия из-за неравномерности течения металла. Большие технологические отходы, особенно при прессовании труб

большого диаметра. Отходы состоят из малодеформированного переднего конца профиля и пресс-остатка, который достигает при прямом методе 12...15 %, при обратном – 5...6 % от массы заготовки.

### Волочение

Волочение - процесс протягивания обрабатываемой заготовки через постепенно суживающееся отверстие инструмента (волоки). При волочении площадь поперечного сечения уменьшается, приобретая постоянное сечение по всей длине. Напряжение в вытягиваемом конце обрабатываемого металла во избежание обрыва не должно превышать его предела текучести. Таким образом, для устойчивости процесса волочения необходим определенный запас прочности в сечении после волочения. Приложение растягивающего усилия уменьшает пластичность и ограничивает величину деформации за одну протяжку и от отжига до отжига в целом.

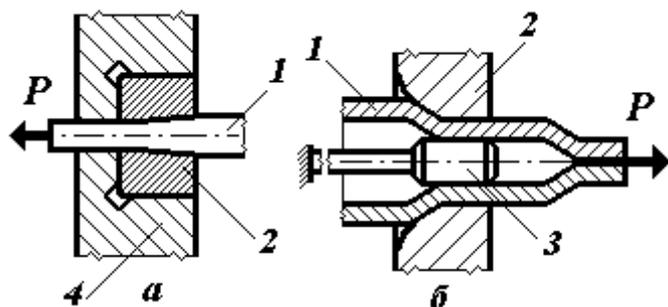


Рис. 13.8. Схемы волочения: а – волочение проволоки, прутка, сплошного профиля; б – волочение трубы на оправке; 1 – заготовка; 2 – волока; 3 –

оправка; 4 – обойма (бандаж); P – усилие волочения.

Волочением получают: проволоку (13.8, а) диаметром от 6 до 0,008 мм; прутки; сплошные и полые профили; трубы (13.8, б) с наружным диаметром 1...360 мм и менее и толщиной стенки 10...0,1 мм и менее, имеющие точные по размерам сечения и низкую шероховатость поверхности.

Заготовку для волочения получают прокаткой или прессованием; заготовка должна иметь форму сечения, подобную форме сечения готового изделия.

Исходными материалами для волочения проволоки являются: проволока - катанка и прессованная проволока диаметром 5...9 мм, для волочения

прутков и профилей - сортовой прокат и прессованные профили диаметром 5...150 мм, для волочения труб - трубы сварные диаметром 6...200 мм, бесшовные катаные диаметром 40...200 мм и менее и прессованные диаметром 20...400 мм и менее. При производстве проволоки и прутков из труднодеформируемых и тугоплавких металлов и сплавов (вольфрам, молибден и др.) заготовки получают ковкой в горячем состоянии на ротационно-ковочных машинах и ковочных автоматах.

Волочение производят, как правило, в условиях холодной деформации.

Волочение проволоки из вольфрама, молибдена, никрома и цинка производят в горячем состоянии. Из-за возможности обрыва (разрушения) под действием растягивающего усилия деформация при волочении относительно невелика.

Отношение сечений до и после волочения в среднем составляет 1,25...1,3, а при прессовании достигает 100 и более. В связи с этим особое внимание уделяется повышению пластичности исходной заготовки и снижению усилия волочения. Это достигается применением термообработки (отжига) для снятия упрочнения, высоким качеством поверхности заготовки, применением высокоэффективных смазочных материалов, оптимальным профилем и малой шероховатостью поверхности рабочих участков инструмента.

Волочение в ряде случаев применяется для калибровки сортового проката.

Для этого производят одну или несколько протяжек, что повышает точность размеров сечения и улучшает качество поверхности.

### ***13.3. Процессы производства заготовок и готовых деталей***

#### ***Ковка***

Ковка - процесс обработки давлением, при котором для получения изделия заданных форм и размеров по заготовке наносится ряд последовательных ударов бойками молота или нажимов пресса. Изделие, получаемое ковкой или горячей штамповкой, называют поковкой. Ковкой получают поковки массой от 0,1 кг до 400 т. Ковка делится на ручную и машинную. Ковку применяют при штучном и мелкосерийном производстве, если к деталям

предъявляются повышенные требования по совокупности механических свойств (вибропрочность, сопротивление усталости и др.).

Все оборудование дляковки и штамповки можно разделить на две группы: машины статического действия и машины динамического действия.

Основной параметр машин статического действия - номинальная сила, машин динамического действия - энергия падающих частей в момент удара:  $E=0,5mV^2$ , где  $m$  - ударная масса, т.е. масса падающих частей,  $V$  - скорость падающих частей в момент удара по заготовке.

К машинам статического действия относятся ковочные гидравлические прессы. Пресс (рис. 13.9) имеет рабочий цилиндр 1, закрепленный в верхней неподвижной поперечине 10, которая колоннами 4 соединена с нижней неподвижной поперечиной 8, установленной на фундаменте. Главный плунжером 2 сообщает движение подвижной поперечине 3. Верхний 5 и нижний 6 бойки закреплены соответственно на подвижной поперечине и плите 7 нижней неподвижной поперечины. Крепление обычно осуществляют с помощью ласточкина хвоста и клина. Рабочий ход прессы (нажим верхнего бойка на заготовку) происходит под нажимом главного плунжера, на который воздействует рабочая жидкость (эмульсия). Движение траверсы вверх производится тягами 9 под действием давления на плунжеры в цилиндрах обратного хода 11. Гидравлический пресс оснащен гидравлической установкой, которая состоит из гидропривода, системы управления и трубопроводов. Рабочий и обратный ход прессы осуществляют жидкостью высокого давления (20...45 МПа), ход подвижной поперечины вниз до соприкосновения верхнего бойка с заготовкой - жидкостью низкого давления (0,4...1,2 МПа). Скорости движения подвижных поперечин регулируются в широких пределах: рабочий ход 0,03...0,2 м/с, ход без нажима на заготовку 0,1...0,5 м/с. Ковочные гидравлические прессы строят с номинальной силой до 200 МН и более. Поковки массой 3...5 Мг и более коуют только на гидравлических прессах.

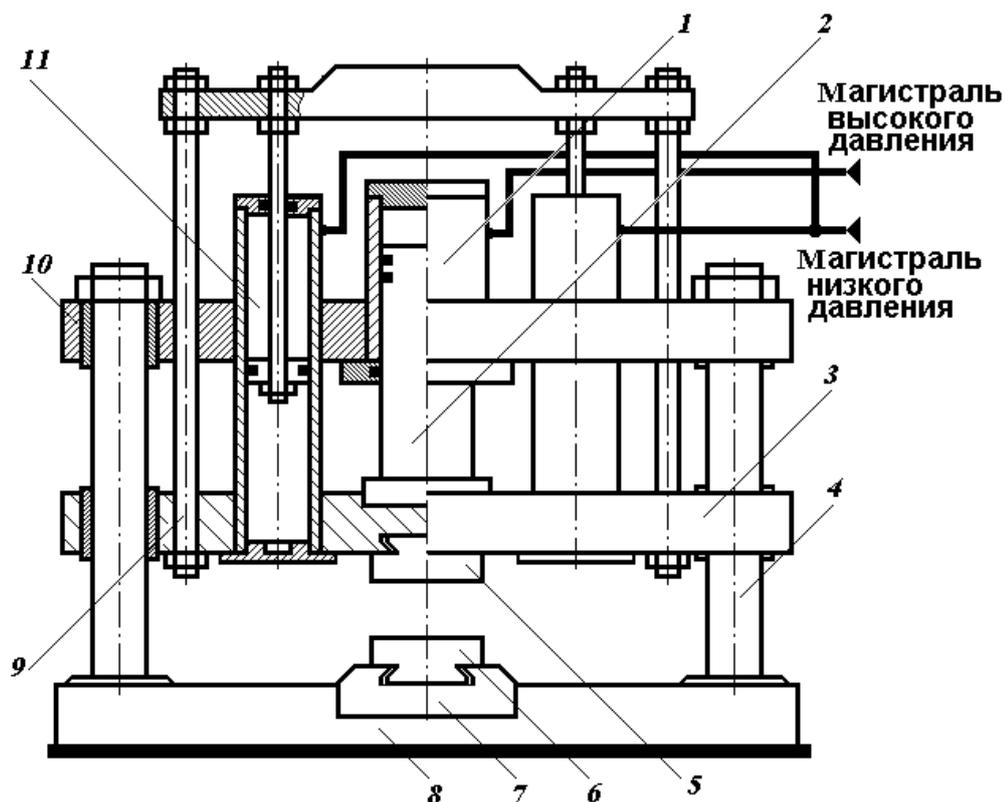


Рис. 13.9. Ковочный гидравлический пресс: 1 – рабочий цилиндр; 2 – главный плунжер; 3 – подвижная поперечина; 4 – колонна; 5 – верхний боек; 6 – нижний боек; 7 – плита; 8 – нижняя неподвижная поперечина; 9 – тяга; 10 – верхняя неподвижная поперечина; 11 – цилиндр обратного хода.

Промышленность РФ и за рубежом выпускает автоматизированные ковочные комплексы, в которых прессы имеют дистанционное и программное управление. Автоматизацию процессаковки осуществляют с использованием системы пресс-манипулятор на базе применения ЭВМ. Автоматизированные ковочные комплексы в настоящее время на автомобильных и других машиностроительных заводах успешно конкурируют при производстве различных ступенчатых поковок с горячей штамповкой.

К машинам динамического действия относятся ковочные молоты различных конструкций, с ударной массой от 50 кг до 800 Мг и энергией удара от 0,8 до 200 кДж.

Исходным материалом дляковки служат слитки, прокат и прессованные заготовки. Малые и средние поковки массой до 500 кг (вагонные оси,

шатуны, небольшие коленчатые валы, кольца крупных подшипников, рычаги крюки, заготовки для штамповочного инструмента и др.) изготавливают из блюмсов, сортового проката и прессованных заготовок. Тяжелые поковки массой до 250...300 кг (судовые прямые и коленчатые валы, валы гидрогенераторов и турбин, колонны прессов, прокатные валки и др.) изготавливают из слитков круглого, многогранного и квадратного сечений. Пустотелые крупные поковки (цельнокованные барабаны сосудов и котлов высокого давления, роторы генераторов, турбинные диски, трубы и кольца) коуют из полых слитков.

К основным операциямковки относятся: Осадка – уменьшение высоты заготовки при увеличении ее диаметра (рис. 13.10, а). Осадку применяют для получения поковок типа «диск»; как предварительную операцию перед прошивкой; при изготовлении пустотелых заготовок; для уничтожения литой дендритной структуры, измельчения зерна. Осадкой не рекомендуется деформировать заготовки при отношении высоты к диаметру более 2,5.

Разновидностью осадки является высадка (рис. 13.10, б). Высадка – осадка металла на части длины заготовки. Протяжка – удлинение заготовки или ее части (разгонка) за счет уменьшения ее площади поперечного сечения (рис. 13.10, в). Протяжку производят последовательными ударами плоского или вырезного бойка по отдельным участкам заготовки, с подачей последней вдоль оси протяжки и переворотом (при необходимости) на 90°. При каждом ударе уменьшается высота, одновременно увеличиваются ширина и длина заготовки. При перевороте заготовки, последующие удары устраняют уширение заготовки.

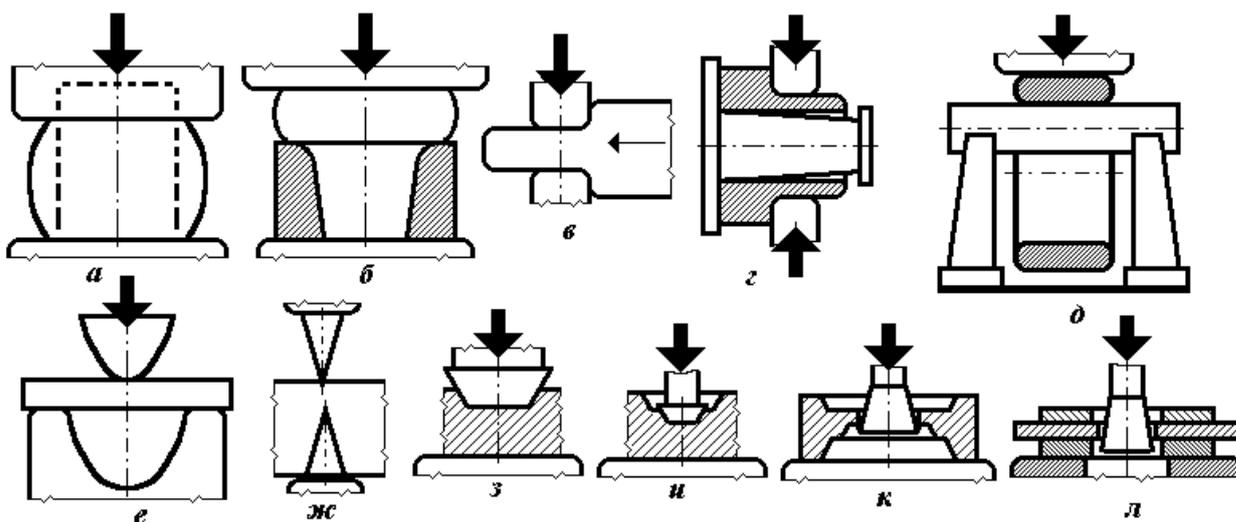


Рис. 13.10. Основные операцииковки: а – осадка; б – высадка; в – протяжка; г – протяжка с оправкой; д – раскатка на оправке; е – гибка; ж – отрубка; з – прошивка неглубоких полостей; и – прошивка глубоких полостей; к – прошивка сквозных полостей; л - высадка с подкладкой; стрелками указаны направления действия силыковки.

При протяжке цилиндрических заготовок плоскими бойками, в центре удара появляются значительные растягивающие напряжения и возможно появление трещин. При протяжке заготовок вырезными бойками, силы, направленные с четырех сторон, способствуют более равномерному течению металла, что устраняет возможность появления осевых трещин. Протяжка с оправкой (рис. 13.10, г) – увеличение длины пустотелой заготовки за счет уменьшения толщины стенок. Протяжку выполняют в вырезных бойках с установкой заготовки на коническую оправку. Раскатка на оправке (рис. 13.10, д) – одновременное увеличение наружного и внутреннего диаметров заготовки за счет уменьшения толщины ее стенок. Гибка (рис. 13.10, е) – придание заготовки изогнутой формы по заданному контуру. При гибке необходимо учитывать: пружинение заготовки; искажение ее поперечного сечения (утяжка); возможность образования складок по внутреннему радиусу. Отрубка (рис. 13.10, ж) – отделение части заготовки по не замкнутому контуру. Отрубку производят топорами различной формы. Скручивание – поворот части заготовки вокруг ее оси. Прошивка – получение полостей в

заготовке. Неглубокие полости получают за один проход (рис. 13.10, з), глубокие полости получают за два и более прохода (рис. 13.10, и), сквозные полости получают за несколько проходов с переверотом заготовки (рис. 13.10, к). В тонких заготовках, сквозные отверстия получают высадкой с подкладкой (рис. 13.10, л). Небольшие партии заготовок со сложной конфигурацией куют в подкладных штампах. Подкладной штамп состоит из одной или двух частей, в которых выполнена полость, соответствующая конфигурации поковки.

Разработка технологического процессаковки включает составление чертежа поковки, расчет размеров и массы заготовки, выбор основных, вспомогательных и отделочных операций с указанием основного и вспомогательного инструмента, выбор машинного оборудования, определение режимов нагрева и охлаждения поковок. При проектировании поковки необходимо учитывать следующие технологические требования:

Простейшие геометрические поверхности (цилиндр, плоскость).

Желательной избегать конических и клиновых поверхностей, т.к.

появляющаяся осевая сила может вырвать заготовку и травмировать

оператора. Пересечения «цилиндр - цилиндр» желательно заменять

пересечением «цилиндр - плоскость», практически невозможно отковать

ребристые поверхности и местные выступы. Высоколегированные стали

склонны к упрочнению, поэтому их куют на прессах.

При составлении чертежа поковки сначала вычерчивают тонкими линиями габаритные формы детали. Размеры и формы поковки отличаются на значения припуска (технологического припуска) и напуска (конструктивного припуска). Технологический припуск - увеличение размера поковки сверх номинального размера детали для последующей обработки резанием.

Значения технологических припусков устанавливают такими, чтобы после обработки резанием обеспечить удаление дефектов металлургического происхождения, получать заданные размеры детали с необходимой точностью и шероховатостью поверхности. Чем выше уровень технологии

ковки, тем меньше технологический припуск. Напуск или конструктивный припуск - дополнительный объем металла, добавляемый к объему детали, для упрощения формы поковки, необходимый для осуществления процесса ковки. Напуски удаляют последующей обработкой резанием. Чем больше напуски, тем менее технологична конструкция детали, т.е. конструктор не учел особенностей способа получения заготовки детали, который он сам же задал. Толстыми линиями вычерчивают контур поковки по номинальным размерам.

### Объемная штамповка

Объемная штамповка - метод обработки, основанный на применении специального инструмента - штампа. Штамп состоит из двух или нескольких частей, которые в сомкнутом состоянии образуют одну или несколько полостей. При сближении частей штампа происходит принудительное перераспределение металла заготовки, в результате чего полость штампа заполняется, получают заданные формы и размеры поковки. Основные виды объемной штамповки: горячая - в условиях близких к горячей деформации, холодная - в условиях холодной деформации, теплая - в условиях неполной холодной деформации, полугорячая - в условиях неполной горячей деформации.

### Горячая штамповка

Горячая штамповка, по сравнению с ковкой, имеет ряд преимуществ: значительно более высокая производительность; стабильность формы и размеров, более высокая точность размеров; возможность получения поволок более сложной формы. Конструктивные припуски меньше и иногда они могут отсутствовать (значимость этих преимуществ уменьшается по мере расширения технологических возможностей автоматизированных комплексов). Однако для штамповки требуются штампы, имеющие высокую стоимость и ограниченную стойкость. По мере увеличения массы (объема)

поковок стоимость штампа увеличивается, а стойкость уменьшается.

Поэтому особое внимание необходимо уделять фасонированию заготовок перед штамповкой, а также возможности замены штамповки специальными видами прокатки.

Горячая штамповка имеет существенные преимущества, по сравнению с обработкой резанием: значительно более высокие механические свойства, в том числе сопротивление усталости и вибропрочность, и их стабильность; увеличение коэффициента использования материала при оптимизации технологии и конструкций штампов. В настоящее время разрабатываются и реализуются новые технологии, конструкции штампов и оборудования, обеспечивающие рентабельность процесса не только при массовом и крупносерийном производстве, но при серийном и мелкосерийном производстве, доля которых в выпуске машиностроительных предприятий постоянно увеличивается. Автоматизируется проектирование технологии и инструмента, создаются автоматизированные технологические комплексы, расширяется сеть специализированных заводов по производству поковок горячей штамповкой.

Исходные материалы для штамповки - стальной прокат в виде прутков (обычно круглого, а также квадратного, прямоугольного и других сечений), блюмсов, труб и профилей переменного сечения (периодический прокат), прессованные прутки и трубы из бронзы, алюминиевых сплавов и других сплавов с пониженной пластичностью. Для штамповки на автоматах и точной горячей штамповки применяют калиброванный прокат.

Наиболее распространена штамповка из мерной заготовки, отрезанной в штампе от прутка, имеющей заданные размеры и массу. Из каждой заготовки обычно штампуется одна поковка. Для повышения производительности иногда применяют многоштычную штамповку, при которой из одной мерной заготовки одновременно штампуется до 6...8 поковок относительно небольшого размера.

Технологический процесс горячей штамповки включает: разделку исходных материалов на заготовки, нагрев заготовок, штамповку, первичную термообработку поковок и отделку поковок. В соответствии с этим в штамповочных цехах имеются заготовительное, штамповочное, термическое и отделочное отделения.

В современных кузнечных цехах основным способом разделки проката на заготовки является точная резка на ножницах и прессах. Технология формоизменения при штамповке зависит от вида применяемого оборудования. Для штамповки применяют кривошипные горячештамповочные прессы (КГШП), горизонтально-ковочные машины (ГКМ), гидравлические прессы, современные машины динамического действия, гибочные машины, крутильные машины и др. При массовом производстве поковок относительно небольшого размера применяют горячештамповочные автоматы. Штамповку на молотах в настоящее время на современных заводах не применяют из-за ряда недостатков: шум и вибрации, пониженная производительность, непригодность к современным условиям механизации и автоматизации; большие штамповочные уклоны и др.

При составлении чертежа штамповочной поковки и выборе конструкции штампа для горячей штамповки необходимо учитывать следующие общие положения: Геометрическая форма штампуемой детали и выбор поверхности штампа должны обеспечить возможность выема поковки из штампа.

Увеличение количества поверхностей разъема позволяет увеличить сложность формы поковки, но уменьшает точность, увеличивает вероятность смещения одной части поковки относительно другой, усложняет технологию штамповки и конструкции штампа. Плоскость разъема штампа (разъем) желательно производить таким образом, чтобы полости штампа имели наименьшую глубину и наибольшую ширину, что облегчает заполнение полости. Полость значительно легче заполняется при осадке, чем при выдавливании. Целесообразно делать разъем по плоскости и наиболее

простой конфигурации внешнего контура с тем, чтобы упростить конструкцию штампа, конструкцию обрезной матрицы и фиксацию в ней поковки. Для облегчения выемки поковок из штампа боковые поверхности поковок при штамповке на прессах должны иметь штамповочные уклоны. Величина уклонов должна быть на наружных поверхностях больше, чем на внутренних. Все переходы выполняются по определенным радиусам. Конструкция поковки, выбор плоскости разъема должны обеспечивать соосность усилий при штамповке для предотвращения перекоса и упрощения конструкции штампа. Если эксцентricности нагрузки нельзя избежать, то необходимо предусмотреть дополнительные устройства, предотвращающие смещение частей штампа относительно друг друга. При конструировании деталей сложной формы необходимо установить технико-экономическую целесообразность изготовления ее из нескольких частей с последующей сваркой или запрессовкой. Это может сократить расход металла, уменьшить расходы на штамповочный инструмент. Конструкцией поковки должны быть предусмотрены наименьшие технологические и конструктивные припуски, обеспечивающие заданные показатели качества детали при наивысших технико-экономических показателях производства. Конструкция поковки должна удовлетворять требованиям технологии, условиям механизации и автоматизации, как штамповки, так и обработки резанием и других последующих операций.

Формоизменение при штамповке производят в открытых и закрытых штампах, т.е. открытой и закрытой штамповкой.

Начальный, промежуточный и конечный моменты штамповки в открытом штампе приведены на **рис. 13.11**.

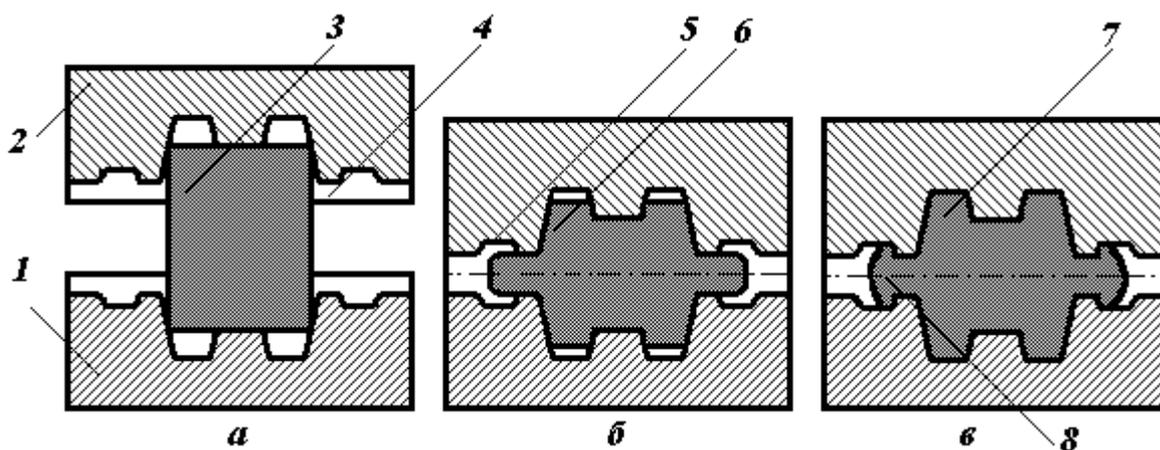


Рис. 13.11. Открытая штамповка:

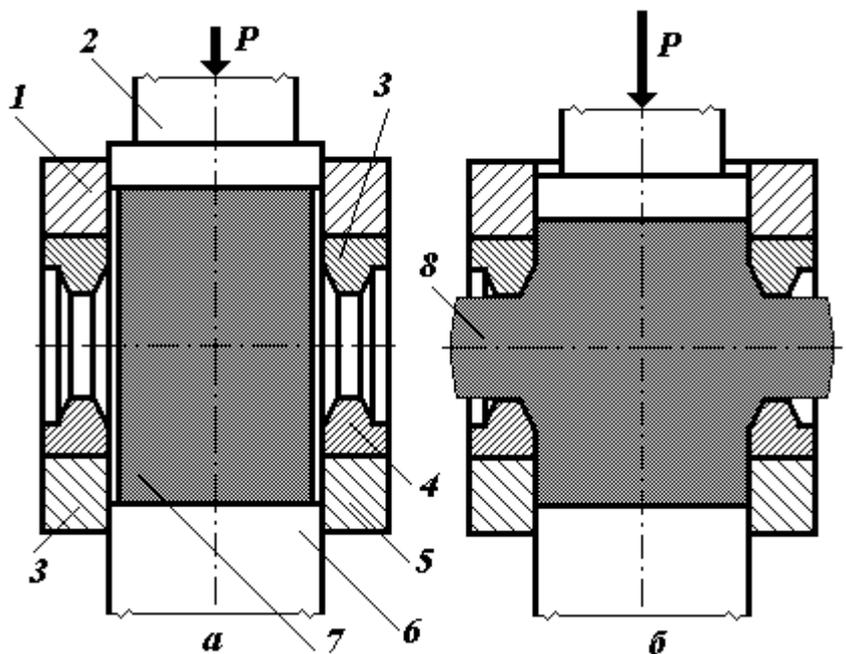
а, б, в – начальный, промежуточный и конечный моменты штамповки; 1 – нижняя часть штампа; 2 – верхняя часть штампа; 3 – заготовка; 4 – канавка для облоя; 5 – магазин; 6 – промежуточная поковка; 7 – поковка; 8 – облой.

Объем заготовки 3 несколько больше объема полости штампа. При сближении частей штампа 1 и 2, течение металла заготовки 3 происходит в направлении наименьшего сопротивления. В некоторый момент металл, растекаясь в направлении, перпендикулярном движению частей штампа, выдавливается в облойную канавку 4, образуя промежуточную поковку б, облой 8. Канавка для облоя (размеры: ширина и толщина) проектируется и изготавливается таким образом, чтобы сопротивление металла выдавливанию облоя было несколько больше, чем сопротивление металла по заполнению любой наиболее сложной части штампа. Поэтому только при заполнении всей полости штампа (рис. 13.11, в) излишек металла выдавится в облой. В открытом штампе кроме канавки (щели) размещается магазин 5, в который выдавливается излишек металла. Поэтому к точности объема заготовки не предъявляется жестких требований. Открытая штамповка позволяет получать сложную по форме штамповку. После штамповки облой обрезается в обрезных штампах, как правило, на кривошипных прессах. Облой после обрезки направляется в переплавку. Средний отход металла на облой составляет 15...20%. Для деталей с отростками (крестовины) отход металла на облой достигает 100% от массы поковок. Такие детали более рационально получать поперечным выдавливанием в разъемных матрицах на

специализированных кривошипных прессах, при КИМ (коэффициент использования металла, равный отношению массы поковки к массе исходного материала) 80...85% (рис. 13.12). Низкий КИМ при открытой штамповке значительно ухудшает технико-экономические показатели кузнечного производства. Повышение КИМ может быть достигнуто применением малоотходной штамповки. При малоотходной штамповке взамен канавки для облоя для выдавливания излишков металла предусматривается специальная полость, называемая компенсатором. Действие компенсатора, аналогично канавке для облоя, основано на законе наименьшего сопротивления, т.е. последовательном заполнении элементов полости штампа различной сложности. В отличие от канавки для облоя, располагаемой по всему периметру поковки, геометрическая форма, размеры и место компенсатора рассчитываются согласно заданной конфигурации поковки. При малоотходной штамповке КИМ увеличивается до 60...80% и более.

Штамповка в закрытых штампах (рис. 13.13) не предусматривает образование облоя. Практически весь объем заготовки идет на образование поковки. При закрытой штамповке во избежание перегрузки штампа и оборудования (что особенно опасно для машин кривошипного действия) предъявляются жесткие требования к точности равенства объема заготовки и объема полости штампа, на которую влияет множество факторов. Для повышения точности объема заготовки применяют точную отрезку заготовок в штампе со специальными дозирующими устройствами, что удорожает подготовку производства. Основное ограничение применения закрытой штамповки - значительное увеличение сопротивления деформации при перераспределении металла по объему полости.

Рис. 13.12. Поперечное выдавливание в разъемных матрицах:  
 а - перед началом выдавливания; б - промежуточный момент выдавливания; 1, 5 - матрицедержатель; 2 - пуансон; 3, 4 - матрица; 6 - нижний пуансон и



выталкиватель; 7 - заготовка до выдавливания; 8 - заготовка после выдавливания; P – усилие выдавливания.

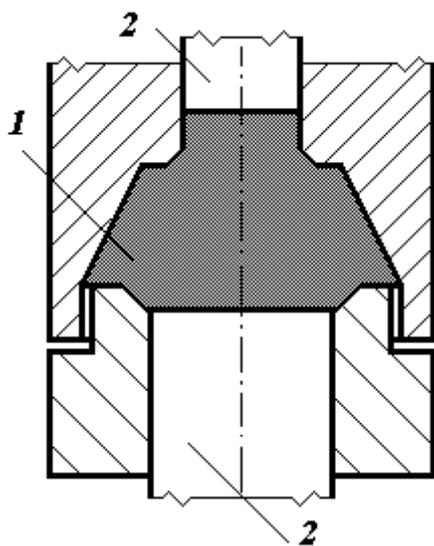


Рис. 13.13. Закрытая штамповка: 1 - поковка; 2 – выталкиватели.

При производстве поковок сложной формы необходимое усилие возрастает в 1,5 раза и более, стойкость инструмента резко снижается и расходы на инструмент превышают экономию от повышения коэффициента использования

металла. Закрытую безотходную штамповку в настоящее время практически целесообразно применять только при производстве поковок простой осесимметричной формы (но не шаров).

Фасонированием заготовок непосредственно из заготовок постоянного сечения (отрезанных от сортового проката (прессованных прутков)) можно изготовить поковки только простой формы. В этом случае штамповка производится в одноручьевом штампе. Если поковка имеет сложную форму, то из обычной заготовки в одноручьевом штампе ее отштамповать

практически невозможно. В большинстве случаев требуются заготовительные операции, в результате которых получается фасонная заготовка, близкая по форме и размерам к готовой поковке. Из фасонной заготовки в штамповочных ручьях получают окончательную форму поковки. Фасонную заготовку получают ковкой, периодической прокаткой, вальцовкой на ковочных вальцах, предварительной штамповкой на прессах, ГКМ и др. кузнечном оборудовании, а также многоручьевой штамповкой. Ковкой получают фасонные заготовки для штамповки крупных деталей. В этом случае сочетаются преимуществаковки (сокращаются расходы на инструмент) и объемной штамповки (уменьшаются припуски и напуски, повышается производительность). Периодический прокат с металлургических заводов получают при массовом производстве поволоков штамповкой. Прокатка более производительна и в целом более экономична. Учитывая преимущества периодического проката, при крупносерийном и серийном производстве, например, в автомобилестроении, станы периодической прокатки устанавливаются непосредственно на машиностроительном заводе.

Заготовка переменного по длине сечения может быть получена также на ковочных вальцах (рис. 13.14). Валки вальцов, на которых укреплены секторные штампы 2 с ручьями, вращаются в разные стороны. Заготовка подается в вальцах до упора 1, когда штампы поворачиваются в нерабочее положение. При обжатии поковка движется в сторону, обратную подаче положения. Деформация может производиться в нескольких ручьях, за несколько проходов. Ковочные вальцы обычно агрегируют с КГШП, ГКМ и другими кузнечными машинами.

При многоручьевой штамповке все необходимые для последовательного формоизменения заготовки ручки изготавливают в одном штамповом блоке, образующем многоручьевую штамповку. Многоручьевая штамповка на КГШП применяется при серийном и крупносерийном производстве (автотракторостроение, сельхозмашиностроение и др.). Ручьи при

многоручьевой штамповке делятся на штамповочные и заготовительные. В заготовительных ручьях получают фасонную заготовку, из которой в штамповочных ручьях получают окончательную форму поковки.

Многоручьевую штамповку применяют для поковок небольших по массе и длине.

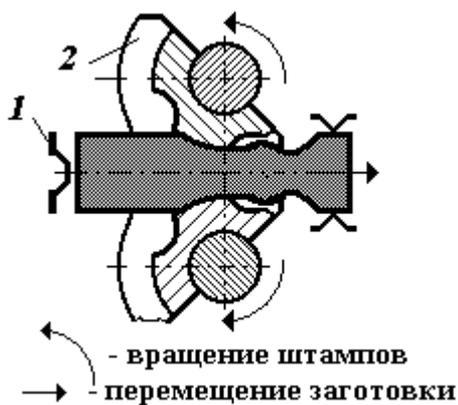


Рис. 13.14. Получение поковки на ковочных вальцах: 1 – упор; 2 – секторные штампы.

КГШП относится к большому классу штамповочных машин, у которых рабочим органом является ползун, который приводится в возвратно-поступательное движение при помощи кривошипно-ползунного механизма (рис. 13.15).

Электродвигатель 2 передает движение клиновыми ремнями 13 на маховик 1, сидящий на приемном (промежуточном) валу 3. На другом конце закреплено малое зубчатое колесо 4, которое находится в зацеплении с большим зубчатым колесом 5, свободно вращающемся на кривошипном валу 7. С помощью пневматической фрикционной дисковой муфты 6 зубчатое колесо может быть сцеплено с кривошипным валом. Тогда вал приводится во вращение. Посредством шатуна 8 вращение кривошипного вала преобразуется в возвратно-поступательное движение ползуна 11. Для остановки вращения вала после выключения муфты служит тормоз 12. Высота положения стола 10 прессы может изменяться с помощью клина 9. Для облегчения удаления поковки из штампа на прессы устанавливают выталкиватели, расположенные в столе и ползуне. Выталкиватели срабатывают при ходе ползуна вверх.

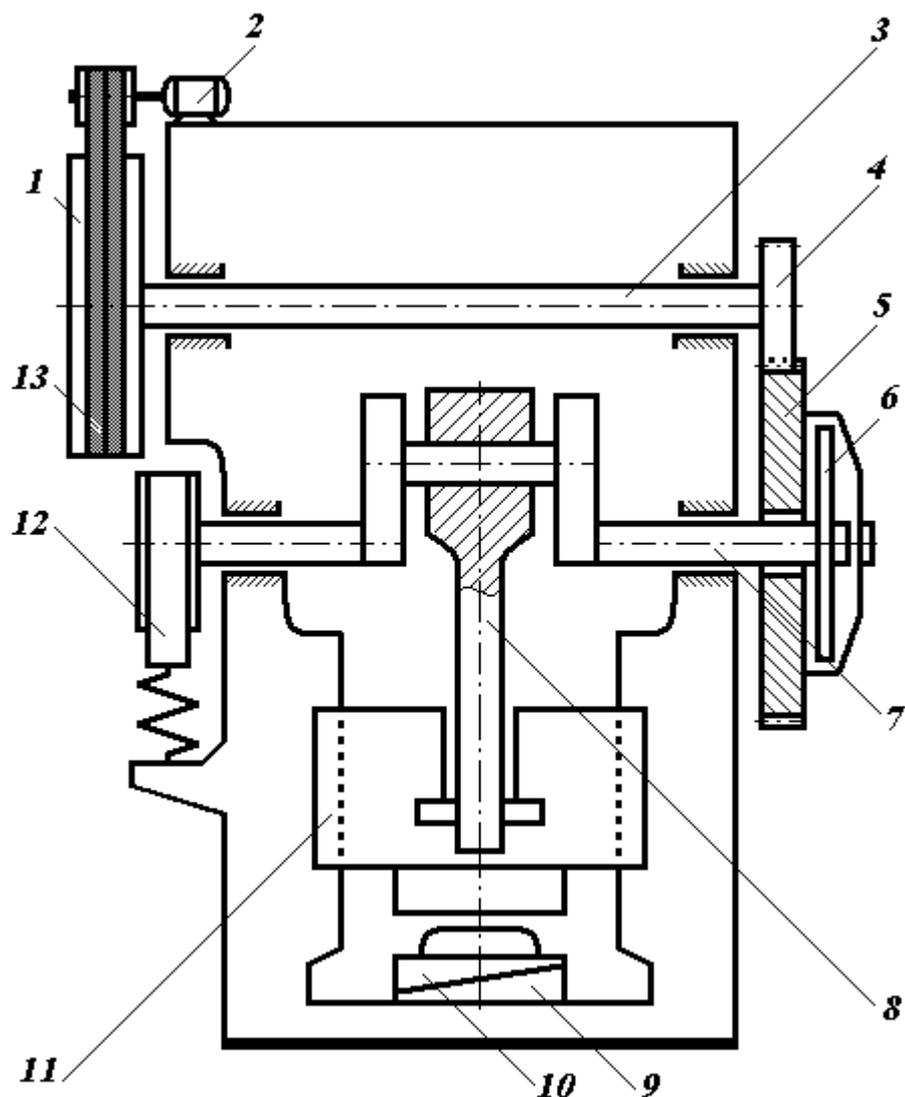


Рис. 13.15. Кривошипный горячештамповочный пресс (КГШП):

1 – маховик; 2 – электродвигатель; 3 – приемный (промежуточный) вал; 4 – малое зубчатое колесо; 5 – большое зубчатое колесо; 6 – пневматическая фрикционная дисковая муфта; 7 – вал; 8 – шатун; 9 – клин; 10 – стол пресса; 11 – ползун; 12 – тормоз; 13 – клиновые ремни.

Основные особенности штамповки на КГШП заключаются в следующем: На КГШП можно штамповать как в одноручьевых, так и в многоручьевых штампах, при этом обжатие в каждом ручье осуществляется за один ход ползуна, т.к. КГШП имеет фиксированную нижнюю точку хода ползуна. Высокая жесткость конструкции пресса, отсутствие ударов и сотрясений обеспечивают точность поковки по высоте, делают возможным применение

направляющих колонок у штампов, что практически исключает сдвиг. Снижаются или исключаются штамповочные уклоны за счет применения выталкивателей в верхней и нижней половинах штампа. При штамповке на КГШП применяют сборные штампы, состоящие из пакета с направляющими колонками и сменных ручьевых вставок, что позволяет экономить штамповую сталь, снижать трудоемкость изготовления и время на ремонт. Наличие колонок, увеличивающих точность поковок в горизонтальной плоскости. Наличие выталкивателей позволяет создать необходимые условия для работы инструмента при выдавливании. КГШП наиболее удобны для штамповки круглых в плане поковок, штампуемых в торец. Поковки с удлиненной осью и значительными перепадами сечений можно изготавливать на КГШП, используя фасонные заготовки, полученные на ковочных вальцах, а также периодический прокат. Сквозные отверстия в поковках получают на отдельной позиции в штампе КГШП, либо на обрезном кривошипном прессе. Облой при открытой штамповке удаляют аналогично.

На КГШП применяют прямое (рис. 13.16, а), обратное (рис. 13.16, б) и другие виды выдавливания. Использование выдавливания при горячей объемной штамповке дает возможность получить поковки с длинными стержнями простого, сложного и переменного сечения, глубокие стаканы и др. При штамповке выдавливанием за счет больших деформаций повышается производительность, улучшаются механические свойства, и повышается КИМ (штамповочные уклоны и облой в ряде случаев могут отсутствовать).

На КГШП возможна широкая механизация и полная автоматизация процесса, включая подачу заготовок в штамп и передачу из ручья в ручей, практически полная безопасность в работе.

Максимальная номинальная сила КГШП изготавливаемых за рубежом 100 МН. В России на заводе тяжелых механических прессов (г. Воронеж) освоено производство КГШП силой 125 МН и по заданию промышленности могут

быть изготовлены прессы с номинальной силой до 150...200 МН, что значительно расширяет технологические возможности горячей штамповки.

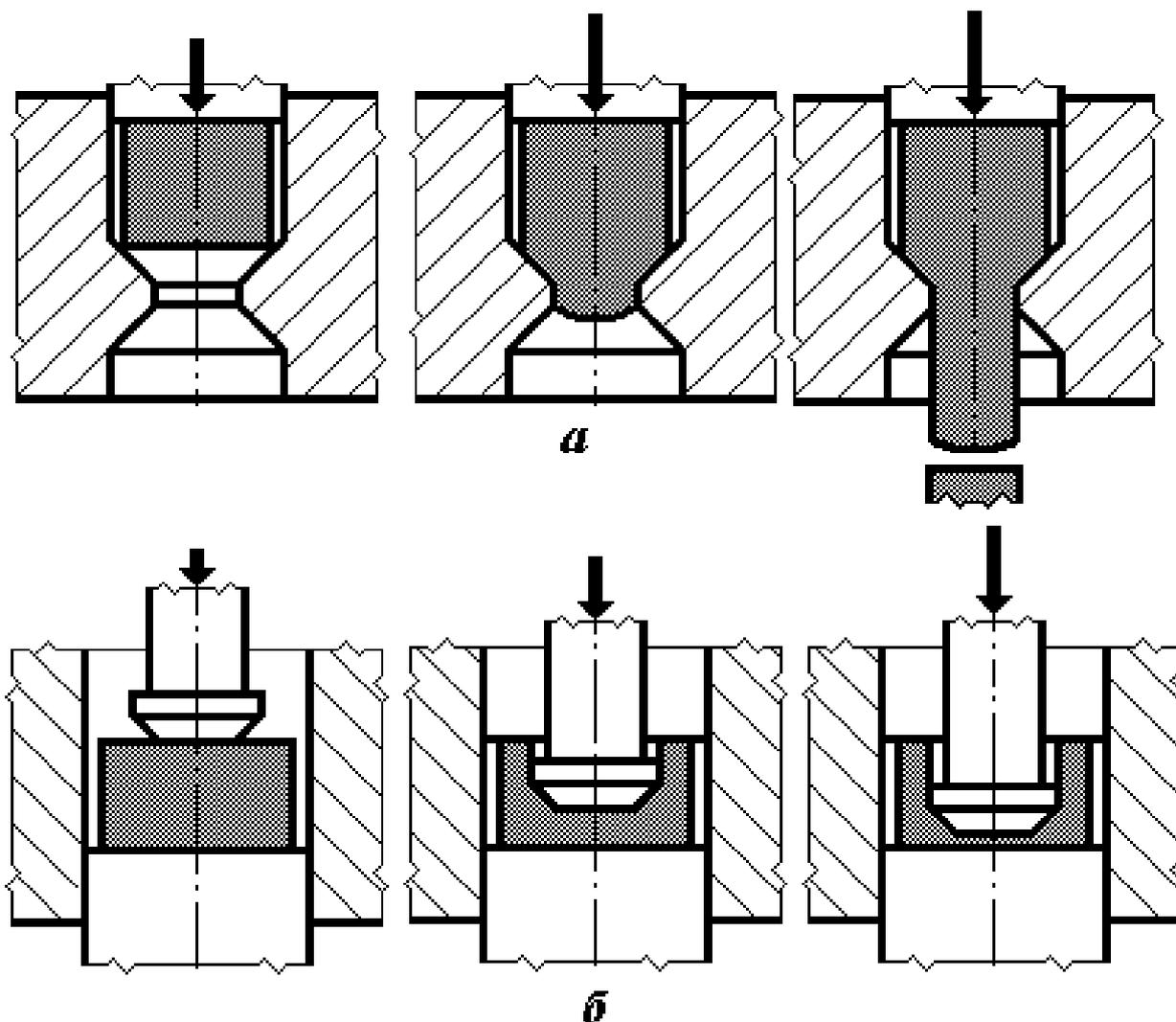


Рис. 13.16. Схемы выдавливания: а – прямое; б – обратное.

Типовые поковки, штампуемые на КГШП приведены на [рис. 13.17](#). Первая группа - осесимметричные поковки, изготавливаемые осадкой в торец или осадкой с одновременным выдавливанием. Вторая группа - поковки удлиненной формы с небольшой разницей поперечных сечений. Третья группа - поковки удлиненной формы со значительной разницей сечений с предварительным фасонированием заготовки. Четвертая группа - поковки с изогнутой осью различной сложности. Пятая группа - поковки, получаемые выдавливанием.

		ПОДГРУППА		
		1	2	3
ГРУППА	I			
	II			
	III			
	IV			
	V			

Рис. 13.17. Классификация поковок, штампуемых на КГШП.

ГКМ - кривошипный пресс с двумя горизонтальными ползунами. В отличие от КГШП штамп на ГКМ состоит из трех частей: неподвижной и подвижной матрицы и пуансона, имеет две плоскости разъема. Штамповка производится в один или несколько переходов в отдельных ручьях. На примере наиболее часто применяемой операции высадки рассмотрим последовательность процесса. Вначале пруток нагретым концом укладывают в неподвижную матрицу, положение прутка фиксируется упором (13.18, а). Далее подвижная часть матрицы приближается к неподвижной, зажимает пруток и образует полость штампа. Упор автоматически уходит в сторону (13.18, б). При движении пуансона высадкой заполняется полость штампа (13.18, в). Происходит обратный ход пуансона, части матрицы разжимаются (13.18, г) и заготовка удаляется из полости штампа, либо передается в следующий ручей.

Кроме высадки, на ГКМ осуществляют прошивку, выдавливание сплошных и полых тел, гибку и др.

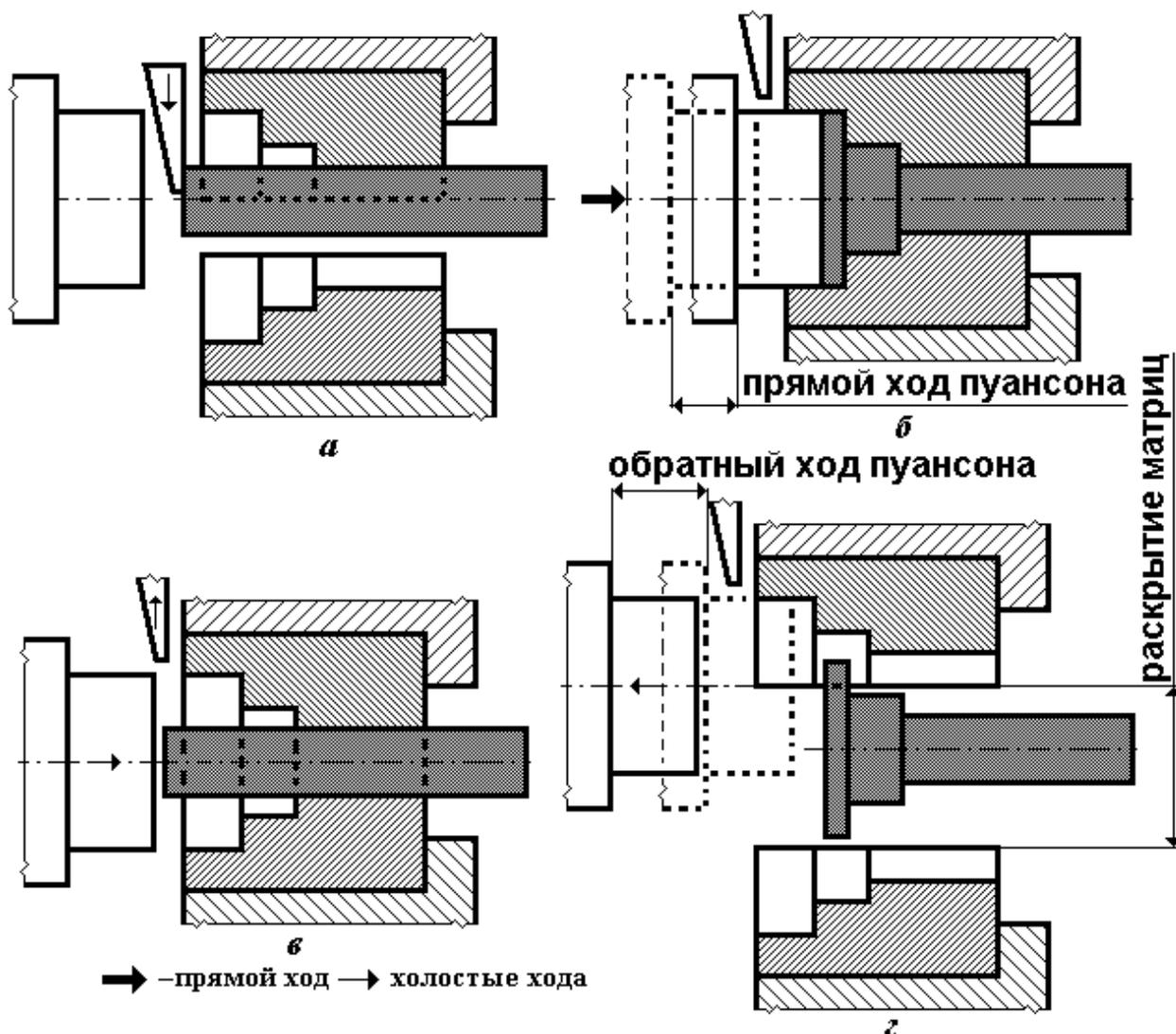


Рис. 13.18. Технологический узел ГКМ: а – пруток нагретым концом подан до упора в неподвижную часть матрицы; б – подвижная часть матрицы зажала пруток и образовалась полость штампа; в – полость штампа заполнена металлом при движении пуансона; г – произошло раскрытие матрицы

При конструировании поковок необходимо: задавать штамповочные уклоны на цилиндрических участках поковок, высаживаемых в полости пуансона (около  $0,5^\circ$ ), на бортиках, формируемых в глубоких круговых впадинах матрицах ( $0,5 \dots 1,5^\circ$ ). Избегать конических форм выемок и хвостовиков.

ГКМ приспособлена к механизации и автоматизации процесса. При массовом производстве мелких поковок применяют горизонтально-ковочные автоматы.

ГКМ обычно имеют номинальное усилие 1...32 МН. Типовые поковки, получаемые на ГКМ приведены, на рис. 13.19.

		Примерная конфигурация поковок					
Группа	I	подгруппа	1				
			2				
			3				
	II	подгруппа	1				
			2				
			3				
	III	подгруппа	1				
			1				
	IV	подгруппа	1				
			1				
	V	подгруппа	1				
			1				
VI	подгруппа	1					
		1					

Рис. 13.19. Классификация поковок, штампуемых на ГКМ.

Современные гидравлические прессы строят с номинальной силой до 1000 МН. Принцип работы штамповочных прессов, такой же, как и ковочных. Прессы имеют выталкиватели для удаления поковок из штампа. Их применяют для штамповки особо крупных поковок массой до 500 кг, поковок из малопластичных сплавов, для операций с большим ходом инструмента. При штамповке на гидропрессах применяют обратное выдавливание для

получения тонкостенных с глубокими отверстиями поковок, для протяжки с целью утонения стенок ранее прошитой заготовки.

Штамповкой на гидравлических прессах получают крупные рычаги, фланцы, зубчатые колеса, полые корпуса, диски железнодорожных колес, крупные коленчатые валы, днища резервуаров, гребные винты, ребристые панели, стабилизаторы, корпусные детали самолетов и ракет.

Освоено производство быстроходных гидравлических штамповочных прессов, в которых разница в числе ходов, по сравнению с механическими прессами, уменьшилась до 2...5 раз. Применяют также гидравлические штамповочные прессы двойного действия, у которых, кроме рабочих цилиндров, расположенных на неподвижной траверсе, имеются рабочие цилиндры, плунжеры которых имеют горизонтальное перемещение, а оси их совпадают с осями разъема.

### Холодная объемная штамповка

Холодная объемная штамповка (ХОШ) - это способ получения в штампах заготовок и деталей из сортового проката и пресованных прутков, основанный на процессе холодной деформации.

Основные операции ХОШ: высадка открытая и закрытая, выдавливание и вдавливание.

*Высадку* (рис. 13.20) применяют для получения ступенчатых деталей с образованием фланцев и других местных утолщений, для набора металла последующей штамповкой. На процессе высадки основано производство крепежных деталей (болтов, винтов, заклепок, гвоздей и т.п.), шаровых пальцев автомобилей и других деталей с шаровой головкой, штуцеров и т.п. При ХОШ применяют все виды выдавливания: прямое, обратное, поперечное, комбинированное и радиальное (рис. 13.21).

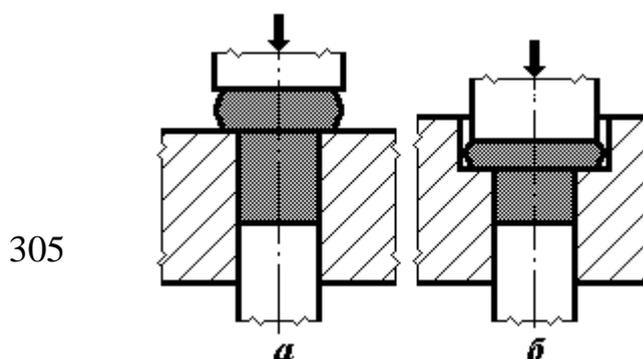


Рис. 13.20. Схемы высадки: а – открытой; б – закрытой.

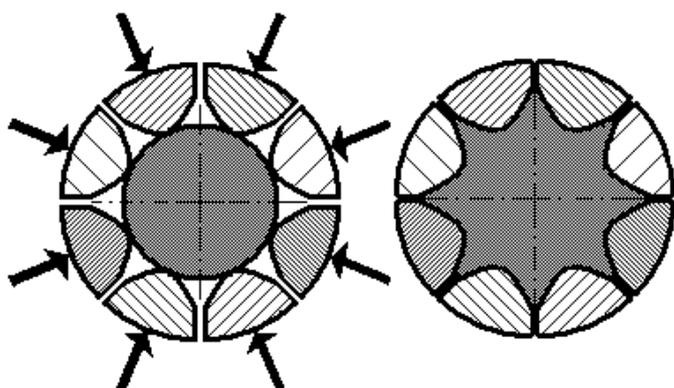


Рис. 13.21. Схема радиального выдавливания

При прямом выдавливании

сплошного стержня невыдавленная часть заготовки имеет поперечное сечение в виде круга или многоугольника. Выдавленная часть имеет поперечное сечение в виде круга, многоугольника или сложного профиля. Прямое выдавливание применяется для получения болтов, гаек, ступенчатых валов, деталей со шлицами и продольными канавками. Выдавленная часть может иметь переменное сечение (детали с отростками, бобышками и др.). При обратном выдавливании внешний и внутренний контуры поперечного сечения штампованной заготовки имеют форму круга или многоугольника или их сочетания. Его для получения гильз, колпачков, стаканов и других полых, трубчатых деталей, а также для получения полых и трубчатых заготовок для прямого и обратного выдавливания, а также для вытяжки при листовой штамповке. При комбинированном выдавливании сочетаются различные виды выдавливания (прямое выдавливание полого стержня + обратное выдавливание полого стержня, поперечное выдавливание + обратное выдавливание полого стержня и др.), что позволяет сократить технологический цикл при производстве сложных по форме деталей и существенно снизить нагрузки на инструмент. Радиальным выдавливанием получают звездочки, шестерни.

Прошивку и вдавливание широко применяют для получения полостей пресс-форм и штампов. В этом случае в заготовку вдавливаются мастер-пуансон с

соответствующей по форме и размеру необходимой полости пресс-формы или штампа. Наибольшее значение в технике имеют выдавливание и высадка.

Основной характерной особенностью процесса являются высокие давления на инструмент (2,5 ГПа и более), поэтому штамповочный инструмент имеет низкую стойкость. В связи с этим рекомендуется подвергать ХОШ сплавы с относительно низким сопротивлением деформации (алюминиевые и медные сплавы, низкоуглеродистые и малолегированные стали). Исходной заготовкой служит обычно калиброванный сортовой прокат или прессованный материал в виде прутков и проволоки. Иногда металл подвергается калибровке волочением. Перед штамповкой металл отжигают, очищают от окислов и загрязнений, наносят слой носителя смазочного материала и смазывают. Носитель смазочного материала на заготовки из углеродистой стали наносят фосфатированием.

Основным рабочим инструментом является матрица и пуансон. Матрицы подвергаются действию распорных усилий. Для повышения прочности и надежности матрицы запрессовывают в бандаж. Внешний контур матрицы изготавливают в виде конуса с углом наклона  $1,5^\circ \pm 15'$ . Внутренний размер бандажа несколько меньше, чем внешний размер матрицы, что создает натяг. Запрессовка матриц в бандаж производится в холодном состоянии. В зависимости от давления при штамповке применяют одно - и многобандажные матрицы. При наличии резких перепадов сечений матрицы изготавливают составными. Значительное влияние наряду с качеством поверхности рабочих частей инструмента оказывает их профиль, величину конуса принимают по справочным данным. В наиболее тяжелых условиях работает пуансон для обратного выдавливания полости. При выдавливании сталей длина рабочей части пуансона принимается не больше двух его диаметров. При выдавливании стальных деталей вставки матриц изготавливают из сталей типа Х12Ф1 и Х12М, пуансоны для обратного выдавливания из сталей типа Р6М5.

При массовом производстве крепежных и других ступенчатых деталей диаметром до 30...35 мм, применяют одно- и многопозиционные автоматы, являющиеся механическими прессами специальной конструкции. Исходной заготовкой служит калиброванная проволока диаметром до 35 мм, которая проходит через правильное устройство, и механизмом подачи на заданную длину подается на позицию отрезки. После отрезки, заготовка передается на позицию штамповки механизмом переноса с линии отрезки. На многопозиционном (число позиций от 3 до 6) автомате с позиции отрезки заготовка попадает на первую позицию, штампуется, выталкивается из матрицы, переносится на вторую позицию, штампуется и т.д. При штамповке крепежных и других деталей, имеющих резьбу, отштампованная заготовка после выталкивания с последней позиции автоматически передается и задается в накатное устройство автомата. Номинальное усилие автоматов достигает 15 МН и более.

При серийном производстве деталей диаметром до 100 мм, получаемых выдавливанием, применяют кривошипные прессы для холодного выдавливания с номинальным усилием до 30 МН. Отличительной особенностью таких прессов является их высокая жесткость, допустимость номинального усилия на большой длине хода ползуна, длинные направляющие ползуна, усиленные и надежно работающие выталкиватели. Штамповку более крупных деталей диаметром до 150 мм и длиной более трех диаметров осуществляют на гидравлических прессах для холодного выдавливания с номинальным усилием до 60 МН.

ХОШ - один из наиболее прогрессивных методов производства ступенчатых и полых заготовок и деталей из цветных металлов и сплавов, углеродистых и легированных сталей.

ХОШ, в том числе холодное выдавливание и высадка, широко применяются при производстве деталей диаметром до 50...100 мм и массой до 6...10 кг.

ХОШ имеет следующие преимущества: Деформационное упрочнение, отсутствие надрезов волокна, образующихся при обработке резанием,

направленность волокна вдоль конфигурации детали, улучшение микрогеометрии поверхности. Благодаря этому повышается сопротивление динамическим нагрузкам и вибропрочность. Переход на холодную объемную штамповку в ряде случаев позволяет использовать менее легированные стали и сплавы. По сравнению с литьем и горячей штамповкой, КИМ повышается на 10...30%. При ХОШ деталей с большими перепадами сечений и наличием полостей КИМ возрастает по сравнению с обработкой резанием в 2...3 раза. Следовательно, одним из основных направлений работы конструкторов машин и приборов и технологов является разработка конструкций узлов и деталей применительно к технологии ХОШ, и внедрении процессов ХОШ взамен обработки резанием. Обеспечивается высокая точность размеров (отклонения от номинального размера 0,01...0,1 мм) и низкая шероховатость поверхности (1,25...0,63) мкм и меньше. Это снижает объем доделочных операций, а иногда и исключает их. При крупносерийном и массовом производстве значительная экономия достигается за счет снижения трудоемкости. Применение для штамповки многопозиционных штампов, особенно многопозиционных автоматов, позволяет увеличить производительность, по сравнению с автоматами для обработки резанием, в 10...15 раз и более.

Основные ограничения процесса на данном уровне развития науки и техники: Низкая стойкость инструмента при штамповке заготовок из сталей и сплавов повышенной прочности. Ограниченность размеров и сложности формы детали. Необходимость применения специальных режимов разупрочняющей термической обработки и нанесения покрытий носителями смазочных материалов, что удлиняет и усложняет цикл производства. Повышенные требования к качеству проката, к инструментальным сталям и штамповочному оборудованию. Значимость этих ограничений с развитием науки и техники уменьшается.

### Теплая и полугорячая объемная штамповка

Применение ХОШ ограничено высоким сопротивлением деформации и интенсивностью деформационного упрочнения, что не позволяет штамповать детали из сплавов с повышенным сопротивлением деформации, детали сложной формы с большой массой, применять сплавы, обеспечивающие необходимые эксплуатационные свойства деталей, соответствующие требованиям современной техники из-за низкой стойкости инструмента и соответственно высокой их технологической себестоимостью.

Теплая объемная штамповка происходит при неполной холодной деформации, при которой процесс упрочнения сопровождается возвратом. Фактическая температура деформации находится в интервале от 0,25 до 0,3 температуры плавления ( $T_{пл}$ ). Полугорячая объемная штамповка происходит при неполной горячей деформации, при которой процесс упрочнения сопровождается возвратом и частичной рекристаллизацией. Согласно закону Н.С. Курнакова с повышением фактической температуры деформации сопротивление деформации уменьшается. Исключение составляют низкоуглеродистые стали, у которых, с повышенным содержанием азота, при неполной холодной деформации, по сравнению с холодной, сопротивление деформации увеличивается, а пластичность уменьшается. Возможность и эффективность перехода на теплую и полугорячую штамповку определяют из анализа кривых упрочнения, построенных в заданном интервале температур. Переход на теплую и полугорячую штамповку позволяет сохранить основные преимущества ХОШ (точность и повторяемость размеров, высокое качество поверхности, исключаящие при технологичности конструкций детали припуски на обработку резанием). В процессах с локальным нагружением, деформирующий инструмент воздействует на площадь давления в десятки раз меньшую, чем при обычном нагружении, что повышает стойкость инструмента и позволяет получать детали из сталей и сплавов повышенной прочности. Штамповку с локальным нагружением осуществляют, как правило, в условиях холодной деформации

и применяют, если технологические возможности классических методов производства заготовок деталей и готовых деталей (специальных видов прокатки,ковки,штамповки): Не позволяют получить заданные конструктивные элементы деталей (резьбы и профили, поперечные канавки и выступы, сложный профиль внешней поверхности полых деталей, в том числе переменное сечение по длине и др.). Не обеспечивают заданной точности размеров и соответственно полное исключение технологических и конструктивных припусков, а соответственно и обработки резанием. Экономически не эффективны из-за малой серийности производства, большой номенклатуры деталей, низкой стойкости инструмента. К процессам производства деталей или их отдельных элементов конструкции локальным нагружением относятся накатка (рис. 13.22), раскатка радиальная открытая (рис. 13.23, а) и закрытая (рис. 13.23, б), раскатка торцевая, раскатка полых заготовок качающимся инструментом (рис. 13.23, в), холодная поперечно-клиновья прокатка и др.

#### 13.4. Листовая штамповка

Листовой штамповкой называют способ получения плоских и пространственных деталей, при котором листовая материал пластически деформируется в холодном состоянии при помощи штампов. Исходным материалом для листовой штамповки служит металлопрокат в виде полос, листов, рулонов, лент, труб, а также листовые неметаллические материалы.

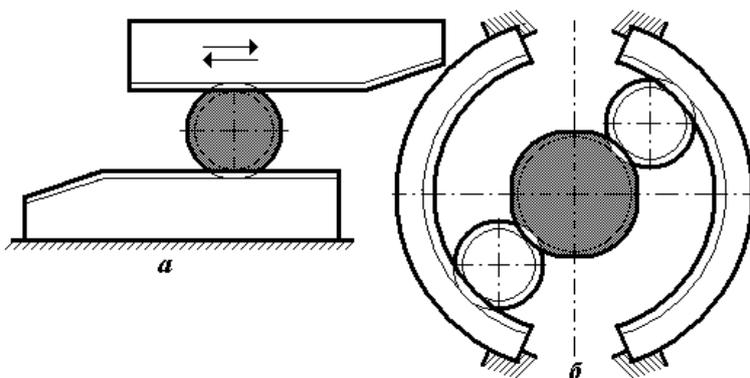


Рис. 13.22. Схемы накатки: а - плоскими плашками; б - роликом-сегментом.

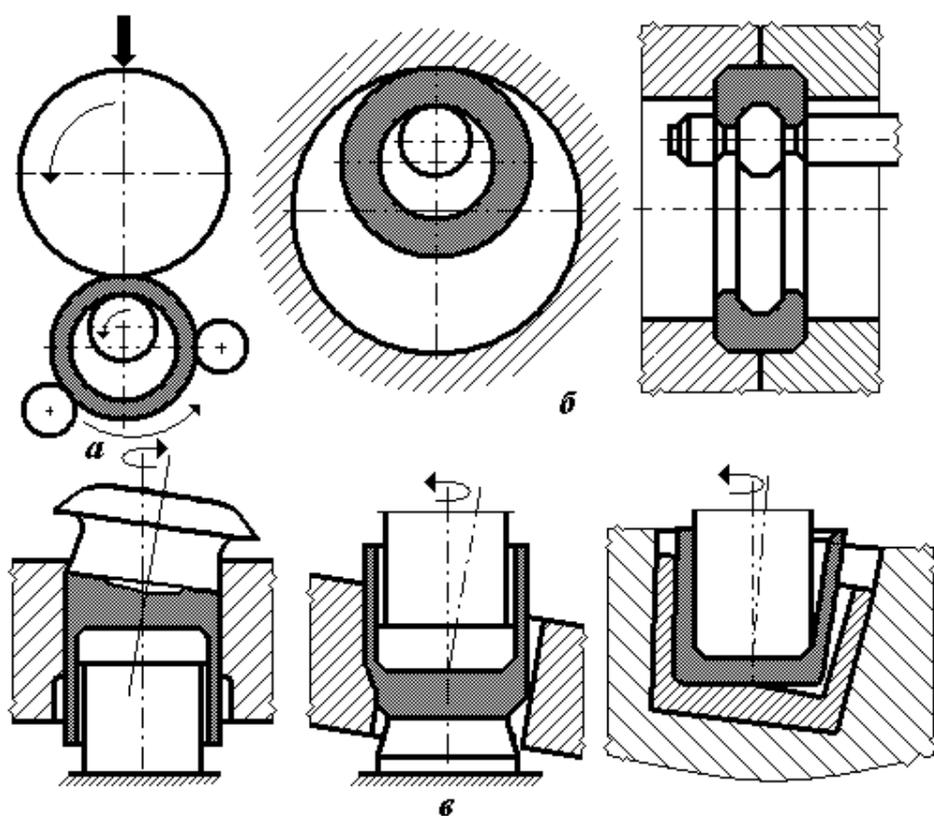


Рис. 13.23.  
Схемы радиальной раскатки: а – открытой; б – закрытой; в – полых заготовок качающимся инструментом.

Наиболее распространенными материалами для листовой штамповки являются углеродистые и легированные стали, широко используются также такие листовые материалы, как алюминий, медь, никель, титан и их сплавы. Из неметаллических материалов методами листовой штамповки обрабатывают бумагу, картон, резину, натуральную и искусственную кожу, войлок, слоистый и неслоистый пластики, различные синтетические материалы. Листовая штамповка применяется для изготовления самых разнообразных деталей, в том числе деталей кузовов и кабин автомобилей, летательных аппаратов, электрических машин, изделий народного потребления и др.

Широкое распространение листовой штамповки объясняется рядом достоинств этого вида металлообработки. К ним относятся: высокая точность и чистота поверхности деталей, как правило, не требующих дальнейшей механической обработки; высокая прочность деталей при незначительной их массе; высокая производительность процесса; возможность полной автоматизации процесса; существенная экономия металла; низкая себестоимость изготавливаемых деталей.

Операции листовой штамповки в соответствии с ГОСТ 18970-84\* подразделяют на две основные группы: разделительные и формоизменяющие. К первой группе операций относятся отрезка, вырубка, пробивка, обрезка, зачистка и др. Перечисленные операции характеризуются отделением одной части заготовки от другой по незамкнутому или замкнутому контуру.

Формоизменяющие операции характеризуются изменением формы исходной заготовки без ее разрушения. К ним относятся, гибка, вытяжка, формовка, отбортовка, правка и др.

Часто (особенно в массовом и серийном производстве) операции листовой штамповки осуществляются комбинированно, т.е. одновременно выполняются несколько операций в одном штампе. В зависимости от способа сочетания операций комбинированную штамповку подразделяют на: совмещенную, последовательную и последовательно - совмещенную.

Совмещенная штамповка позволяет получать деталь за один ход ползуна прессы или за одну установку заготовки в штампе. При последовательной штамповке детали изготавливают за несколько ходов ползуна прессы при последовательном перемещении заготовки от одной позиции штампа к другой за каждый ход. Последовательно – совмещенная штамповка – комбинированная штамповка, совмещающая в одном штампе функции последовательной и совмещенной штамповки.

#### *Разделительные операции*

Схемы основных разделительных операций приведены на **рис. 13.24**.

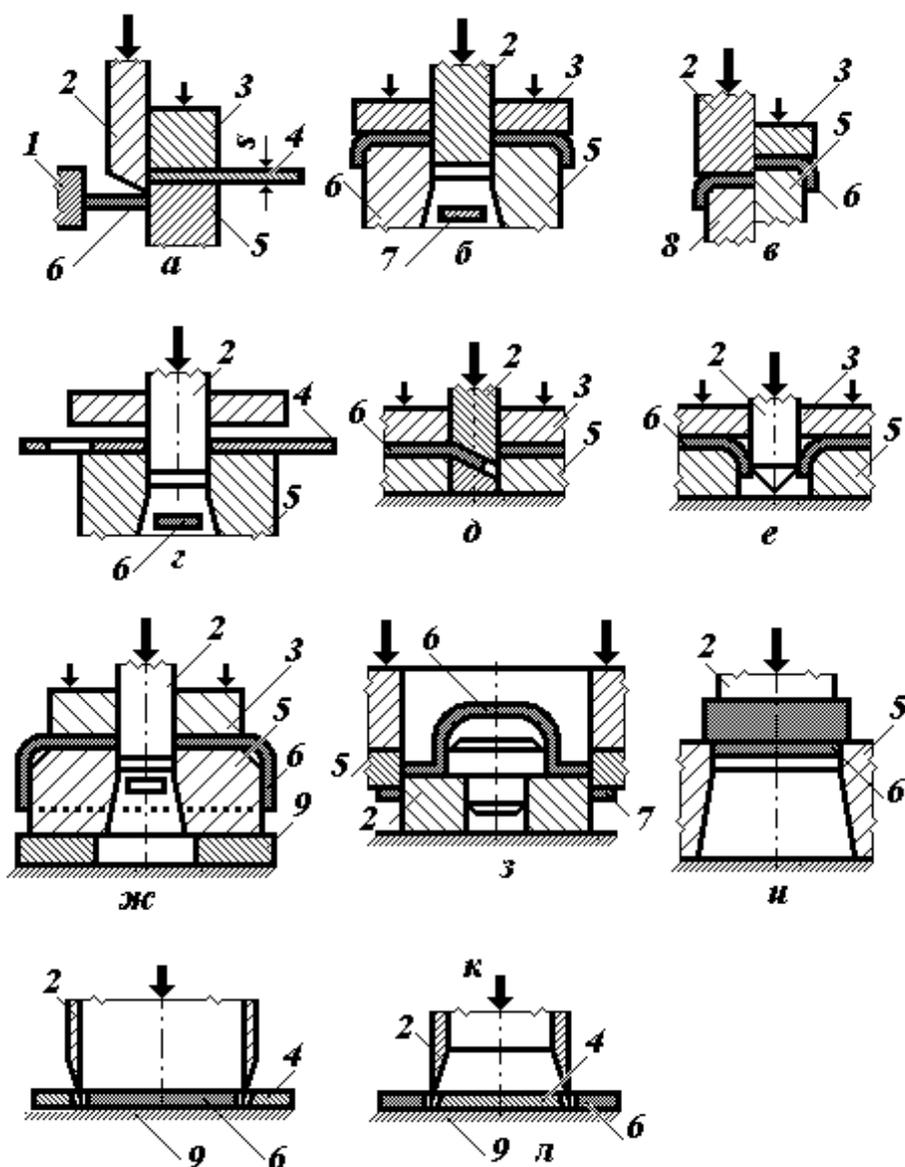


Рис. 13.24. Схемы основных разделительных операций: а - отрезка; б – разрезка с отходом; в – разрезка без отхода; г – вырубка; д – надрезка; е – проколка; ж – пробивка; з – обрезка; и – зачистка; к – высечка; л – просечка; 1 – упор; 2 – пуансон; 3 – прижим; 4 – исходный материал; 5 – матрица; 6 – заготовка (деталь); 7 – отход; 8 – выталкиватель; 9 – подкладная плита.

С их помощью осуществляется отрезка рулонного и листового проката на ленты и полосы, вырубка плоских деталей различной формы, получение заготовок для последующей штамповки пространственных пустотелых деталей и т.п.

Отрезка – полное отделение одной части заготовки от другой по незамкнутому контуру путем сдвига. Отрезка применяется как

заготовительная операция для получения заготовок в виде полос для последующей штамповки. Для отрезки применяют ножницы с параллельными ножами, с наклонными ножами (гильотинные) и дисковые (роликовые) ножницы.

Ножницы с параллельными ножами (13.25, а) применяют для отрезки узких ровных полос или заготовок от металлических листов, а также от листов из неметаллических материалов типа гетинакс, текстолит, картон и др.

Разрезаемый лист укладывают на стол с неподвижным нижним ножом, усилием  $P_{прж}$  прижимают с помощью специального механизма к столу ножниц. При движении верхнего ножа лист одновременно перерезается по всему сечению.

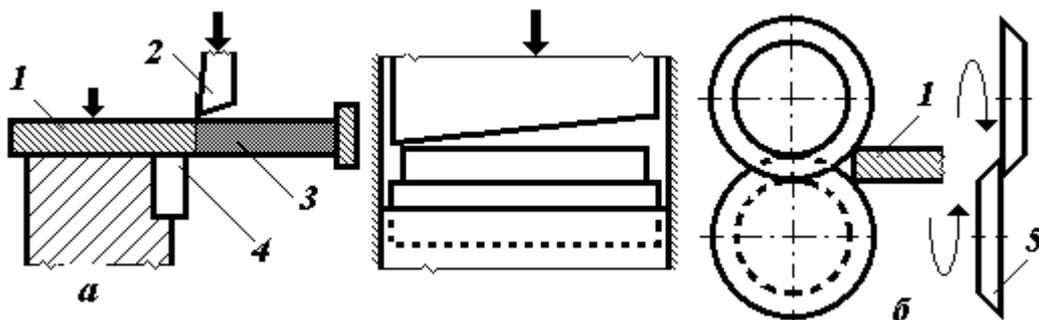


Рис. 13.25. Схемы резки на ножницах: а – гильотинных; б – дисковых; 1 – исходный материал; 2 – подвижный нож; 3 – заготовка (деталь); 4 – неподвижный нож; 5 – нож – диск.

Качество отрезки во многом зависит от качества заточки ножей и зазора  $z$  между ними. Оптимальная величина зазора зависит от толщины листового металла и его механических свойств. Зазор между ножами должен составлять  $z = (0,03 \dots 0,06)s$ , где  $s$  – толщина разрезаемого листа. При большей величине зазора отрезка сопровождается образованием значительного заусенца по кромкам листа и возрастанием боковых усилий, распирающих ножи.

На ножницах с наклонными ножами (гильотинных) в отличие от ножниц с параллельными ножами режущая кромка верхнего ножа установлена под углом к нижнему ножу вследствие чего, отрезке подвергается, не все сечение листа, а только определённая его часть. Поэтому усилие отрезки на

гильотинных ножницах меньше, чем усилие на ножницах с параллельными ножами. Недостатком рассматриваемых ножниц является изгиб отрезаемой полосы в направлении движения верхнего ножа. Для тонких листов это не имеет существенного значения, но отрезанные полосы из толстых листов перед дальнейшей штамповкой должны быть подвергнуты дополнительной операции- правке.

Отрезка на дисковых ножницах (13.25, б) осуществляется с помощью двух дисков- ножей диаметром, вращающихся в противоположные стороны с одинаковыми угловыми скоростями. Заготовка действием сил трения вытягивается между ножами и разрезается аналогично отрезке на гильотинных ножницах. Если на гильотинных ножницах длина отрезаемой полосы не может быть больше длины ножей, то при отрезке на дисковых ножницах длина отрезаемой полосы неограниченна. Дисковые ножницы с одной парой дисков применяют для резки листов на полосы и для получения заготовок с криволинейным контуром. На рассматриваемых ножницах можно вырезать круглые заготовки с минимальным диаметром до 200 мм. Многодисковые ножницы состоят из нескольких пар дисковых ножей и применяются для деления листового и рулонного материала на полосы, для продольной резки рулонного проката (ропуск рулона на ленты), а также для обрезки рулонов и лент по ширине. Благодаря одновременной отрезке, многодисковые ножницы обеспечивают высокую точность по ширине отрезки, высокую производительность и качество поверхности среза.

Вырубка и пробивка являются операциями деления листового материала по замкнутому контуру, причём при вырубке часть материала, находящаяся внутри этого контура, является деталью или полуфабрикатом для дальнейшей обработки, а при пробивке – отходом.

Вырубку (пробивку) (рис. 13.26, а) осуществляют в штампе, рабочими частями которого являются подвижный пуансон 1 и неподвижная матрица 2.

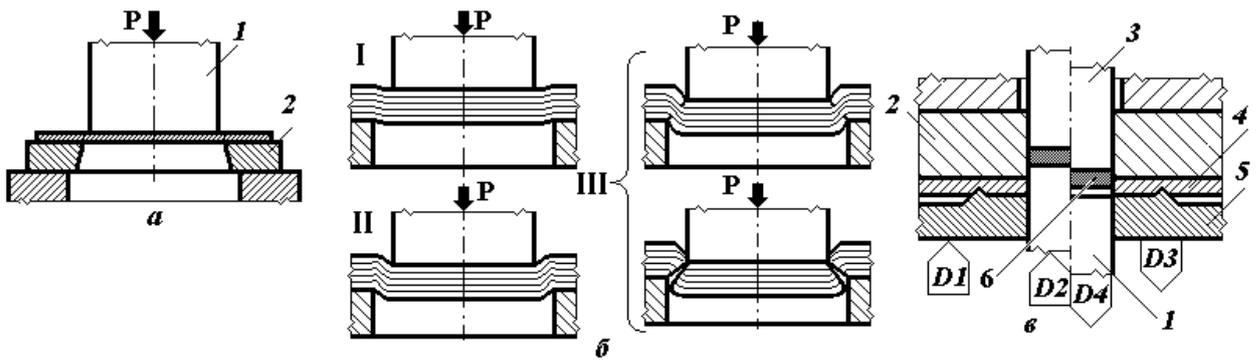


Рис. 13.26. Вырубка: а – схема; б – стадии вырубки; в – чистовая вырубка; 1 – подвижный пуансон; 2 – неподвижная матрица; 3 – контрпуансон; 4 – отход; 5 - прижимное кольцо; P – усилие вырубки; I, II, III – стадии вырубки;  $D_1 \dots D_4$  – движения элементов системы.

Процесс вырубки (пробивки) можно условно разделить на три стадии (рис. 13.26, б). На первой стадии листовая заготовка слегка прогибается, происходит вдавливание острых кромок рабочих частей штампа в металл. При дальнейшем увеличении усилия, у этих кромок сосредотачивается пластическая деформация, которая по мере опускания пуансона распространяется на всю толщину листового металла. Во второй стадии процесса вблизи острых кромок инструмента происходит пластическая деформация металла заготовки по всей толщине. Часть металла, находящаяся под пуансоном сдвигается относительно неподвижной заготовки, лежащей на матрице. Вторая стадия заканчивается, когда ресурс пластичности листового металла оказывается исчерпанным. На третьей стадии образуются скальвающие трещины которые, быстро развиваясь, вызывают отделение вырубаемой детали. При дальнейшем движении пуансон проталкивает деталь через рабочую зону матрицы, преодолевая сопротивление трения между деталью и инструментом.

Для повышения точности деталей и качества поверхности среза применяется чистовая вырубка и пробивка. Наиболее широкое применение нашла чистовая вырубка и пробивка с предварительным сжатием заготовки при малом зазоре между пуансоном и матрицей. Особенность этих процессов

заключается в том, что заготовка перед вырубкой-пробивкой сжимается вблизи очага деформации кольцевым клиновидным ребром, выполненным за одно целое с прижимным кольцом штампа. При этом напряжённое состояние в очаге деформации близко к условиям всестороннего сжатия, что ведёт к повышению пластичности металла и препятствует возникновению скалывающих трещин. Отделение одной части заготовки от другой происходит в результате сдвига под действием касательных напряжений, что позволяет получить высокую точность размеров изделия и чистую боковую поверхность.

Чистовую вырубку с предварительным локальным сжатием заготовки проводят в штампе (рис. 13.26, в). Прижимное кольцо 5 прижимает заготовку к матрице 2 (движение –  $D1$ ), при этом происходит внедрение клиновидного ребра в заготовку. Затем пуансоном 1 вырубает деталь 6 ( $D2$ ) и заталкивает её в матрицу, преодолевая противодействие контрпуансона 3. При обратном ходе ( $D3$ ) отход снимают прижимным кольцом с пуансона, а вырубленную деталь выталкивают ( $D4$ ) из матрицы контрпуансоном и удаляют из рабочего пространства штампа. Нормальные сжимающие напряжения, создаваемые прижимным кольцом, должны быть не менее предела текучести материала заготовки.

Чистовая вырубка (пробивка) требует специализированного оборудования и высокоточных дорогостоящих штампов, что не всегда экономически целесообразно. В ряде случаев достаточно высокое качество деталей, получаемых вырубкой и пробивкой, может обеспечить применение операции зачистки, заключающейся в срезании припуска на боковых поверхностях деталей. Размеры деталей подвергаемых зачистке, не превышают 150...200 мм при толщине материала 3...4 мм. Зачистка более крупных деталей связана с трудностями, возникающими при изготовлении штампов. Зачистку деталей толщиной свыше 3...4 мм (до 8...10 мм) выполняют за несколько операций. Зачисткой обрабатывают заготовки из цветных металлов и их сплавов (медь, латунь, алюминий и др.), низкоуглеродистой и коррозионно-стойкой сталей и

титановых сплавов. Ширина отделяемого зачисткой слоя материала всегда меньше толщины заготовки, процесс его отделения принципиально иной, чем при обычной вырубке и пробивке. Отделение припуска в виде стружки происходит постепенно, по мере опускания пуансона вплоть до опорной поверхности заготовки, а не путём скалывания, как при обычной вырубке и пробивке. В зависимости от того, какой контур обрабатывают (внешний или внутренний), работает только одна режущая кромка инструмента: режущая кромка матрицы (13.27, а) или режущая кромка пуансона (13.27, б). Кроме повышения точности и качества деталей зачистка позволяет механическим путём удалить упрочнённый слой, расположенный по контуру детали или отверстия, полученного обычной вырубкой или пробивкой.

В листовой штамповке применяются также и другие разделительные операции: Разрезка – разделение заготовки или полуфабриката на части по не замкнутому контуру, может выполняться с отходом или без отхода. Надрезка – неполное отделение части заготовки, сопровождающееся её отгибкой.

Проколка – образование в заготовке отверстия острым пуансоном без удаления металла в отход. Пробивка – образование в заготовке отверстия острым пуансоном с удалением металла в отход. Обрезка – удаление технологического припуска детали.

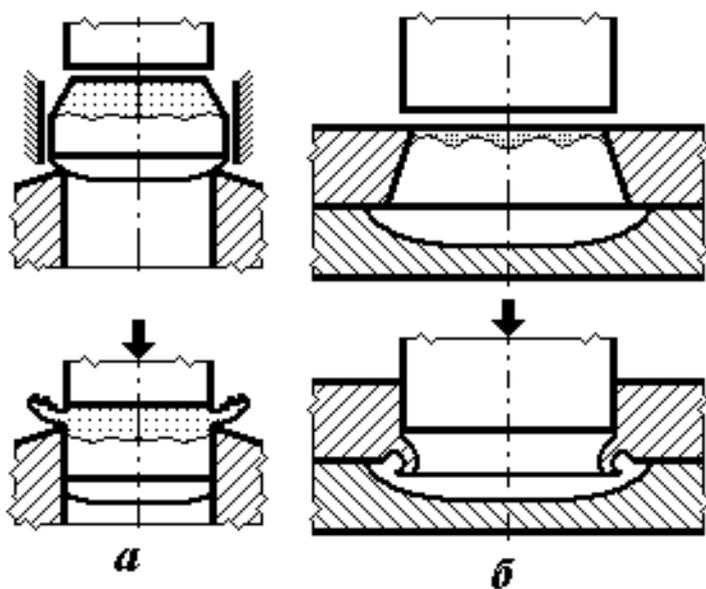


Рис. 13.27. Схема зачистки наружного (а) и внутреннего (б) контура детали.

Высечка – полное отделение заготовки или изделия по замкнутому контуру путём внедрения инструмента в материал исходной заготовки. Просечка –

образование отверстия в заготовке путём внедрения в неё инструмента с удалением части материала в отход. Операции высечки и просечки используются, в основном, для разделения неметаллических материалов. В себестоимости продукции листовой штамповки затраты на материал составляют 50...70%, поэтому наиболее эффективным способом снижения себестоимости является экономия материала за счёт снижения массы отходов. В связи с этим возникает проблема оптимизации раскроя листового проката. Существует три типа раскроя листового проката: с отходами, малоотходный и безотходный. При раскрое с отходами деталь (или заготовку) получают вырубкой по замкнутому контуру. Между деталями и кромкой полосы или листа оставляют перемычки (13.28, а). Раскрой с перемычками по всему контуру применяют при штамповке деталей, имеющих по преимуществу криволинейные очертания и повышенную точность размеров. Различают два вида перемычек: между краями соседних деталей ( $a_1$ ) и между краями детали и кромкой листа или полосы ( $a$ ), последние называют боковыми перемычками, они в 1,15...1,3 раза больше, чем перемычки между деталями. Это объясняется возможными отклонениями размера полосы по ширине (в пределах допуска) и возможной непрямолинейностью её боковых кромок. Перемычки должны быть достаточно жёсткими, их ширина зависит от толщины штампуемого материала и его механических свойств, длины прямолинейных участков штампуемой детали (чем она больше, тем больше упругие деформации перемычки), конструкции штампа и других факторов. В зависимости от перечисленных факторов ширина перемычек изменяется от 1,0 до 3,2 мм при толщине металла менее 4 мм и от 2,5 до 6,5 мм – при толщине металла 4...10мм. Малоотходный раскрой характеризуется отсутствием боковых перемычек, при этом ширина полосы должна быть равна ширине штампуемой детали (13.28, б). Безотходный раскрой применяют при штамповке деталей, контур которых сопрягается друг с другом (13.28, в). При безотходном раскрое перемычки отсутствуют.

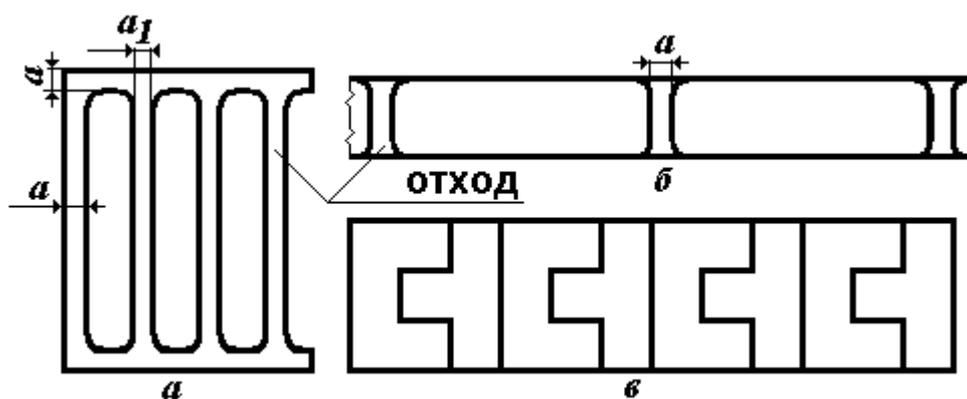


Рис. 13.28. Типы раскроя: а – с отходами; б – малоотходный; в – безотходный; а1 – перемычка между деталью и кромкой листа (полосы); а – перемычка между деталями.

Различают шесть основных видов раскроя деталей (или заготовок), область применения которых определяется формой и размерами штампуемых деталей (рис. 13.29). При штамповке деталей простой геометрической формы (прямоугольной, овальной и т.п.) применяют прямой раскрой; при штамповке деталей Г – образной или другой сходной формы – наклонный раскрой; детали Т – и Ш – образной формы целесообразно штамповать с применением встречного раскроя; комбинированный раскрой применяют при штамповке деталей различной формы, но одинаковой толщины из одного и того же материала (мелкие детали располагаются в промежутках между деталями больших размеров). При штамповке деталей небольших размеров в крупносерийном и массовом производстве применяют многорядный раскрой. При изготовлении мелких и весьма узких деталей (например, стрелок часов) из мерной полосы или ленты применяют раскрой с вырезкой перемычек. Это единственный вид раскроя, когда преднамеренно повышается отход металла в целях увеличения площади поперечного сечения пуансона для пробивки окон (повышается стойкость пуансона).

тип раскроя	с отходами	малоотходный и безотходный	тип детали (заготовки)
прямой			с вытянутой осью
наклонный			Г - образные
встречный			Т - и Ш - образные
комбинированный			разной формы, одинаковой толщины
многорядный			круглые, шестигранные и др.
с вырезкой перемычек			узкие (стрелки и др.), удлиненные
отход			

Рис. 13.29. Основные виды раскроя.

### Формоизменяющие операции

Схемы основных формоизменяющих операций показаны на рис. 13.30.

Гибка - одна из наиболее распространённых формоизменяющих операций, позволяющая получать изогнутые пространственные детали из плоской или профильной заготовки (листа, труб и тому подобное). При наиболее универсальной свободной гибке (рис. 13.31, а) заготовка контактирует с инструментом только в трёх точках, не прилегая к поверхности пуансона и матрицы. Требуемый угол изгиба обеспечивается регулированием хода пуансона. При одноугловой гибке с правкой детали в конце хода (рис. 13.31, б) обеспечивается повышенная точность детали по сравнению со свободной гибкой. Двухугловая гибка с прижимом металла показана на рис. 13.31, в.

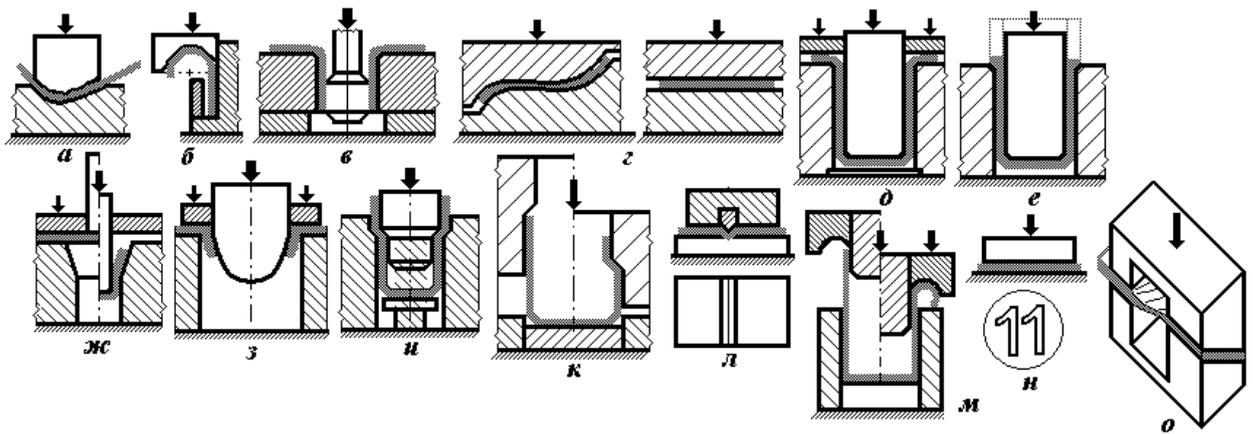


Рис. 13.30. Схемы основных формоизменяющих операций:

а - гибка; б - завивка; в - калибровка; г - правка; д - вытяжка; е - вытяжка с утонением; ж - комбинированная вытяжка; з - отбортовка; и - раздача; к - обжим; л - рельефная формовка; м - закатка; н - чеканка; о - скручивание.

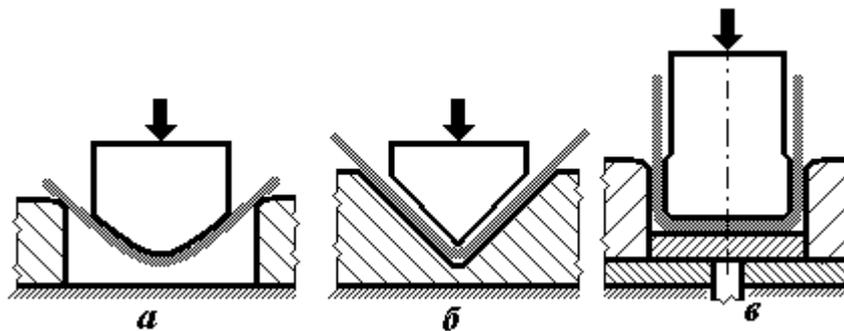


Рис. 13.31. Схемы гибки: а – свободная; б – одноугловая; в – двухугловая

При гибке наряду с пластической деформацией происходит значительная упругая деформация материала, поэтому форма детали после гибки отличается от формы пуансона и матрицы. Величина упругой деформации (пружинения) зависит от механических свойств и толщины штампуемого материала, радиуса гибки, усилия в момент доштамповки (правки) и других факторов. Чем больше: предел прочности материала и радиус гибки, чем меньше толщина материала и усилие доштамповки, тем больше пружинение. Для устранения пружинения применяются различные методы: корректировку формы гибочного инструмента на угол пружинения; уменьшение радиуса гибки; введение в конструкцию детали рёбер жёсткости, пересекающих линию изгиба; правку детали после гибки, т.е. приложение дополнительного

усилия сжатия изогнутой детали между рабочими поверхностями инструмента, применение специальных машин и штампов, при помощи которых заготовка не только изгибается но и растягивается (или сжимается) продольными силами.

Разновидностью гибки является завивка. При выполнении этой операции плоские участки листовой заготовки изгибают, придавая им форму цилиндрической поверхности. Завивка применяется, например, при изготовлении оконных и дверных петель.

Вытяжкой называется операция получения полых деталей из плоской или полый заготовки. Схема процесса вытяжки цилиндрической детали приведена на **рис. 13.32**.

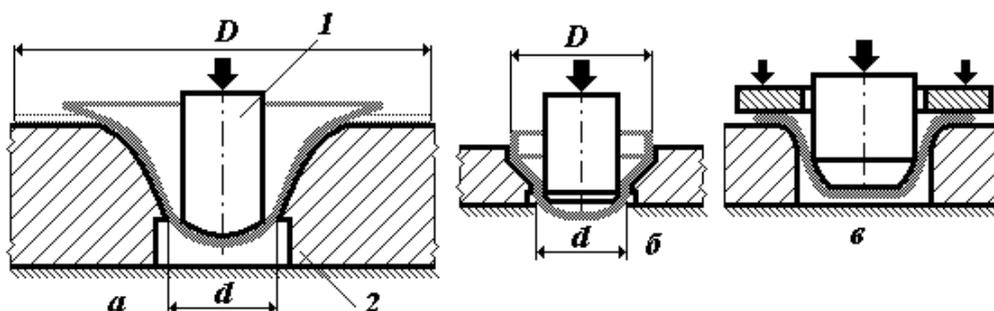


Рис. 13.32. Схемы вытяжки: а – из плоской заготовки без прижима; б - из полый заготовки без прижима; в – из плоской заготовки с прижимом; 1 – пуансон; 2 – матрица; D – диаметр заготовки; d – диаметр стакана.

Под действием пуансона *1* плоская или полый заготовка диаметром *D* проталкивается через отверстие в матрице *2* и принимает форму цилиндрического стакана диаметром *d*. Детали, получаемые вытяжкой, в зависимости от относительной высоты штампуют в одну или несколько операций. При многооперационной вытяжке вначале из плоской заготовки получают полый полуфабрикат (по схеме, приведённой на рис. 13.32, а, в), затем на последующих операциях производят вытяжку увеличивая высоту детали с одновременным уменьшением её поперечных размеров (рис. 13.32, б).

В процессе вытяжки разные участки заготовки находятся в различных напряжённо-деформированных состояниях. При вытяжке фланец находится в плосконапряжённом состоянии, в нём возникают тангенциальные напряжения сжатия и радиальные напряжения растяжения. При отсутствии прижима под воздействием тангенциальных напряжений фланец может потерять устойчивость, что приводит к складкообразованию.

Стенки вытягиваемой детали подвергаются напряжениям растяжения. Под действием этих напряжений они получают неодинаковой толщины по высоте. Наиболее опасным является участок стенки у дна детали. При неправильном выбранном коэффициенте вытяжки под действием растягивающих напряжений возможен отрыв дна от стенки детали.

Кроме цилиндрических деталей вытяжкой можно получать и другие осе симметричные детали (конические, ступенчатые, полусферические), а также коробчатые детали и детали сложной формы (например, детали кузовов и кабин автомобилей, фюзеляжей самолётов и т.п.).

Для повышения качества изделий, облегчения съёма деталей со штампов, увеличения стойкости инструмента применяют различные виды смазки. При выборе состава смазки необходимо исходить из того, чтобы она хорошо сцеплялась с поверхностью металла при вытяжке, не вступала в химические реакции с материалом заготовки и инструмента и не оказывала вредного воздействия на обслуживающий персонал. При вытяжке применяют различные смазки (в основном, с наполнителями), в состав которых входят веретенное масло, рыбий жир, мыльная вода, графит, мел, тальк и т.д. Смазку с изделий удаляют различными способами: горячим обезжириванием в щёлочных ваннах или бензине, электролитическим обезжириванием, ультразвуковой очисткой и другими.

Отбортовкой называют операцию получения борта вокруг предварительно пробитого отверстия. Схема операции и примеры деталей, полученных с применением отбортовки, показаны на **рис. 13.33**.

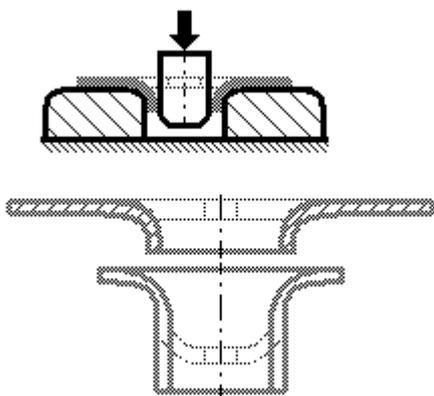


Рис. 13.33. Схема отбортовки.

Рельефная формовка - это получение местных углублений и выпуклостей за счёт местного растяжения и утонения материала. Её применяют для получения на различных деталях декоративных элементов, ребер жесткости, выступов и впадин, используемых для фиксации и т.п.

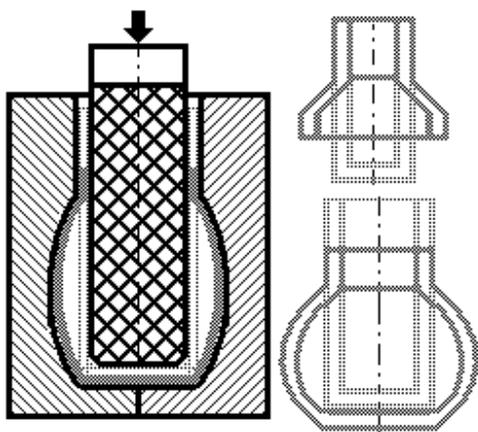


Рис. 13.34. Схема раздачи.

Раздача (рис. 13.34) - местное или общее увеличение диаметральных размеров полой заготовки, в результате чего получают ступенчатые и фасонные детали (раструбы, воронки, переходники и другие) из предварительно вытянутой трубчатой или сварной заготовки. Раздачу выполняют с помощью жёсткого (цельного или разжимного) пуансона, а также с применением эластичной среды (резины, полиуретана, жидкости). В последнем случае раздачу осуществляют в штампах, имеющих матрицы с вертикальным разъемом, который необходимо для извлечения детали после штамповки.

Обжим (рис. 13.35) - операция, с помощью которой уменьшают диаметр полой заготовки, получая на конце детали меньший диаметр и коническую переходную часть. Путём обжима изготавливают детали ступенчатой либо фасонной формы из полой цилиндрической заготовки или трубы. При обжиге усилие прикладывается к торцу заготовки, установленной в матрице.

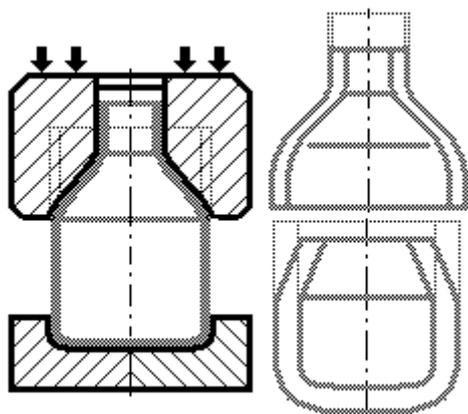


Рис.13.35. Схема обжима.

Правка - отделочная операция, применяемая для устранения неровностей поверхности и повышения точности размеров заготовок и деталей плоской и пространственной формы, изготовленных вырубкой, вытяжкой, гибкой и т.д. Плоские детали из тонкого материала (толщиной менее одного мм) подвергают правке в штампах с плоскими гладкими рабочими поверхностями, детали из более толстых материалов - в штампах, рабочие поверхности которых выполнены с насечкой (вафельные штампы). При правке деталей пространственной формы (для уменьшения радиусов закруглений и выпрямления дна, фланца и боковых стенок) применяют специальные штампы.

Закатку применяют при выполнении кольцевого закругления по краю плоских или полых деталей, полученных вытяжкой для увеличения их жёсткости, получения элементов соединения, придания изделию декоративного вида и т.п. Последовательность процесса закатки при смыкании рабочих частей штампа показана на рис. 13.36. Габаритные размеры и форму исходной листовой заготовки под закатку рассчитывают по средней линии сечения листа, исходя из допущения, что происходит только изгиб.

Чеканкой называется операция получения на поверхности детали выпукло - вогнутого рельефа за счёт некоторого перераспределения металла и заполнения им рельефных полостей штампа. Наиболее широко чеканку применяют для изготовления монет, медалей и т.д. Чеканка требует значительных удельных усилий, которые в зависимости от свойств деформируемого металла могут достигать  $3000 \text{ МН/м}^2$ .

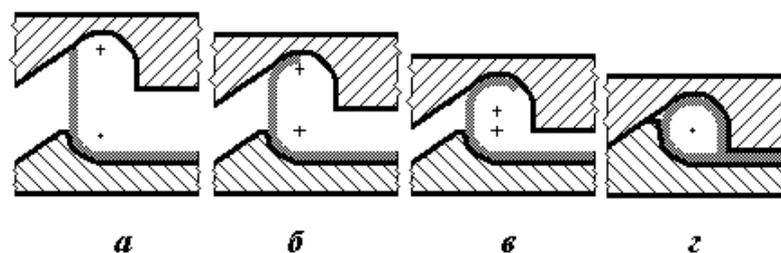


Рис.13.36. Последовательность (а. б .в. г) процесса закатки.

В мелкосерийном производстве часто используются процессы листовой штамповки с использованием эластичных сред (резина, полиуретан) и жидкости. При этом существенно упрощается применяемая штамповая оснастка, так как один из рабочих инструментов штампа (пуансон или матрицу) заменяет универсальный блок из эластичного материала или жидкость. Эластичные среды позволяют выполнять как разделительные, так и формоизменяющие операции листовой штамповки. Их недостатками являются повышенный расход листового металла, низкая производительность, невысокая стойкость применяемых эластичных материалов.

В единичном и мелкосерийном производстве (преимущественно при изготовлении крупногабаритных деталей типа днищ, полусфер ...) получили распространение высокоэнергетические методы штамповки, используемые в тех случаях, когда применение крупных прессов и штампов технически нецелесообразно и экономически невыгодно. В промышленности наибольшее применение получили: штамповка взрывом, электрическим разрядом в жидкости (электрогидроимпульсная штамповка) и силовым воздействием импульсного магнитного поля (магнитно-импульсная штамповка).

Листовая штамповка применяется не только для изготовления деталей, но и для соединения (сборки) их между собой. Такие операции носят название штампо-сборочных. Примером могут служить навесные узлы кузова автомобиля (двери, панель капота, панель крышки багажника), в которых соединение наружных и внутренних панелей производится путём гибки

фланцев на одной из деталей. В качестве штампо-сборочных операций кроме гибки, используются также отбортовка, раздача, обжим и др.

### ***Контрольные вопросы***

1. Что такое прокатка?
2. Какие заготовки получают поперечно-клиновой прокаткой?
3. В чем разница между волочением прессованием?
4. Какие заготовки получают прессованием?
5. Опишите основные операцииковки?
6. Какие технологические требования к заготовке предъявляются ковкой?
7. В чем сущность объемной штамповки.
8. В чем разница между горячей, теплой и полугорячей штамповкой?
9. В чем разница между открытой и закрытой штамповкой?
10. Что такое холодная объемная штамповка?
11. Какие технологические требования к заготовке предъявляются штамповкой?
12. Перечислите основные разделительные операции.
13. Перечислите основные формоизменяющие операции.
14. Как осуществляется вытяжка заготовки?

## ГЛАВА 14. СВАРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Сварка – производительный и универсальный технологический процесс получения неразъемных соединений. Он находит широкое применение во всех отраслях промышленности. Сварка применяется как отдельный процесс при изготовлении сложных пространственных конструкций, так и в сочетании с обработкой металлов давлением, литьем, обработкой металлов резанием.

*Сварка – процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между соединяемыми частями при их нагревании и (или) пластическом деформировании (ГОСТ 2601-84\*).*

### **14.1. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ**

#### ***Основы процесса соединения двух металлов***

Всякое твердое или жидкое тело представляет собой систему атомов, ионов или молекул, связанных между собой внутренними силами притяжения. Для соединения двух твердых тел с получением общего монолита необходимо установить между их поверхностными атомами непосредственную связь, т.е. сблизить их на расстояния, сопоставимые с величиной параметра кристаллической решетки. При этом надо преодолеть энергетический барьер потенциальной энергии системы атомов поверхностных слоев (необходимо затратить дополнительную энергию - энергию активации поверхности). В зону сварки такую энергию можно внести различными способами: в виде теплоты (термическая активация); в виде упруго – пластической деформации (механическая активация); в виде электронного или ионного облучения (радиационная активация).

При сварке разнородных металлов и сплавов возможны три варианта сварного шва. 1 - Соединяемые металлы образуют непрерывные твердые растворы ( $Fe - Ni$ ,  $Fe - Cr$ ,  $Ni - Zn \dots$ ). При этом совместная кристаллизация обеспечивает установление межатомных связей не только внутри кристалла,

но и по границам зерен. 2 - Соединяемые металлы или составляющие соединяемых металлов имеют ограниченную растворимость друг в друге ( $Fe - Cu$ ,  $Cu - Zn \dots$ ). В этом случае возрастает роль связей между отдельными кристаллами (межкристаллитных связей). 3 - Соединяемые металлы практически не растворяются друг в друге ( $Fe - Pb$ ,  $Fe - Mg \dots$ ). При этом связь может устанавливаться только по границам кристаллов.

Различают два вида сварки: сварку давлением и сварку плавлением.

При сварке давлением заготовки соединятся путем совместной пластической деформации поверхностей. В процессе деформаций сминаются микронеровности, разрушаются и удаляются окисные пленки, обеспечивается плотный контакт между заготовками и условия для действия межатомных сил. Для снижения сопротивления деформации, зону сварки обычно нагревают. При сварке плавлением расплавляют кромки заготовок. В результате образуется общая сварочная ванна расплавленного металла. После застывания образуется сварочный шов.

### ***Особенности металлургических процессов, протекающих при сварке плавлением***

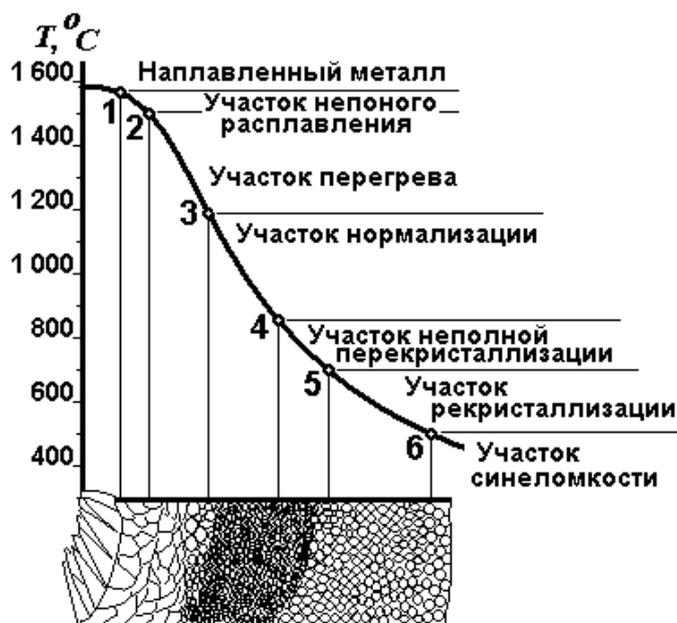
В процессе сварки плавлением, в сварочной ванне, за короткий промежуток времени, происходят сложные процессы взаимодействия различных внешних и внутренних компонентов. Материалы заготовок и дополнительный материал, вносимый в сварочную ванну, состоят из основного металла, легирующих элементов, растворенных газов и посторонних включений. Эти элементы взаимодействуют друг с другом, с газами атмосферы, с жидким металлом сварочной ванны, с материалом покрытий и шлаковой ванны. В результате химический состав и свойства сварного шва могут значительно отличаться от химического состава и свойств металлических компонентов сварочной зоны.

Кристаллизация металла сварного шва начинается с частично оплавленных зерен основного металла заготовок располагаемых на границах зоны

расплавления. К решетке этих зерен присоединяются атомы кристаллизующейся фазы. После завершения кристаллизации, в зоне расплавления образуются зерна, частично состоящие из металлов заготовок и металла шва. Этот процесс обеспечивает сварное соединение. При перемещении сварочной ванны вдоль кромок заготовок в передней части сварочной ванны происходит оплавление металлов, а в задней - кристаллизация, что обеспечивает формирование сварного шва.

Кристаллизация сварного шва отличается от кристаллизации слитков высокой концентрацией источника тепла и высокой скоростью охлаждения. Поэтому, шов неоднороден по размеру и химическому составу зерен. В верхней части шва образуются более крупные кристаллы ветвистой формы (дендритное строение). В нижней части – более мелкие кристаллы удлиненной формы (транскристаллитное строение). Шов имеет слоистую структуру. В каждом шве можно выделить три участка. Нижний участок кристаллизуется из тонкой прослойки расплава примыкающей к оплавленным поверхностям. Этот участок обогащен серой, фосфором и углеродом, переместившимися из примыкающих участков металла заготовок. Средний участок кристаллизуется из жидкого металла основного состава. Высокая скорость кристаллизации обеспечивает идентичность состава металла этого участка составу жидкого металла ванны. Верхний участок обеднен серой, фосфором и углеродом.

В сварном соединении можно выделить три зоны с различной



микроструктурой: зону основного металла; зону термического влияния (рис. 14.1) и зону наплавленного металла сварного шва. В зоне термического влияния (з.т.в.) можно выделить 6 участков.

Рис. 14.1. Строение зоны термического влияния сварного шва: Т – температура.

Участок 1 – неполное расплавление металла. Это переходный участок от зоны наплавленного металла шва к основному металлу. Этот участок нагревается немного выше температуры плавления основного металла находящегося в твердо – жидком состоянии. В области этого участка проходит сплавление зерен шва и основного металла. Поэтому, свойства этого участка определяют свойства сварного шва. Участок 2 – перегрев. В области этого участка металл нагревается до 1500°С. Металл участка имеет крупнозернистое строение с пониженной пластичностью. Для углеродистых сталей возможно появление закалочных структур. Участок 3 – нормализация. Участок относительно недолго нагревается от 930 до 1100°С. Металл участка имеет мелкозернистую структуру с высокими механическими свойствами. Участок 4 – неполная рекристаллизация. Это участок, в котором крупные зерна феррита окружены мелкими зернами феррита и перлита. Участок 5 – рекристаллизация. Участок часто наблюдается после сварки заготовок прошедших предварительную пластическую деформацию (поковки, прокат). Участок характеризуется восстановлением формы и размеров разрушенных при деформации зерен. участок 6 - синеломкость. Участок лежит в интервале температур 200...400°С, что соответствует, синим цветам побежалости и характеризуется снижением пластичности металла.

При высоких температурах в зоне сварки (2000...6000°С) молекулы газовой атмосферы переходят в атомарное состояние, одновременно происходит разложение материала покрытий. Атомарный водород, кислород и азот интенсивно растворяются в металле, что ухудшает механические свойства шва (снижается пластичность, повышается хрупкость). Плавиновый шпат и известняк, входящие в состав многих покрытий разлагаются на составляющие с прохождением следующих реакций:  $CaF_2 \rightarrow Ca + 2F$ ;  $CaCO_3$

→  $CaO+CO_2$ . Свободный фтор ухудшает условия горения сварочной дуги (при дуговой сварке), одновременно, свободный водород связывается в устойчивые, нерастворимые в металле молекулы:  $CaF_2+H = CaF+HF$ . Часть серы, растворенной в стали в виде  $FeS$ , удаляется в шлак вследствие протекания реакции  $FeS+CaO = CaS+FeO$ .

Жидкий металл сварочной ванны может окисляться свободным кислородом газовой атмосферы, кислородом, находящимся на кромках заготовок в виде оксидов (в окалине и в ржавчине), под влиянием химически активных к кислороду оксидов кремния  $SiO_2$  и марганца  $MnO$ , паров воды и углекислого газа. Оксиды  $Fe_3O_4$  и  $Fe_2O_3$  при сварочных температурах переходят в закись  $FeO$  ( $Fe_3O_4+Fe = 4FeO$ ;  $Fe_2O_3+Fe = 3FeO$ ), растворимую в железе. В результате в шве образуются включения, ухудшающие его качество.

Железо, медь, кобальт, никель поглощают водород в твердом состоянии. При плавлении этих металлов, растворимость водорода увеличивается. Поэтому при кристаллизации сварного шва возможна его пористость. Титан, ванадий, тантал, ниобий, редкоземельные металлы при большой концентрации водорода поглощают его с образованием гидридов, при малых концентрациях – с образованием твердых растворов. Кремний, алюминий, хром, углерод уменьшают растворимость водорода в сталях.

Азот растворяется в железе, молибдене, титане, марганце, с образованием нитридов  $MeN$ . Нитриды, увеличивая прочность сварного шва, снижают его пластичность.

Взаимодействуя с железом, сера образует сернистые соединения. При кристаллизации сульфид железа  $FeS$  образует эвтектику  $FeS - Fe$ , имеющую температуру плавления  $940^{\circ}C$ . Эвтектика располагается между зернами кристаллизующегося железа и вызывает т.н. горячие трещины (красноломкость).

Фосфор содержится в металле шва в виде фосфидов железа  $FeP$  и  $FeP_2$ . Фосфиды уменьшают ударную вязкость стали и способствуют появлению т.н. холодных трещин. Для уменьшения вредного влияния фосфора, в

сварочную ванну вводят элементы (кальций или марганец), способные связать фосфор в нерастворимые железные соединения и удалить их в шлак.

### ***Классификация видов сварки***

По используемой энергии все виды сварки можно разделить на: механическую; химическую; электрическую; электромеханическую; химико-механическую и так далее.

Для получения сварного соединения, механическая сварка требует осуществления пластической деформации кромок свариваемых заготовок. Химическая сварка характеризуется нагревом металла заготовок до появления расплава в зоне сварки посредством превращения химической энергии в тепло. Электрическая сварка основана на превращении электрической энергии в тепловую. Это превращение может происходить различными способами: выделением тепла при прохождении электрического тока через шлак; использованием электрической дуги; индуцированием тока высокой частоты. Лучевая сварка основана на превращении энергии луча света или электронного луча в тепловую (использование лазерного луча или энергии пучка электронов). Электромеханическая сварка основана на нагреве металла заготовок методом электросопротивления и последующим пластическим деформированием нагретого металла. При химико-механической сварке металл заготовок нагревается путем превращения химической энергии в тепловую с последующим пластическим деформированием металла.

В последующих разделах рассмотрим основные виды сварки, применяемые в промышленности. Термины, приведенные в соответствии с ГОСТ 2601-84\* будут выделены курсивом.

### ***Свариваемость***

Под свариваемость понимают отношение сплавов к физико-химическим процессам, протекающим в зоне сварки. При сварке многих сплавов (как черных, так и цветных) ухудшаются механические свойства в зоне сварного

шва; образуются сварочные дефекты (трещины, закалочные структуры, пористость и т.д.). Следовательно, эти сплавы обладают пониженной свариваемостью. Физическая свариваемость определяется свойствами соединяемых металлов, что в свою очередь, определяет протекание соответствующих физико-химических процессов в зоне сварного шва. Отношение сплава к конкретному способу сварки называют технологической свариваемостью. Все однородные металлы обладают физической свариваемостью. Различие в свойствах разнородных металлов приводит к тому, что не всегда возможно протекание необходимых для сварки физико-химических процессов. Поэтому разнородные металлы не всегда обладают физической свариваемостью.

Основным признаком, характеризующим свариваемость сталей, является, склонность к образованию трещин. Трещины появляются: в результате снижения пластичности и прочности в процессе кристаллизации (горячие трещины); вследствие полиморфных превращений и насыщения газами в послесварочный период (холодные трещины). Горячие трещины образуются во время кристаллизации шва. В это время металл находится в двухфазном (твердожидком) состоянии. В этом состоянии металл имеет малую пластичность и прочность. При развитии внутренних сварочных деформаций растяжения возможно разрушение металла по границам жидкой и твердой фаз. Обычно горячие трещины образуются вдоль оси сварного шва, в зоне стыка столбчатых кристаллов. Склонность к горячим трещинам обладают: сплавы с широким интервалом кристаллизации; сплавы с повышенным содержанием вредных примесей. Холодные трещины обычно возникают в з.т.в. после завершения кристаллизации. При наличии в сплаве фосфора, возможно образование холодных трещин в период от двух до семи суток после сварки. Появление холодных трещин характерно для углеродистых и легированных сталей (если при сварке появляются закалочные структуры, при усиленном росте зерен, при повышенном насыщении металла газами). Потенциальную склонность стали к образованию холодных трещин можно

оценить по т.н. эквиваленту углерода:

$C_{\text{экв}} = C + Si/24 + Mn/6 + Cr/5 + Ni/10 + V/14 + Mo/4 + 5B$ . При  $C_{\text{экв}} \geq 0,4\%$ , сталь считается склонной к образованию холодных трещин.

По свариваемости, стали разделяют на четыре группы: хорошо свариваемые, удовлетворительно свариваемые, ограниченно свариваемые, плохо свариваемые.

Легирующие элементы по-разному влияют на свариваемость стали. Хром при сварке образует карбиды. Они ухудшают коррозионную стойкость стали, резко повышают твердость в з.т.в., интенсифицируют образование тугоплавких окислов, затрудняющих процесс сварки. Никель увеличивает пластические, и прочностные свойства стали, измельчает зерна, не ухудшает свариваемость. Молибден измельчает зерно, способствует образованию трещин в зоне термического влияния. При сварке, молибден активно окисляется и выгорает. Ванадий способствует появлению закалочных структур, чем затрудняет сварку. При сварке, активно окисляется и выгорает. Вольфрам способствует появлению закалочных структур и активно окисляется, чем препятствует сварке. Титан и ниобий способствуют образованию горячих трещин. Углерод при содержании в стали до 0,25% не ухудшает свариваемости. При более высоком содержании свариваемость резко ухудшается, т.к. в з.т.в. образуются закалочные структуры, приводящие к трещинам. Применение средне- и высокоуглеродистых присадочных материалов приводит к пористости шва. Марганец при содержании в стали от 1,8 до 2,5% способствует появлению закалочных структур. При содержании в стали от 11 до 16%, марганец интенсивно выгорает. Кремний при содержании в стали от 0,02 до 0,3% не вызывает ухудшения свариваемости. При содержании и в стали кремния от 0,8 до 1.5% условия сварки ухудшаются из-за высокой жидкотекучести кремнистой стали и образования тугоплавких окислов кремния.

## Сварочные напряжения

Неравномерный нагрев сварных изделий, металлургические процессы, протекающие в сварном шве, приводят, к появлению внутренних сварочных напряжений и к деформациям в сварных изделиях.

Рассмотрим механизм возникновения сварочных напряжений при сварке двух пластин встык. При неравномерном разогреве (температурное поле  $T=f(y)$ ) заготовок 1 и 5 (рис. 14.2, а) начальная грань 2 стремится занять положение 3.

Шов и прилегающая к нему зона металла претерпевают необратимую местную пластическую деформацию сжатия. Эта деформация пропорциональна заштрихованной области эпюры деформаций 4. Во время охлаждения температурная деформация шва и прилегающей к нему зоны металла ограничены реакцией основного металла. Происходит равномерное укорочение пластин 1 и 5 (рис. 14.2, б) до положения 6. При этом шов и прилегающая к нему зона металла претерпевают внутреннюю упругопластическую деформацию растяжения, пропорциональную заштрихованной области эпюры деформаций 7. растягивающие напряжения (+) в шве и в зоне термического влияния, соответствующие упругой деформации, уравниваются сжимающими напряжениями (-) в основном металле (рис. 14.2, в).

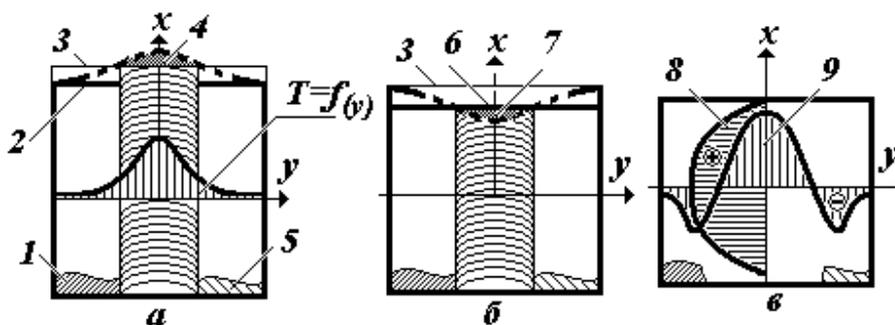


Рис. 14.2. Схема возникновения сварочных напряжений: а – напряжения и деформации пластин при сварке; б – напряжения и деформация пластин после охлаждения; в – остаточные напряжения в пластинах (в изделии); 1, 5 – свариваемые заготовки; 2 – начальная грань; 3 – положение, которое

стремится занять начальная грань; 4, 7 – часть эпюры деформаций; 6 – конечное положение начальной грани; 8, 9 – эпюры напряжений по координатным осям.

Наблюдаемые внешние деформации заготовок после сварки не совпадают с внутренними упругопластическими деформациями, а их величины противоположны. Для предупреждения появления трещин в сварном шве и в з.т.в. необходимо снизить внутренние деформации и напряжения (уменьшить реакцию основного металла на разогретый шов и на з.т.в.). Для этого уменьшают геометрическую жесткость свариваемых заготовок, исключают их закрепление при сварке, предварительно подогревают заготовки или после сварки применяют высокий отпуск. Если по техническим условиям недопустимо коробление сварного изделия (внешние деформации), то необходимо наоборот увеличить геометрическую жесткость свариваемых заготовок (постановка ребер жесткости, мембран ...) или жестко закреплять заготовки при сварке.

## ***14.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВИДЫ СВАРКИ***

Электрические виды включают в себя следующие способы сварки: дуговую сварку (ручную, под флюсом, в защитных газах, подводную); плазменную; высокочастотную; диффузионную и электрошлаковую.

### ***Дуговая сварка***

*Дуговая сварка – сварка плавлением, при которой нагрев осуществляется электрической дугой. Сварочная дуга – одна из форм электрического разряда в ионизированной смеси газов, паров металла, компонентов электродных покрытий, флюсов.*

В обычных условиях газы нейтральны. Ионизация газов происходит под влиянием внешнего воздействия: сильного нагрева, высокочастотного электромагнитного излучения, при бомбардировке атомов (молекул) быстрыми электронами. Для ионизации атома (молекулы) необходимо

совершить работу ионизации, превышающую работу взаимодействия электрона с остальной частью атома (молекулы). Возбудить дугу можно коротким кратковременным замыканием электрической цепи «источник питания – электрод - заготовка». Электродом кратковременно касаются заготовки. При этом между вершинами микронеровностей электрода и заготовки протекает ток короткого замыкания. Этот ток разогревает их до расплавления, с образованием легко ионизирующихся паров металла и компонентов покрытия электрода. После отвода электрода от заготовки с поверхности электрода (катода) происходит отрыв электронов обладающих кинетической энергией, достаточной для перехода границы «твердое тело - газ» (термоэлектронная эмиссия). Электроны устремляются к заготовке (аноду) со скоростью до 2 км/с. Этой скорости достаточно, чтобы при столкновении с нейтральными атомами произвести их ионизацию. Процесс ионизации приобретает, лавинообразный характер, поток заряженных частиц ориентируется электрическим полем, что обеспечивает возбуждение и стабильное горение дуги.

На длине дуги можно выделить три характерных участка. Катодную область, протяженностью ~ 1 мкм; анодную область, протяженностью 1...10 мкм и среднюю часть дуги, называемую столбом дуги. Напряжение дуги складывается из трех составляющих:  $U_d = (U_k + U_a) + U_c = (U_k + U_a) + E_c L_d = \alpha + \beta L_d$ , где:  $U_k$ ,  $U_a$ ,  $U_c$  – падения напряжения соответственно в катодной, анодной области и в столбе дуги;  $E_c$  – напряженность электрического поля в столбе дуги;  $L_d$  – длина столба дуги.

Электрические свойства дуги описываются внутренней статической вольт - амперной характеристикой (рис. 14.3), показывающей зону устойчивого горения дуги (заштрихованная зона). Характеристика состоит из трех участков: I – крупнокапельное течение металла (для сварки не применяется); II – мелкокапельное течение металла (применяется для всех видов сварки); III – струйное течение металла (применяется для глубокой проплавки или наплавки металла сварочными автоматами). Для II участка суммарное

анодное и катодное падение напряжения являются постоянными. Площадь поперечного сечения столба дуги увеличивается пропорционально току, а электропроводность изменяется мало. Поэтому сопротивление столба дуги обратно пропорционально току, а напряженность электрического поля и падение напряжения в столбе дуги от тока не зависят. Следовательно, напряжение дуги можно представить в виде:  $U_{д} = \alpha + \beta L_{д}$ , где:  $\alpha = U_{к} + U_{а}$ ;  $\beta = E_{с}$ . (для сварки низкоуглеродистых сталей  $\alpha = 2$  в;  $\beta = 10$  в/мм).

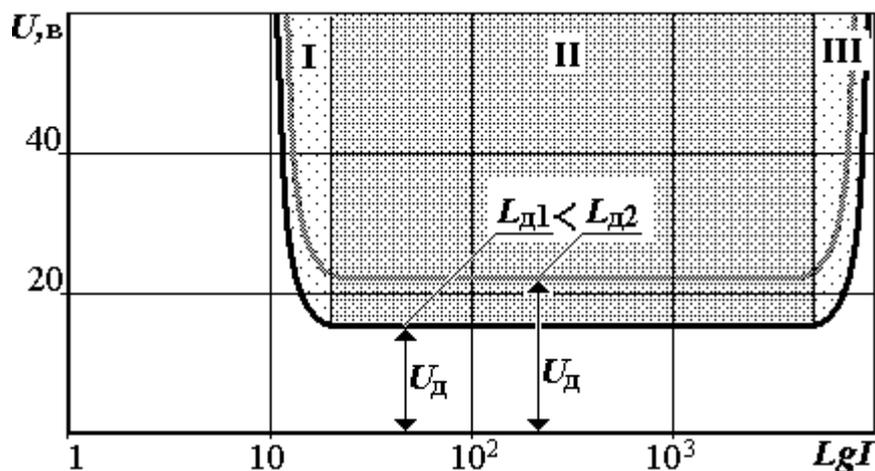


Рис. 14.3. Внутренняя статическая вольт - амперная характеристика дуги:  $U$  – напряжение;  $I$  – ток; I – зона крупнокапельного переноса металла; II – зона мелкокапельного переноса металла; III – зона струйного переноса металла;  $L_{д}$  – длина дуги;  $U_{д}$  – напряжение дуги.

Источники питания (ИП) сварочной дуги (источники тока) должны иметь специальную внешнюю вольт – амперную характеристику. Под внешней характеристикой источника тока понимается зависимость напряжения на его внешних клеммах от тока в электрической цепи. Внешние характеристики источника тока могут быть следующих видов (рис. 14.4): 1 – возрастающая (сварка в среде защитных газов на постоянном токе), 2 – жесткая, 3 - полого падающая (применяется для автоматической сварки под слоем флюса с автоматическим регулированием напряжения дуги), 5 – круто падающая (применяется для ручной дуговой сварки и автоматической сварки под слоем флюса, сварки в защитных газах с неплавящимся электродом).

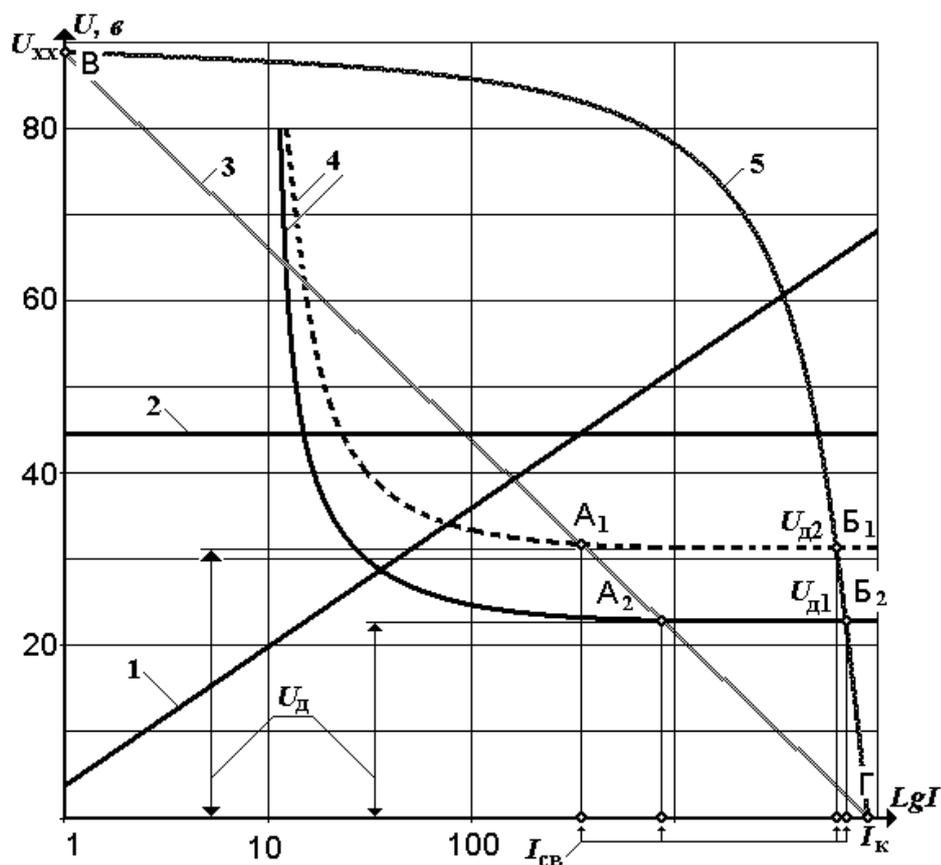


Рис. 14.4. внешние вольт – амперные характеристики источника тока:  
 1 – возрастающая; 2 – жесткая; 3 – полого падающая; 4 – круто падающая; 5 –  
 внутренние характеристики дуги;  $U$  – напряжение;  $I$  – ток;  $A_1, A_2, B_1, B_2$  –  
 точки устойчивого горения дуги;  $B$  – холостой ход;  $\Gamma$  – короткое замыкание;  
 $L_1, L_2$  – длина дуги;  $U_{xx}$  – напряжение холостого хода;  $U_D$  – напряжение дуги;  
 $I_{св}$  – сварочный ток;  $I_k$  – ток короткого замыкания.

ИП необходимо подбирать по соответствию его характеристики принятому способу сварки. Для питания дуги на участке II (рис. 14.3) применяют источники с круто падающей характеристикой. Рассмотрим работу ИП с пологой и круто падающей характеристиками (рис. 14.4). Устойчивое горение дуги при сварке возможно при условии пересечения статической характеристики 4 дуги с внешней характеристикой ИП в рабочей точке (точки «А» или «Б»). Во время горения дуги и переноса электродного металла на заготовки длина дуги изменяется. Вольт – амперная характеристика так же изменяет свое положение дуги (кривые  $U_{д1}$  и  $U_{д2}$ ).

Вследствие этого изменяются значения напряжения дуги ( $U_d$ ) и сварочного тока ( $J_{св}$ ). Устойчивое горение дуги будет только тогда, когда при случайных отклонениях рабочего режима (точки  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ) режим сварки быстро восстановится, и колебания сварочного тока будут относительно малыми. Поэтому, чем более круто падает внешняя характеристика источника тока, тем стабильнее горит дуга и выше качество сварки.

Точка «В» соответствует режиму холостого хода в работе ИП в период, когда дуга не горит и сварочная цепь разомкнута. Для облегчения зажигания дуги, режим холостого хода должен характеризоваться повышенным напряжением (в 2...3 раза выше напряжения дуги). Одновременно, это напряжение должно быть безопасным для сварщика (не более 80 В для источников переменного тока и не более 90 В – для постоянного). Точка «Г» соответствуют короткому замыканию при зажигании дуги и ее замыканию каплями жидкого электродного металла. Для того чтобы не допустить перегрева токопроводящих проводов ИП должен иметь характеристику, ограничивающую ток короткого замыкания ( $I_k$ ). Отношение тока короткого зажигания к сварочному току должно находиться в интервале 1,1...1,5. время восстановления напряжения от короткого замыкания до зажигания дуги должно составлять сотые доли секунды.

Для питания дуги применяют источники переменного тока (сварочные трансформаторы) и источники постоянного тока (сварочные выпрямители и генераторы). Сварочные генераторы применяются при отсутствии внешних источников переменного тока или при необходимости применения постоянного тока. Сварочные трансформаторы более распространены, так как они:

проще в эксплуатации, долговечнее; имеют высокий к.п.д.

Сварочный трансформатор серии СТЭ (рис. 14.5) состоит из двух частей: понижающего трансформатора  $T_r$  и дросселя  $D_r$ , соединенных в последовательную цепь. На П – образном сердечнике 1 трансформатора намотаны первичная 2 и вторичная 3 обмотки. На П – образном разомкнутом

сердечнике 5 дросселя намотана компенсирующая обмотка 4. трансформатор понижает сетевое напряжение до 60...70 В. Дроссель служит для получения крутопадающей характеристики и регулирования сварочного тока в цепи «электрод 7 – дуга 8 - заготовки 9». При прохождении электрического тока через компенсирующую обмотку дросселя в ней возникает ЭДС самоиндукции, направленная противоположно основному потоку. В результате падения напряжения в дросселе трансформатор получает крутопадающую характеристику. Перемещение ярма 6 сердечника дросселя приводит к изменению зазора  $\delta$ . Чем больше зазор, тем больше ЭДС самоиндукции компенсирующей обмотки, тем больше сварочный ток.

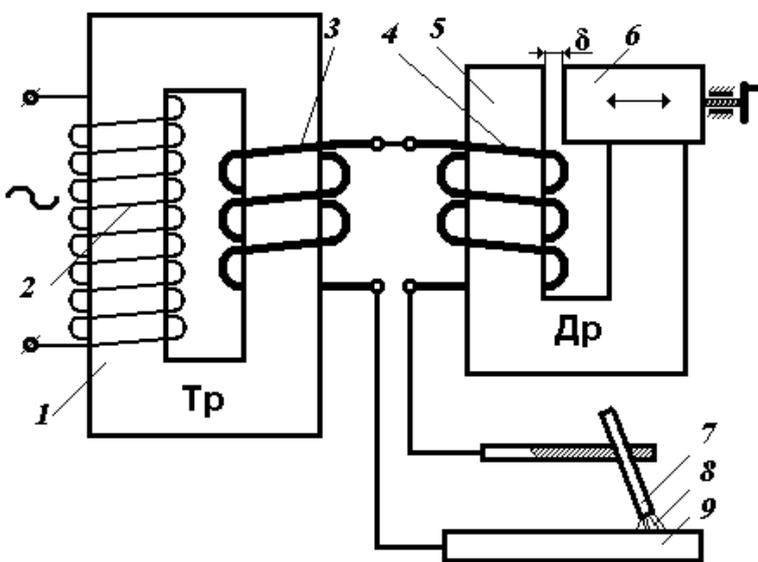


Рис. 14.5. Схема сварочного трансформатора серии СТЭ:

Тр. – трансформатор; Др. – дроссель; 1 – сердечник трансформатора; 2 – первичная обмотка; 3 – вторичная обмотка; 4 – компенсирующая обмотка; 5 – сердечник дросселя; 6 –

ярмо; 7 – электрод; 8 – дуга; 9 – заготовки;  $\delta$  - зазор.

В зависимости от материала и числа электродов, способа включения их в электрическую цепь различают: дуговую сварку неплавящимся (графитовым, вольфрамовым ...) или плавящимся (покрытым обмазкой или электродной проволокой) электродом; сварку дугой прямого или косвенного действия, сварку трех фазной дугой.

*Дуга прямого действия – дуга, при которой объект сварки включен в цепь сварочного тока (рис. 14.6, а).*

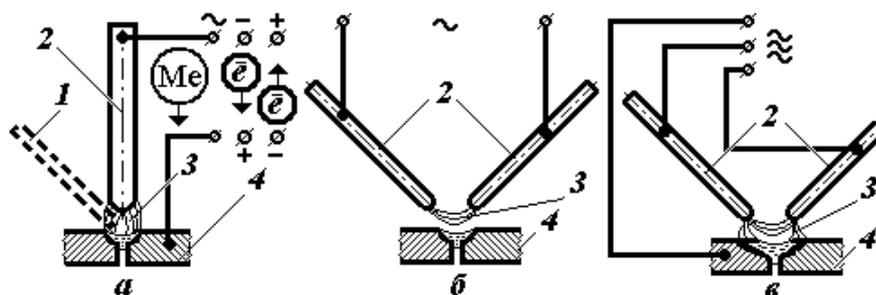


Рис. 14.6. Схемы электродуговой сварки: а – с прямой дугой; б – с косвенной дугой; в – трехфазная: 1 – присадочный пруток; 2 – электрод; 3 – дуга; 4 – заготовки.

Электрическая дуга 3 горит между электродом 2 и свариваемыми заготовками 4. Сварной шов получается за счет плавления электрода или присадочного прутка 1. Возможные подключения: переменным током; постоянным током, прямое включение (заготовка является катодом); постоянным током, обратное включение (заготовка является анодом). *Дуга косвенного действия – дуга, при которой объект сварки не включен в сварочную цепь* (рис. 14.6, б). Электроды 2 включены в цепь переменного тока. Дуга 3 горит между электродами (обычно неплавящимися). Металл кромок заготовок нагревается и расплавляется теплотой столба дуги. При сварке трех фазной дугой (рис. 14.6, в) дуга 3 горит между электродами 2 и между каждым электродом заготовками 4.

Ручная дуговая сварка (РДС) – *дуговая сварка, при которой возбуждение дуги, подача электрода и его перемещение производятся вручную*. РДС выполняется покрытыми электродами, и позволяет выполнять швы в различных пространственных положениях (нижнем, вертикальном, горизонтальном, потолочном). Схема процесса РДС показана на рис. 14.7. Дуга 11 горит между стержнем 2 электрода и металлом заготовок 3. Температура дуги 6000...7000°C. В соответствии с полярностью, показано прямое включение, т.е. направление движения электронов 10 совпадает с направлением стекания капель металла 4. Температура катода (электрода) и анода составляет соответственно 2400°C и 2600°C. Вместе со стержнем плавится и покрытие 1 электрода, образуя, защитную газовую атмосферу 9

вокруг дуги и жидкую шлаковую ванну 8 на поверхности жидкого металла 5. Шлаковая ванна и ванна жидкого металла образуют сварочную ванну. По мере продвижения дуги, сварочная ванна затвердевает, образуя сварной шов 6 и твердую шлаковую корку 7.

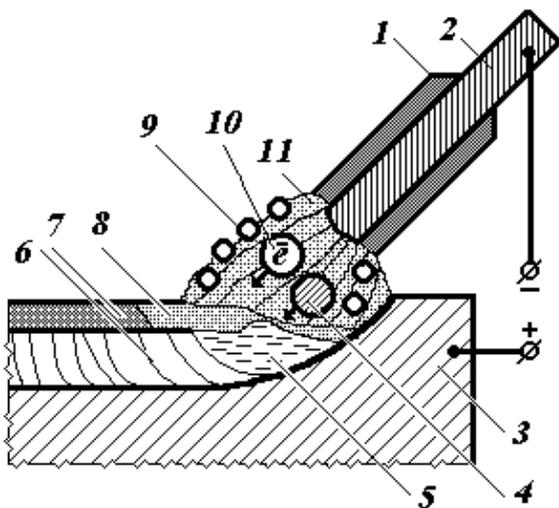


Рис. 14.7. Схема процесса РДГ: 1 - покрытие (термин «обмазка» не допускается); 2 - стержень; 3 - заготовки; 4 - капли расплавленного металла электрода; 5 - ванна жидкого металла; 6 - шов; 7 - шлаковая корка; 8 - шлаковая ванна; 9 - газовая атмосфера; 10 - электроны; 11 - дуга.

Стержни плавящихся электродов изготавливают из стали, чугуна, алюминиевых, титановых сплавов, меди и медных сплавов. Для сварки сталей применяют холоднотянутую, гладкую стальную проволоку диаметром от 1,6 до 6,0 мм с уменьшенным содержанием серы и фосфора. В обозначении марки стали добавляют «Св» - сварочная (содержание серы или фосфора не более 0,04%).

Электродное включает в себя ряд компонентов и обеспечивает:

- Стабильное горение дуги за счет присутствия соединений щелочных и щелочноземельных металлов с низким потенциалом ионизации (калий, натрий, кальций). Электроды для сварки постоянным током этого компонента не имеют, поэтому они не применимы для сварки переменным током. Торцы этих электродов окрашиваются красным цветом.
- Защиту металла сварочной ванны от взаимодействия с кислородом и азотом за счет создания газовой атмосферы, отгесняющей воздух. К газообразующим веществам относятся органические вещества (крахмал,

целлюлоза...). Под действием тепла дуги газообразующие вещества сгорают, создавая собственную газовую атмосферу.

○ Образование шлака на поверхностях сварочной ванны и на поверхностях капель металла. К шлакообразующим компонентам относятся марганцевая руда, рутил ( $TiO_2$ ), флюорит ( $CaF_2$ ), мрамор ( $CaCO_3$ ) и др. Шлакообразующие компоненты расплавляются под действием тепла дуги, обволакивают капли расплавленного электродного металла и вместе с ней попадают в сварочную ванну. Имея удельный вес меньший, чем у расплавленного металла, шлак всплывает на поверхность расплава, обеспечивая защиту сварочной ванны от кислорода воздуха и, одновременно, замедляют охлаждение сварочной ванны. Это способствует удалению газов из расплава, уменьшает образование закалочных структур в сварном шве и в околошовной зоне.

○ Раскисление металла сварочной ванны путем введения химических элементов более активных к кислороду, чем основной металл заготовок. Для сварки сталей, в качестве раскислителей используют ферромарганец, ферросилиций, алюминий и др. раскисление идет по следующим реакциям:  $2FeO + Si = SiO_2 + 2Fe$ ;  $FeO + Mn = MnO + Fe$ . образующиеся при этом нерастворимые в железе окислы ( $SiO_2$ ,  $MnO$ ) всплывают на поверхность шлаковой ванны и уходят в шлак. Легирование металла шва за счет введения в покрытия легирующих компонентов – ферросплавов или чистых металлов, который при сварке переходят в металл шва.

○ Связывание компонентов покрытия между собой и с электродной проволокой (связующие вещества). Например: жидкое натриевое стекло ( $Na_2O(SiO)_2$ ), желатин, пластмассы.

Режимы сварки подбираются в зависимости от: материала и толщины свариваемых заготовок; пространственного положения сварного шва; требований к сварному шву. Основным параметром режима РДС является сварочный ток ( $I_{св}$ ). Величина тока подбирается по эмпирическим формулам: для электродов диаметром до трех мм:  $I_{св} = kd_3$ ; для электродов диаметром 3...

6 мм:  $I_{св}=(20+6d_э) d_э$ , где:  $k$  – плотность сварочного тока, в А/мм (для сварки низкоуглеродистых сталей  $k = 35 \dots 60$ );  $d_э$  – диаметр электрода в мм.

Напряжение дуги изменяется в пределах 16...30 В. Скорость сварки выбирается сварщиком и лежит в пределах 5...7 м/мин. Производительность процесса РДС ограничивается величиной сварочного тока. При больших токах: перегревается стержень электрода и отслаивается обмазка; возможно разбрызгивание металла. Производительность РДС определяют по формуле:  $Q=I_{св}\alpha_n$ , где  $Q$  – производительность, в г/час;  $\alpha_n$  – коэффициент наплавки:  $\alpha_n=G_n/I_{св}t$ , где:  $G_n$  – масса наплавленного металла, в г;  $t$  – время, в с. Для сварки углеродистых и низколегированных сталей,  $\alpha_n$  лежит в пределах 8...14 г/ А час.

Дуговая сварка под флюсом (ДСФ) – *дуговая сварка, при которой дуга горит под слоем сварочного флюса*. ДСФ характеризуется применением непокрытых электродов (сварочной проволоки) 6 (рис. 14.8), а место горения дуги закрыто слоем 1 порошкообразного флюса (толщиной 30...50 мм). Флюс расплавляется теплом дуги и образует, шлаковую корку 8. сварочная проволока 6, намотанная в кассету 7, подается в зону сварки роликовым механизмом подачи 5. При горении дуги 12 между заготовками 14 и электродной проволокой (электродом) образуется ванна расплавленного металла 11 закрытая сверху расплавленным шлаком 2 и слоем нерасплавленного флюса. Пары и газы, получаемые в зоне сварки, образуют воздушную газовую полость 13, и оттесняют жидкий металл, в сторону, противоположную направлению сварки. У основания дуги остается тонкий слой жидкого металла, обеспечивающий глубокий провар основного металла. Дуга зажигается за счет подачи высокочастотного импульса тока. Источник питания 9 обеспечивает постоянное напряжение сварки и высокочастотное импульсное напряжение зажигания дуги. Напряжение на сварочную проволоку передается через контактный мундштук 4. Вся зона сварки закрыта слоем флюса 3 подаваемого из бункера 3.

ДСФ выполняют неподвижными подвесными сварочными головками; передвижными сварочными автоматами (сварочными тракторами) и шланговыми сварочными полуавтоматами. Перемещение шланговых сварочных полуавтоматов и подвесных сварочных головок производится вручную. Перемещение сварочных автоматов механизировано.

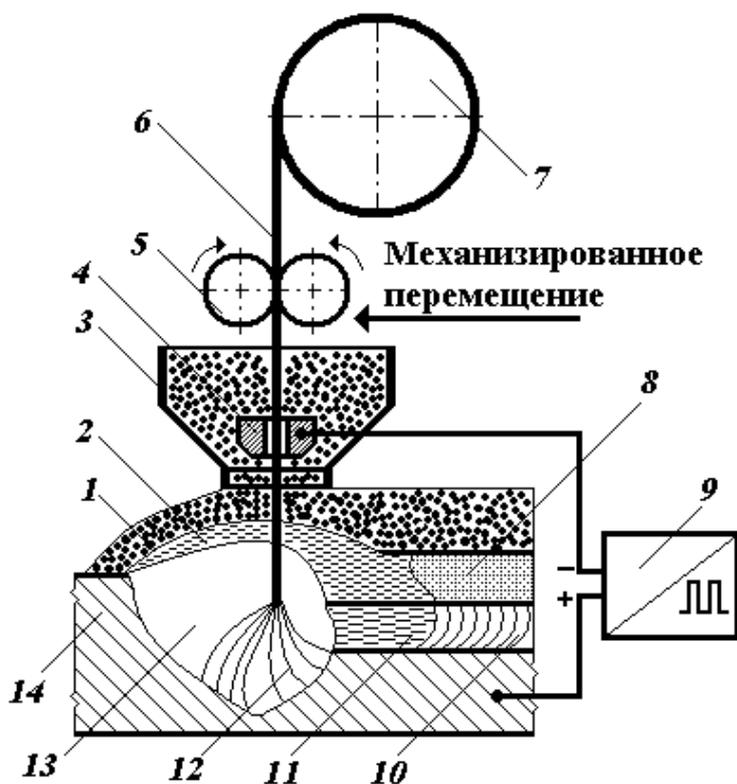


Рис. 14.8. Схема дуговой сварки под флюсом: 1- слой флюса; 2 – расплавленный шлак; 3 – бункер; 4 – токопровод (контактный мундштук); 5 - роликовый механизм подачи; 6 – сварочная проволока (электрод); 7 – катушка; 8 - шлаковая корка; 9 – источник питания; 10 – сварной шов; 11 – ванна расплавленного

металла; 12 – дуга; 13 - воздушная газовая полость; 14 – заготовки.

Основные преимущества ДСФ по сравнению РДС состоят в: повышении производительности процесса сварки в 5...20 раз; повышении качества (и стабильности качества) шва; уменьшении себестоимости производства одного погонного метра шва. Повышение производительности происходит за счет использования больших сварочных токов (до 2000 А) и непрерывности процесса сварки. Применение не покрытого электрода позволяет приблизить токопровод (контактный мундштук) на расстояние 30...50 мм от дуги, что устраняет опасный разогрев электрода на больших токах. Плотная флюсовая защита сварочной ванны предотвращает разбрызгивание и угар расплавленного металла (не более 2...5%), и позволяет более полно

использовать тепловую мощность дуги (КПД составляет 0,9...0,95%, коэффициент наплавки составляет 18...20 г/А час). Увеличение тока позволяет сваривать металл толщиной до 20 мм за один проход без разделки кромок. Так как температура плавления шлака несколько ниже, чем основного металла, то шов застывает медленно, что обеспечивает выход на поверхность неметаллических и газовых включений и высокое качество сварного шва. Повышение качества сварного шва обеспечивается так же получением более высоких механических свойств наплавленного металла вследствие: надежной защиты зоны сварки и сварного шва слоем флюса; интенсивного раскисления и легирования вследствие большого объема жидкого шлака; сравнительно медленной кристаллизации расплавленного металла в сварочной ванне, что обеспечивает выход на поверхность сварного шва не металлических включений и газов; сравнительно медленного охлаждения сварного шва под флюсом и твердой шлаковой коркой; улучшение формы и поверхности сварного шва и постоянства его размера по всей длине.

К недостаткам ДСФ можно отнести: ограниченную маневренность сварочных автоматов; возможность сварки труднодоступных мест или криволинейных швов только в полуавтоматическом режиме; выполнение сварки главным образом в нижнем положении.

***ДУГОВАЯ СВАРКА В ЗАЩИТНОМ ГАЗЕ*** – дуговая сварка, при которой дуга и расплавляемый металл, а в некоторых случаях и остывающий шов, находятся в защитном газе, подаваемом в зону сварки с помощью специальных устройств. В качестве защитных газов используют инертные газы (аргон, гелий) и активные газы (углекислый газ, азот, водород ...), иногда применяют смесь двух и более газов ( $Ar + O_2$ ;  $Ar + H_2$ ;  $Ar + N_2$ ;  $Ar + CO_2$ ). Чаще всего применяют: аргон, углекислый газ; смесь аргона или углекислого газа с кислородом. Дуговая сварка в защитном газе может выполняться в любом пространственном положении, как плавящимся, так и неплавящимся электродом.

Принципиальная схема горелок для сварки неплавящимся электродом приведена на рис. 14.9, а. Прямая дуга 9 горит между неплавящимся (вольфрамовым) электродом 8 и заготовками 1. Питание дуги осуществляется источником сварочного тока 7 через токопроводящий мундштук 5. Мундштук электрически изолирован от корпуса 4 горелки. Подача защитного газа 9 осуществляется по каналу рукоятки 6, выполненной из диэлектрического материала. Для питания сварочной ванны жидким металлом используется присадочный материал 2 (присадочный пруток). Присадочный пруток подают в дугу и перемещают вручную. Для повышения производительности сварки применяются головки с механической подачей присадочной проволоки в зону сварки (рис. 14.9, б). Использование механической подачи присадочной проволоки позволяет создавать сварочные полуавтоматы (перемещение головки производится вручную) или сварочные автоматы (снабжены механизмом перемещений сварочной головки).

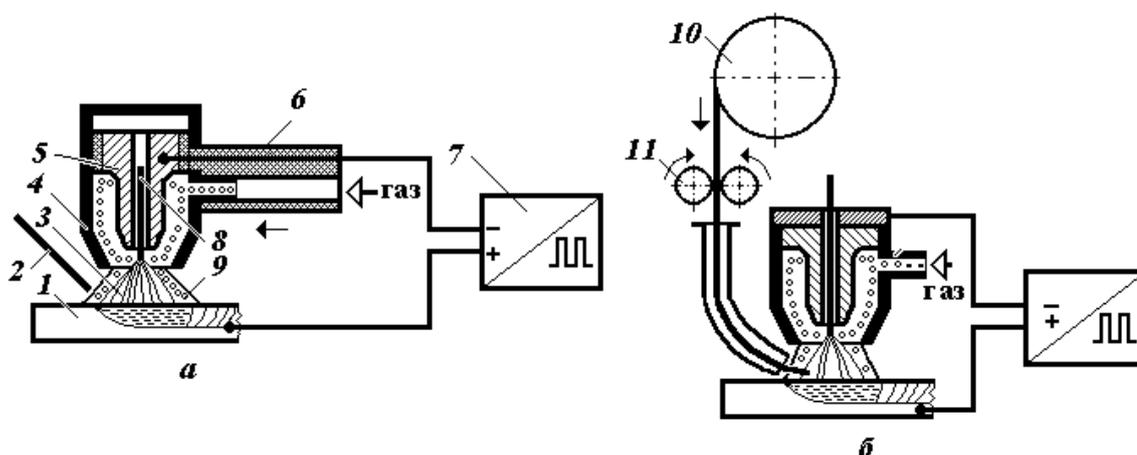


Рис. 14.9 схемы горелок для сварки неплавящимся электродом:

а – ручная горелка; б – полуавтоматическая горелка; 1 – заготовки; 2 – присадочный пруток (проволока); 3 – дуга; 4 – корпус; 5 – мундштук; 6 – рукоятка; 7 – источник сварочного тока; 8 – электрод; 9 – защитный газ; 10 – кассета; 11 – роликовый механизм.

Горелка для сварки плавящимся электродом отличается от горелок для сварки неплавящимся электродом наличием роликового механизма подачи омедненной сварочной проволокой, намотанной на кассету.

Аргонодуговую сварку применяют для соединения: цветных (алюминий, медь, магний), тугоплавких (титан, ниобий, цирконий) металлов и их сплавов; легированных и высоколегированных сплавов. Сварку можно производить плавящимся, или неплавящимся электродом.

Сварку неплавящимся электродом применяют при соединении заготовок толщиной от 0,8 до 6 мм. Для сварки листовых заготовок толщиной 0,2...1,5 мм применяют автоматическую сварку в импульсном режиме. Между электродом и заготовками постоянно горит маломощная (дежурная) дуга, которая обеспечивает ионизацию сварочного промежутка. На дежурную дугу накладывают мощные импульсы дуги заданной частоты и длительности.

Импульсный режим позволяет точно дозировать тепловложения и снизить минимальную толщину свариваемого металла.

Сварку неплавящимся электродом ведут на постоянном токе прямой полярности. Дуга горит устойчиво при напряжении 10...15 В и минимальном токе 10 А, что обеспечивает возможность сваривать заготовки от 0,8 мм. При применении обратной полярности возрастает напряжение дуги и уменьшается устойчивость ее горения. Однако дуга обратной полярности позволяет очищать свариваемые поверхности заготовок от окисных и оксидных пленок (сварка алюминиевых и магниевых сплавов). Это явление получило название «катодное распыление» и может быть объяснено тем, что поверхности заготовок бомбардируются тяжелыми положительными ионами аргона, которые механически разрушают пленки. Совместить устойчивость дуги (прямая полярность) с катодным распылением (обратная полярность) позволяет применение переменного тока. Для питания дуги переменным током используют специальные источники, включающие в себя дополнительный стабилизатор горения дуги. Стабилизатор подает дополнительное напряжение в сварочную цепь в полупериод обратной

полярности. Иногда применяют преобразователи, изменяющие полупериоды переменного тока по фазе и амплитуде.

Сварку плавящимся электродом применяют для соединения заготовок толщиной от 3 мм, с ручной или автоматической подачей горелки. Плотность тока должна быть не менее 100 А/мм. При меньших плотностях тока идет крупнокапельный перенос металла с электрода в сварочную ванну, приводящий к пористости сварного шва и сильному разбрызгиванию расплавленного металла. При больших плотностях тока, с учетом действия электромагнитных сил наблюдается струйный перенос металла, что обеспечивает глубокое проплавление и формирование плотного сварного шва с ровной поверхностью. При этом используют сварочную проволоку небольших диаметров (0,6...3,0 мм) и большую скорость ее подачи. Сварку выполняют на постоянном токе обратной полярности, так как электрические свойства дуги определяются наличием ионизированных атомов металла электрода в столбе дуги. Поэтому дуга обратной полярности горит устойчиво. Для снижения критической плотности сварочного тока применяют смесь аргон плюс 5% кислорода. Кислород уменьшает поверхностное натяжение капель расплавленного металла и позволяет перейти на струйный перенос при меньших токах.

Сварку в среде углекислого газа применяют при изготовлении различных конструкций из углеродистых и низколегированных сталей. Сварку выполняют только плавящимся электродом на повышенных плотностях постоянного тока обратной полярности, горелками с механической подачей сварочной проволоки.

Под действием высокой температуры дуги углекислый газ диссоциирует на окись углерода и свободный кислород:  $2CO_2 = 2CO + O_2$ . Выделяющийся кислород окисляет: железо (образуется растворимая в жидком металле закись железа) и легирующие элементы входящие в состав свариваемой стали. При взаимодействии с углеродом, закись железа образует нерастворимую в металле окись углерода. В результате, металл сварного шва получается

пористым с низкими механическими свойствами. Для предотвращения пористости сварного шва применяют электродную проволоку с повышенным содержанием раскисляющих примесей (марганец и кремний) марок Св08ГС; Св10Г2С и т.п.

### *Электрошлаковая сварка*

Электрошлаковая сварка (ЭШС) - сварка плавлением, при которой для нагрева используется тепло, выделяющееся при прохождении электрического тока через расплавленный шлак. При ЭШС основным источником тепла служит расплавленный шлак, разогретый сварочным током, проходящим от электрода к заготовкам. Дуга при сварке отсутствует.

Схема установки для ЭШС приведена на **рис. 14.10**. В начале процесса сварки возбуждается электрическая дуга между сварочной проволокой 4 и вводной планкой 10. При расплавлении флюса 2 образуется шлаковая ванна 3 в пространстве между кромками заготовок 7 и медными водоохлаждаемыми формирующими устройствами (ползунами) 8. Вода для охлаждения ползунунов подается через штуцеры 11. После накопления достаточного количества жидкого шлака дуга шунтируется шлаком и гаснет, а подача проволоки и подвод тока через мундштук 5 продолжают. Шлаковая ванна является расплавленным электролитом. Поэтому, при прохождении тока через расплавленный шлак в нем выделяется теплота, достаточная для поддержания высокой температуры шлаковой ванны (~2000°С), расплавления кромок заготовок и сварочной проволоки. Непрерывная подача сварочной проволоки обеспечивает подвод тока и пополнение сварочной ванны 1 жидким металлом. По мере заполнения зазора между заготовками, мундштук и ползуны перемещаются вверх, оставляя после себя, сварной шов 9. На начальном участке сварного шва образуется непровар кромок. На конечном участке сварного шва образуются: усадочная раковина и посторонние включения. Поэтому сварку начинают на вводной планке, а заканчивают – на выходных планках 6. По окончании сварки, планки срезают

газовой резкой. Металл кромок заготовок расплавляется одновременно по всему периметру шлаковой ванны, что позволяет вести сварку металла большой толщины за один проход.

По сравнению с ДСФ, ЭШС позволяет: Повысить производительность сварки за счет: непрерывности процесса сварки; выполнения сварного шва за один проход при большой толщине заготовок; увеличения сварочного тока в 1,5...2 раза. Улучшить макроструктуру сварного шва за счет отсутствия многослойности и большей однородности однослойного шва. Снизить затраты на сварку вследствие: повышения производительности; упрощения процесса подготовки кромок заготовок; уменьшения сечения сварного шва; уменьшения расхода сварочной проволоки, флюса и электроэнергии. К недостаткам ЭШС можно отнести: Большие вертикальные габариты установок. Крупнозернистую структуру сварного шва и околошовной зоны, получаемые вследствие замедленного нагрева и охлаждения сварного шва. После сварки необходимо провести отжиг и нормализацию готовой детали для измельчения зерна металла сварного соединения.

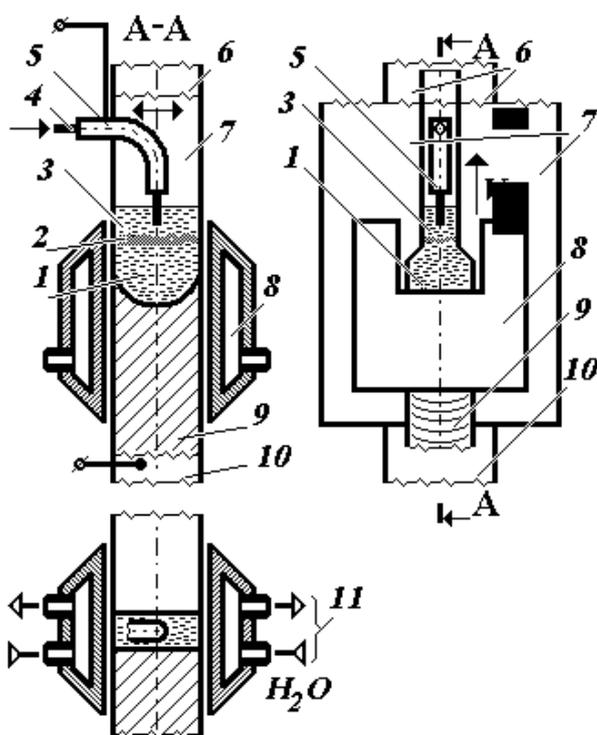


Рис. 14.10. Схема установки для ЭШС: 1 - ванна расплавленного металла; 2 – флюс; 3 - ванна расплавленного флюса; 4 – сварочная проволока; 5 – мундштук; 6 - выходные планки; 7 – заготовки; 8 – ползуны; 9 - сварочный шов; 10 - вводная планка; 11 – штуцеры.

ЭШС широко применяется в машиностроении для изготовления

ковано-сварных или лито-сварных конструкций (станины и детали мощных прессов и станков, коленчатые валы судовых двигателей, роторы и валы гидротурбин...).

### ***Высокочастотная сварка***

Высокочастотная сварка - сварка с применением давления, при которой нагрев осуществляется токами высокой частоты (ТВЧ). Нагрев заготовок ведется или до сварочной температуры или до расплавления кромок заготовок.

При нагреве проводника ТВЧ происходит неравномерное распределение тока по сечению проводника. Под воздействием переменного тока вокруг проводника индуцируется переменное магнитное поле той же частоты. Под воздействием этого поля значительно возрастает индуктивное сопротивление внутренних слоев проводника и происходит вытеснение тока в наружные слои проводника. С увеличением частоты тока неравномерность распределения плотности тока по сечению проводника увеличивается (т.н. поверхностный эффект). В поверхностных слоях проводника концентрируется до 80...95% тепловой энергии. При прохождении ТВЧ по электрической цепи содержащей два близко расположенных проводника на их нагрев будет влиять взаимодействие магнитных полей, протекающих по каждому из проводников. В зависимости от направления тока в зазоре между проводниками можно наблюдать уменьшение или увеличение суммарной напряженности магнитного поля (эффект близости). При противоположных направлениях тока  $I$ , наибольшая его плотность будет в поверхностных слоях проводников близко расположенных к зазору. Если кромки свариваемых заготовок установить с небольшим зазором и включить их в общую электрическую цепь ТВЧ (незамкнутая петля), то сочетание поверхностного эффекта и эффекта близости будут способствовать интенсивному нагреву кромок.

В качестве источника ТВЧ можно использовать машинные или электронные генераторы (внешние источники) или возбуждать их непосредственно в теле свариваемых заготовок 1 индуктором 2 (рис. 14.11).

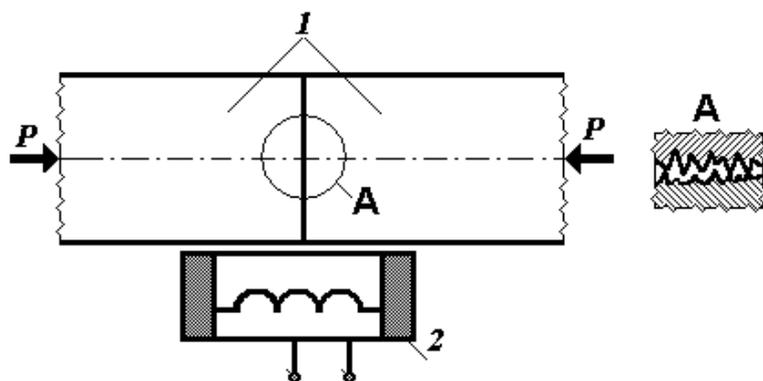


Рис. 14.11 Схема высокочастотной сварки: 1 - заготовки; 2 – индуктор; P – усилие проковки.

В месте контакта кромок заготовок температура может достигать  $1200...1300^{\circ}\text{C}$ . Вследствие большой интенсивности нагрева ( $800...1500$ ) градусов в секунду скорость сварки может достигать десятки и сотни метров сварного шва в секунду. Вследствие малой толщины ( $0,15...0,2$  мм) нагреваемых слоев заготовок, зона структурных превращений основного металла достаточно мала.

Высокочастотной сваркой можно сваривать практически любые стали, медные и алюминиевые сплавы, высоко активные металлы и сплавы, соединения из разнородных металлов толщиной  $0,8...14$  мм. Сварной шов имеет высокую механическую прочность и вязкость и отличается стабильностью качества. Процесс сварки может осуществляться в любой атмосфере (в защитных газах в вакууме); легко автоматизируется с использованием следящих по электрическим и механическим параметрам систем.

### ***Диффузионная сварка***

*Диффузионная сварка - сварка давлением, осуществляемая за счет взаимной диффузии атомов в тонких поверхностных слоях контактирующих частей.*

*Диффузионная сварка осуществляется при относительно длительном воздействии повышенной температуры и незначительной пластической деформации. Диффузионные процессы протекают достаточно активно при*

нагреве металлов до температур рекристаллизации ( $0,4 T_{\text{плавления}}$ ) и давлениях, необходимых для пластического деформирования и смятия микровыступов с целью обеспечения физического контакта по всей свариваемой поверхности. Диффузионную сварку выполняют в вакууме (сварка химически активных металлов) или в атмосфере защитных или инертных газов.

Схема установки для диффузионной сварки показана на [рис. 14.12](#).

Свариваемые заготовки 5 устанавливаются внутри камеры 3, охлаждаемой водой, подаваемой по змеевику 2. насосом 7, в камере создается вакуум ( $10^{-3} \dots 10^{-5}$  Па) (или нагнетаются защитные или инертные газы). Нагрев заготовок производится с помощью нагревателя или индуктора ТВЧ 4. Все входы в камеру (к насосу, к генератору 8, к штоку поршня 6) герметизируются.

Процесс сварки идет в две стадии. На первой стадии заготовки нагреваются, и прикладывается давление. Происходит пластическое деформирование микровыступов и разрушение тонких пленок на контактирующих поверхностях заготовок. На второй стадии заготовки выдерживаются под давлением. Под действием диффузии, образуется объемная зона взаимного соединения. Для получения качественного соединения, свариваемые поверхности заготовок необходимо предварительно очищать от окисных пленок и загрязнений.

Диффузионная сварка позволяет: соединять металлы, сплавы и керамические материалы в различных сочетаниях и соединять заготовки с большой разницей по толщине. Как правило, полученные соединения не нуждаются в последующей механической обработке.

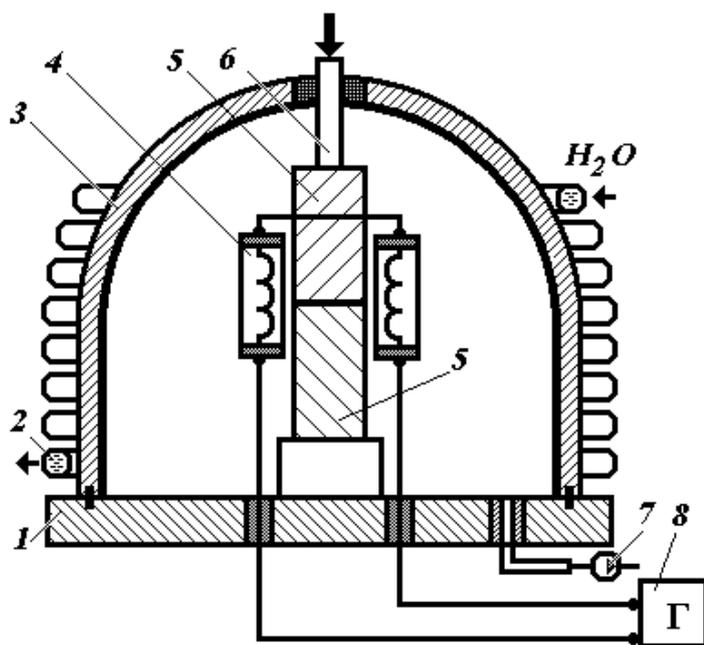


Рис. 14.12. Схема установки для диффузионной сварки: 1 – плита; 2 – змеевик; 3 – камера; 4 – индуктор; 5 – заготовки; 6 – шток поршня; 7 – насос; 8 – генератор.

### *Плазменная сварка*

*Плазменная сварка* - сварка плавлением, при которой нагрев производится сжатой дугой. Источником теплоты при плазменной сварке является плазменная струя – направленный поток ионизированных частиц газа, с температурой до 20000°С.

Плазму получают, пропуская поток газа через столб сжатой электрической дуги (рис. 14.13). Столб дуги 2, горящий между электродом 3 и соплом 5, помещают в узкий канал б с охлаждаемыми стенками, и через него продувают газ. Столб дуги сжимается, что приводит к повышению в нем плотности энергии и температуры. Частые столкновения частиц продуваемого газа приводят к их высокой ионизации. Загорается плазменная дуга 1. В качестве плазмообразующего газа обычно используют аргон. Для получения более мощной дуги используют водород или азот. Различают горелки с плазменной дугой выделенного типа (рис. 14.13, а) и с дугой не выделенного типа (рис. 14.13, б), горящей между электродом и заготовками 7. В горелках первого типа столб дуги располагается в канале б корпуса

горелки изолированной от электрода керамической вставкой 4. Приближая или удаляя дугу от заготовки можно производить: нагрев, пайку, резку тонких (до 10 мм) заготовок, сварку. Горелки второго типа обладают повышенной эффективной мощностью дуги, что позволяет разрезать относительно толстые (до 50 мм) заготовки.

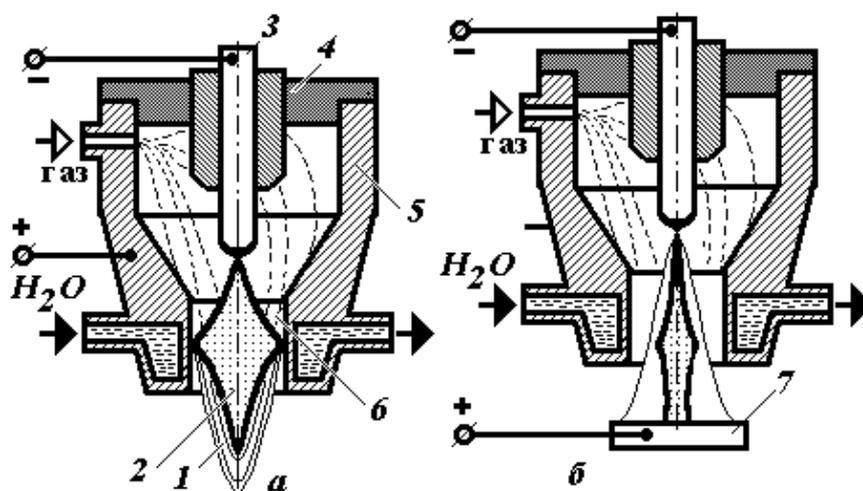


Рис. 14.13. Схемы плазменных горелок: а - горелка с плазменной дугой выделенного типа; б - горелка с плазменной дугой не выделенного типа: 1 - плазменная дуга; 2 – электрическая дуга; 3 – электрод; 4 - керамическая вставка; 5 – сопло; 6 – канал; 7 – заготовки.

Плазменная дуга, являясь концентрированным источником теплоты, обладает большой проплавляющей способностью и позволяет сваривать заготовки без разделки кромок толщиной до 10 мм. Плазменная дуга, обладая высокой стабильностью, позволяет выполнять т.н. микроплазменную сварку заготовок толщиной 0,025...0,8 мм. Если увеличить расход плазмообразующего газа, то можно резко поднять тепловую мощность, скорость истечения и давление плазмы. Такая дуга дает сквозное проплавление, и выдувает расплавленный металл, т.е. возможно осуществлять резку металла.

Плазменную дугу используют для сварки металлов (высоколегированной стали, сплавов титана, никеля, молибдена, вольфрама) и неметаллов; резки всех материалов; наплавки; напыления и т.д.

Плазменная резка производится высокоскоростной плазменной дугой. В отличие от плазменных сварочных головок, плазменный резак снабжен дополнительными каналами для подачи в зону резания защитного газа. Резка производится при величине тока 55...150А и напряжении 110...120 в. В современных установках для плазменной резки, оснащенных числовым программным управлением, можно разрезать практически любые конструкционные материалы. В частности, можно разрезать низколегированные стали толщиной до 20 мм с точностью до 0,25 мм и скоростью реза до 1,12 м/мин.

### ***14.3. ХИМИЧЕСКИЕ ВИДЫ СВАРКИ***

Химические способы включают в себя термитную и газовую сварку.

#### ***Газовая сварка***

*Газовая сварка - сварка плавлением, при которой для нагрева используется тепло пламени смеси горючих газов с кислородом, сжигаемых с помощью горелки.*

Газовая сварка обладает следующими преимуществами: способ сравнительно прост, не требует сложного и дорогого оборудования, а также источника электроэнергии. Изменяя тепловую мощность пламени, его положение относительно места сварки и скорость сварки, можно в широких пределах регулировать скорость нагрева и охлаждения свариваемого металла. При помощи газовой сварки можно сваривать почти все металлы, применяемые в технике. Такие металлы, как чугун, медь, латунь, свинец легче поддаются газовой сварке, чем дуговой.

К недостаткам газовой сварки относятся: высокая стоимость горючего газа (ацетилен) и кислорода; небольшая скорость нагрева металла; большая зона теплового воздействия на металл и взрывоопасность процесса.

Газовую сварку применяют при: изготовлении и ремонте изделий из тонколистовой стали (сварка сосудов и резервуаров небольшой емкости, заварка трещин, вварка заплат и т.д.); сварке трубопроводов малых и средних

диаметров (до 100мм) и фасонных частей к ним; ремонтной сварке литых изделий из чугуна, бронзы и силумина (заварка литейных дефектов); сварке изделий из алюминия и его сплавов, меди, латуни, свинца; наплавке латуни на стальные и чугунные детали; сварке кованого и высокопрочного чугуна с применением присадочных прутков из латуни и бронзы, низкотемпературной сварке чугуна.

В газовой сварке используются горючие газы: ацетилен, водород, метан, пропан и пары керосина. Основным горючим газом является ацетилен.

Ацетилен - бесцветный газ, с резким запахом, ядовит, взрывоопасен.

Ацетилен получают из природного газа термоокислительным пиролизом метана с кислородом (используется для снаряжения ацетиленовых баллонов) или в специальных ацетиленовых генераторах при взаимодействии карбида кальция с водой:  $CaC_2 + 2H_2O = C_2H_2 + Ca(OH)_2 + Q$ .

Наиболее безопасно использовать ацетилен, поставляемый в баллонах.

Ацетилен поставляется в баллонах белого цвета с красной надписью «ацетилен». Ацетиленовые баллоны, для уменьшения взрывоопасности, заполнены пористым наполнителем (гранулированный активированный уголь размером зерна 1...3,5 мм) и ацетоном. При давлении 1,5 МПа в 1 литре ацетона растворяется до 368 л ацетилена. Максимальное давление в ацетиленовых баллонах – 1.9 МПа. Кислород поставляется в баллонах голубого цвета с черной надписью «кислород». При давлении 15 МПа, в баллоне помещается 600 л газообразного кислорода. Так как масла и жиры в атмосфере сжатого кислорода способны самовоспламеняться, то вся кислородная аппаратура не должна контактировать с этими веществами. В противном случае возможен взрыв с воронкой глубиной до 5 метров. Для уменьшения сетевого или баллонного давления газа и обеспечения постоянного рабочего давления в газовых магистралях применяются газовые редукторы.

При работе газовой горелки возможен т.н. обратный удар (проникновение пламени и взрывной волны в шланги и в генератор), что

приведет к взрыву генератора. Для предотвращения попадания пламени в генератор используются предохранительные затворы. Различают предохранительные затворы сухие и жидкостные (водяные затворы). В корпусе водяного затвора закрытого типа (рис. 14.14) размещены: газоподводящая трубка 1, диск – отражатель 2 и обратный клапан 6. через наливной штуцер 4 затвор заполняется водой до уровня контрольного крана 5. При нормальной работе (рис. 14.14, а) ацетилен проходит по газоподводящей трубе, через обратный клапан, слой воды и через ниппель 3 подается к газовой горелке. При обратном ударе (рис. 14.14, б) воздушная волна давит на воду и перекрывает обратный клапан. Проходя через зазор между корпусом диском – отражателем, ударная волна гасится.

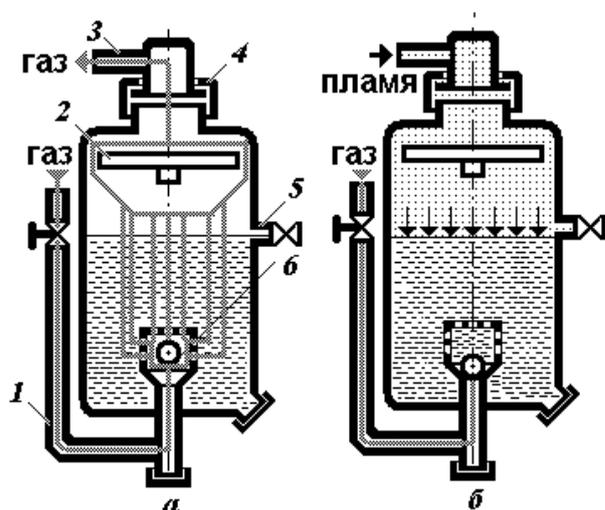


Рис. 14.14. Схема водяного затвора закрытого типа: 1 - газоподводящая трубка; 2 - диск – отражатель; 3 – газовый штуцер; 4 - наливной штуцер; 5 – контрольный кран; 6 - обратный клапан.

*Горелка для газовой сварки – устройство для газовой сварки с регулируемым смешением газов и созданием направленного газового пламени. Для сварки чаще всего используются газосварочные горелки инжекторного типа (рис. 14.15, а), так как они наиболее безопасны. Под давлением 0,1...0,4 МПа, кислород поступает в горелку, через вентиль 4 и подается в кольцевой инжектор 6. Выходя с большой скоростью из узкого канала инжектора, кислород подсасывает горючий газ, поступающий через вентиль 5. В смесительной камере 3 получаем горючую смесь, которая, через мундштук 2, подается к сменному наконечнику 1.*

Все горючие газы, содержащие углеводороды, при сгорании образуют сварочное пламя, имеющее три отчетливо видимые зоны (рис. 14.15, б). Зона 7 – ядро пламени, зона 8 – восстановительная; зона 9 – факел.

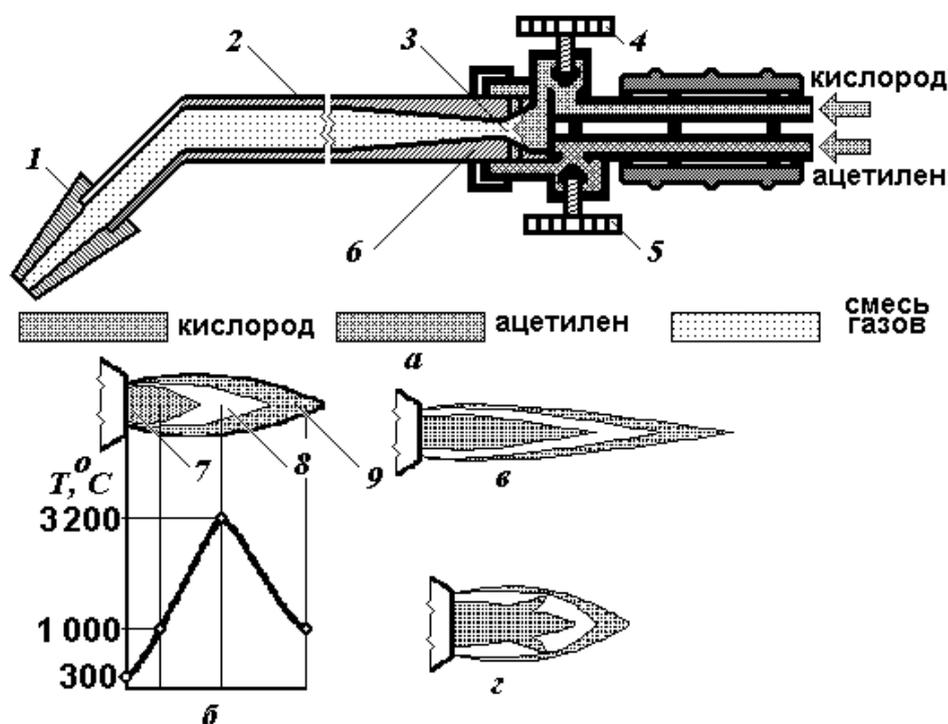


Рис. 14.15. Газосварочная горелка и ацетилен – кислородное пламя:  
 а – горелка инжекторного типа; 1 – сменный наконечник; 2 – мундштук; 3 – смесительная камера; 4 - кислородный вентиль; 5 - вентиль горючего газа; 6 – кольцевой инжектор; б – нормальное пламя; в – окислительное пламя; г – восстановительное пламя; 7– ядро; 8 – восстановительная зона; 9 – факел; Т – температура.

Ядро имеет форму закругленного ярко светящегося конуса. Оно состоит из раскаленных частиц углерода сгорающих в наружной части ядра.

Восстановительная зона в основном состоит из окиси углерода, получаемого за счет сгорания ацетилена:  $C_2H_2 + O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$ . Эта зона имеет более темный цвет. Наибольшая температура сварочного пламени находится в этой зоне, на расстоянии 2...4 мм от ядра. Факел имеет удлиненную конусообразную форму. Он состоит из углекислого газа и паров воды, которые получают при сгорании окиси углерода и водорода, поступающих

из восстановительной зоны и из окружающего атмосферного воздуха:

$4CO + 2H_2 + 3O_2 = 4CO_2 + 2H_2O$ . Внешний вид и температура газового пламени

зависит от соотношения объемов ацетилена и кислорода  $\beta = V_{O_2} / V_{C_2H_2}$ , где  $V_{O_2}$  - объем подаваемого в горелку кислорода;  $V_{C_2H_2}$  - объем подаваемого в горелку ацетилена.

В зависимости от величины  $\beta$  можно получить три вида сварочного пламени: нормальное, окислительное и восстановительное. Для нормального пламени (рис. 14.15, б) ( $\beta = 1 \dots 1,3$ ) характерно отсутствие в восстановительной зоне свободного кислорода и углерода. Окислительное пламя (рис. 14.15, в) получается при избытке кислорода ( $\beta = 1,5 \dots 1,7$ ). Ядро окислительного пламени имеет конусообразную форму бледной окраски. Все пламя приобретает синевато – фиолетовую окраску и горит с характерным шумом. Температура пламени несколько выше, чем у нормального.

Науглероживающее пламя (рис. 14.15, г) получается при избытке ацетилена ( $\beta = 0,95$ ). Ядро пламени может иметь несколько зубчиков, теряет резкость очертаний, а на его конце появляется зеленый венчик. Восстановительная зона почти сливается с ядром.

Газокислородная резка металлов заключается в сжигании нагретого металла в струе чистого кислорода. Различают два вида резки: разделительная и поверхностная. При разделительной резке из металлического листа вырезается заготовка для дальнейшей обработки. Разделительная резка может осуществляться вручную по разметке. В серийном производстве применяется резка с использованием стационарных машин по шаблонам. При поверхностной резке удаляется лишний металл с поверхности изделий.

Для осуществления процесса резки необходимы следующие условия:

Температура плавления металла должна быть больше температуры его горения в атмосфере кислорода. В противном случае, металл будет плавиться и переходит в жидкое состояние до резки. Температура плавления шлаков должна быть меньше температуры горения металла в атмосфере кислорода (выделение шлаков должно происходить в жидкотекучем состоянии).

Количество тепла, выделяемого при резке должно быть достаточным для

поддержания непрерывности процесса. Теплопроводность металла не должна быть слишком высокой и должна способствовать сохранению тепла на поверхности кромки реза. Температура плавления шлаков должна быть меньше температуры горения металла в кислороде. Количество теплоты, выделяемой при резке должно поддерживать непрерывность процесса. Температура плавления металла должна быть больше температуры его горения в кислороде. Наиболее полно этому условию удовлетворяют низкоуглеродистые и низколегированные стали. При содержании в стали углерода 0,4...0,5% резка усложнена, при содержании углерода  $\geq 1,2\%$  резка невозможна. При содержании в стали марганца 4...10% резка усложняется; при содержании марганца  $\geq 14\%$  резка невозможна.

Газовый резак отличается от газовой горелки наличием дополнительного кислородного вентиля. Процесс резки осуществляется в два этапа. Первый - нагрев зоны резки до температуры горения металла в кислороде (характеризуется появлением большого числа искр); второй - собственно резка (отключается ацетилен и кислород из основной магистрали). Дополнительным вентилем подключается кислород.

#### ***14.4. ЛУЧЕВЫЕ ВИДЫ СВАРКИ***

К лучевым видам сварки относятся: электронно-лучевая и лазерная сварка.

##### ***Электроннолучевая сварка***

*Электроннолучевая сварка (ЭЛС) – сварка плавлением, при которой для нагрева используется энергия ускоренных электронов. Электронный луч это сжатый поток электронов, перемещающихся с большой скоростью от катода к аноду в сильном электрическом поле. При соударении электронного потока с твердым телом до 90% кинетической энергии электронов переходит в тепловую. Температура в месте соударения достигает 5000...6000°C. Схема формирования сварного шва показана на **рис. 14.16**. При сварке электронным лучом теплота выделяется непосредственно в самом свариваемом металле, вызывая плавление и частичное испарение металла.*

Расплавленный металл заготовок 4 вытесняется из зоны сварки давлением паров металла (парогазовый канал 2). Расплавленный металл распределяется по сварочной ванне неравномерно: фронт расплава 5 (передняя стенка канала) имеет толщину 0,05...0,5 мм, а сзади электронного луча 3, ближе к верхней части ванны, сосредоточен основной объем расплава 6. При кристаллизации этого основного объема и образуется сварной шов 1.

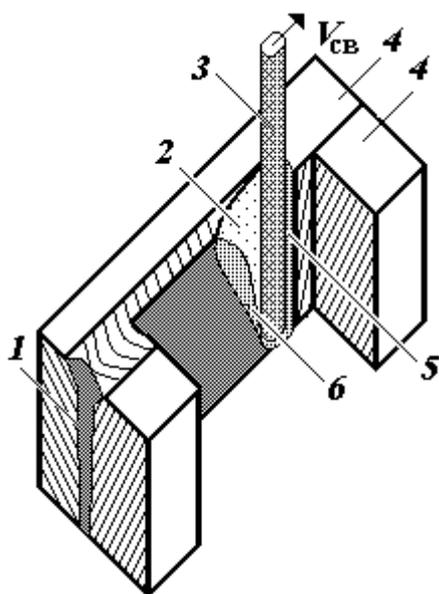


Рис. 14.16. Схема электронно-лучевой сварки: 1 – сварной шов; 2 – парогазовый канал; 3 – электронный луч; 4 – заготовки; 5 – фронт расплавленного металла; 6 – основной объем расплавленного металла.

Особенности ЭЛС заключающиеся в следующем: Из-за наличия зазора между свариваемыми заготовками, частичного испарения и выброса материала заготовок наблюдается занижение уровня сварного шва. Остаточные магнитные поля в деталях из ферромагнитных материалов отклоняют электронный луч от плоскости стыка заготовок. Поэтому после сборки заготовок, непосредственно перед сваркой, необходимо их размагнитить. Перед сваркой необходимо провести специальную разделку поверхностей стыка заготовок, которая обеспечит оптимальные условия формирования сварного шва и повысит точность сварки. Для защиты поверхностей свариваемых заготовок от брызг расплавленного металла необходимо использовать экраны. Обычно ЭЛС производится в вакуумных камерах при давлении  $\sim 10 \dots 3 \text{ Па}$ . Вакуум обеспечивает беспрепятственное перемещение электронов и защиту от окисления катодной нити и зоны сварки.

Высокая концентрация энергии в сфокусированном луче (до  $(5 \dots 7,5)10^4$  Вт/мм<sup>2</sup>) реализует кинжальное плавление материала заготовок (отношением глубины шва к его ширине до 1: 30) с узкой з.т.в.

ЭЛС позволяет сваривать большинство токопроводящих материалов (легированные и высоколегированные стали; титановые, вольфрамовые, танталовые, ниобиевые, циркониевые, молибденовые и никелевые сплавы; некоторые керамики). Минимальная толщина свариваемых заготовок составляет 0,02 мм, максимальная – 100 мм. ЭЛС применяют для соединения малогабаритных (электроника, приборостроение, часовая промышленность) и крупногабаритных деталей (диски диаметром 50 ... 2300 мм; цапфы; валы; рычаги; трубные и корпусные изделия).

### ***Лазерная сварка***

*Лазерная сварка – сварка плавлением, при которой для нагрева используется энергия излучения лазера. Лазерный луч представляет собой вынужденное монохроматическое излучение. Длина волны излучения, в зависимости от природы рабочего тела лазера, лежит в пределах от 0,1 до 10 мкм. Атомы вещества имеют определенный запас энергии и находятся в устойчивом энергетическом состоянии. Если атому дать дополнительную энергию («накачка» или «возбуждение» атома), он выйдет из равновесного состояния. Излучение возникает в результате вынужденных скачкообразных переходов атомов рабочего тела лазера на более низкие орбиты. При этом возбужденный атом стремится вернуться в устойчивое энергетическое состояние и отдает квант энергии в виде фотона. Испускание света можно инициировать воздействием внешнего фотона, обладающего энергией, соответствующей разнице энергий атома в возбужденном и нормальном состоянии. В результате, генерируются два фотона с одинаковой частотой. Одновременно протекает и обратный переход. Поэтому, для получения заметной генерации вынужденного излучения необходимо добиться превалирования переходов с возникновением новых фотонов. Этого можно*

добиться воздействием различных источников энергии: световой (оптический квантовый генератор – лазер), тлеющий или электрический разряд; химическая реакция и так далее).

Схема лазерной сварки приведена на рис. 14.17. При плотностях тока  $\approx 10^4$  Вт/мм<sup>2</sup> в пятне нагрева начинается локальное испарение металла. В расплавленном металле 2 образуется полость 3. Давление паров испаряющегося металла заготовок 1 не дает полости захлопнуться под действием гидростатических сил расплава. При соответствующей скорости перемещения ( $V_{св}$ ) лазерного луча 4 образовавшаяся полость приобретает динамическую устойчивость и движется вместе с лучом. Перед полостью происходит плавление металла, а позади нее – затвердевание. При наличии полости, излучение поглощается не только поверхностью металла заготовок, но и в его глубине. После прохождения луча, полость заполняется жидким металлом и образуется узкий сварной шов 5, глубина которого значительно больше его ширины.

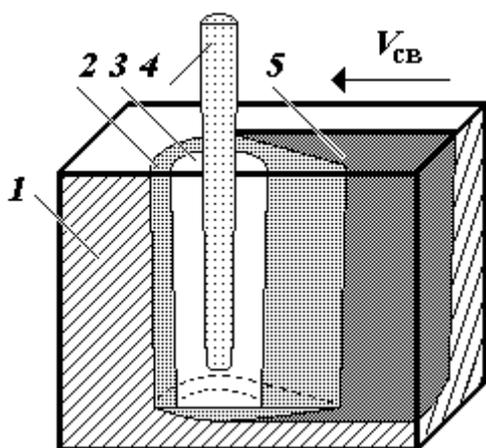


Рис. 14.17. Схема лазерной сварки: 1 – заготовки; 2 – расплавленный металл; 3 – полость; 4 – лазерный луч; 5 - сварной шов;  $V_{св}$  - скорость перемещения лазерного луча.

Сварку малых толщин осуществляют в непрерывном режиме (шовная сварка) или в импульсном режиме (шовная или точечная сварка) с концентрацией энергии в одной точке (острая фокусировка излучения). При плотности мощности в зоне сварки  $10^3 \dots 10^4$  Вт/мм<sup>2</sup> происходит только плавление металла без существенного его испарения. Сварку с глубоким проплавлением можно осуществлять при плотностях мощности излучения более  $10^5$  Вт/мм<sup>2</sup>.

Лазерную сварку ведут с использованием вспомогательного газа (гелия или аргона), подаваемого в зону сварки через сопло под давлением. Если не

использовать вспомогательный газ, то над зоной сварки образуется стационарное облако ионизированных паров испаренного металла, которой закрывает поверхности заготовок от прямого действия луча. Кроме того, продувка вспомогательным газом защищает оптическую систему фокусировки от паров и брызг металла, а металл заготовок от окисления.

Лазерная сварка позволяет: соединять разнородные металлы при толщине заготовок от 0,5 до 10 мм и скорости сварки до 50 м/мин. Обеспечивать небольшое тепловое влияние на околошовную зону и малые деформации готового изделия. Легко автоматизировать процесс сварки. Сваривать конструкции, которые невозможно было соединять обычными способами сварки. Управление лучом с помощью системы специальных зеркал позволяет сваривать труднодоступные места и получать криволинейные сварные швы.

Лазерную сварку малых толщин применяют в электронной и радиотехнической промышленности для сварки проводов, элементов микросхем, при ремонте вакуумных приборов и т.д. лазерную сварку с глубоким проплавлением применяют при производстве корпусных деталей, валов (в том числе карданных), осей, для сварки труб, арматурных конструкций и т.д.

Лазерная резка применяется для резки заготовок со сложным контуром из листовых материалов, при обработке трехмерных конструкций (резка труб, профилей ...), точного раскроя листового материала (стальных листов толщиной до 25 мм), разрезания нетеплопроводных или хрупких материалов (керамик).

Сфокусированным лазерным лучом можно разрезать практически любые материалы. Лазерная резка позволяет получать узкий и точный рез с минимальной з.т.в. Отсутствие механического воздействия на материал позволяет разрезать легкодеформируемые и нежесткие заготовки.

## 14.5. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВИДЫ СВАРКИ

К механическим видам сварки относятся: холодная и ультразвуковая сварка; сварка трением; сварка взрывом.

### Холодная сварка

Холодная сварка – сварка давлением при значительной пластической деформации без нагрева свариваемых частей внешними источниками тепла.

Холодной сваркой можно соединять только весьма пластичные металлы (алюминий и его сплавы, медь, свинец, олово ...).

Холодная сварка подразделяется на: точечную, шовную и стыковую

Точечной сваркой соединяют внахлестку листовые материалы.

Подготовленные к сварке заготовки 1 (рис. 14.18, а) устанавливают между соосно расположенными пуансонами 2. Под воздействием усилия осадки, пуансоны вдавливаются в металл заготовок, обеспечивая необходимую для сварки пластическую деформацию. Полученный сварной шов представляет собой дискретную последовательность сварных точек. Шовной сваркой соединяют листовые материалы непрерывным швом. При односторонней сварке (рис. 14.18, б) заготовки поддерживаются опорным роликом 3. деформирование заготовок производится роликом – пуансоном 4. При двухсторонней сварке ролики - пуансоны размещены по обеим сторонам заготовок. Стыковой сваркой соединяют стержни по поверхности стыкуемых торцов. Свариваемые стержни (рис. 14.18, в) зажимают в захватах 5. Затем, захваты перемещают навстречу друг другу. Сварочный стык получается с утолщением 6.

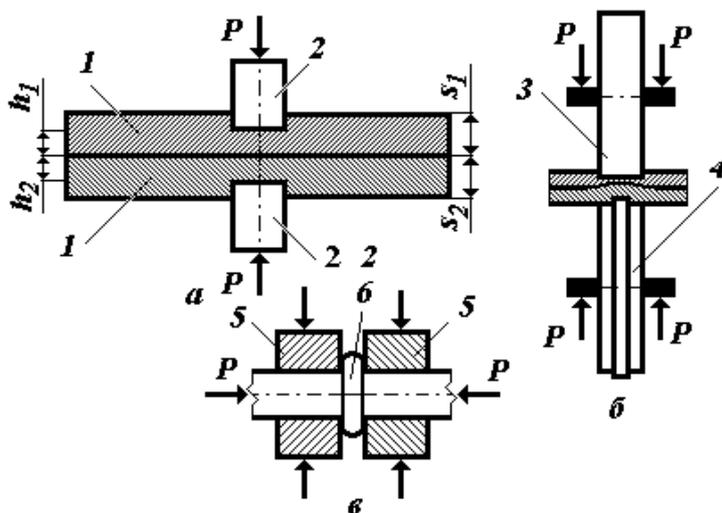


Рис. 14.18. Схемы холодной сварки: а - точечная сварка; б – шовная сварка; в – стыковая сварка; 1 – заготовка; 2 – пуансон; 3 – опорный ролик; 4

– ролик – пуансон; 5 – захват; 6 – утолщение; P – усилие осадки.

Холодная сварка применяется: В автотракторной промышленности для: изготовления радиаторных трубок, карбюраторных поплавков и поплавков датчиков уровня топлива; изготовления медных и алюминиевых уплотнительных колец гидравлического оборудования, обрамляющих колец – окантовок приборных шкал, высоковольтных проводов, контактных групп реле; герметизации корпусов электрических приборов и т.д. В электротехнической и радиоэлектронной промышленности для: соединения медных и алюминиевых проводников, изготовления ребристых охладителей силовых полупроводниковых приборов, армирования медью алюминиевых токопроводящих элементов, герметизации корпусов радиоэлектронных изделий и т.д. В пищевой промышленности для: изготовления и герметизации алюминиевых емкостей.

### ***Ультразвуковая сварка***

*Ультразвуковая сварка - сварка давлением, осуществляемая при воздействии ультразвуковых колебаний.* Сущность процесса ультразвуковой сварки (УЗС) состоит в приложении высокочастотных колебаний (16...20 КГц) к свариваемым заготовкам. В заготовках возникают касательные напряжения, вызывающие пластическую деформацию материала свариваемых поверхностей. В месте соединения развивается повышенная температура (0,4...0,6 от температуры плавления металла.), зависящая от свойств свариваемых материалов. Эта температура способствует возникновению пластического состояния свариваемых материалов и их соединению. В месте сварки образуются совместные кристаллы, обеспечивающие прочность сварного соединения. Одновременно, под действием ультразвука разрушаются окисные пленки на поверхностях заготовок, что облегчает получение соединения.

УЗС характеризуется следующими технологическими свойствами: возможностью соединения металлов без снятия поверхностных пленок и расплавления, особенно хорошей свариваемостью чистого и сверхчистого алюминия, меди, серебра; возможностью соединения тончайшей металлической фольги со стеклом и керамикой. Ультразвуком сваривается большинство известных термопластичных полимеров. Для ряда полимеров УЗС является единственно возможным надежным способом соединения. При УЗС в принципе нет ограничений по нижнему пределу свариваемых толщин различных металлов. Возможно также соединение с существенным перепадом толщин и свойств свариваемых металлов (металл - стекло; отношение толщин 1/1000 и больше). Для УЗС также характерны: малая энергоемкость; возможность питания нескольких сварочных головок от одного генератора и возможность выноса их на значительное расстояние; простота автоматизации процесса работы колебательной системы; гигиеничность процесса.

Технологическое оборудование для ультразвуковой сварки, независимо от физико-механических свойств свариваемых материалов имеет одну структуру и состоит из следующих узлов: источника питания, аппаратуры управления сварочным циклом, механической колебательной системы и привода давления.

Важнейшим узлом, составляющим основу и специфику оборудования и технологии ультразвуковой сварки металлов и пластмасс, является механическая колебательная система. Эта система служит для преобразования электрической энергии в механическую, передачи этой энергии в зону сварки, согласования сопротивления нагрузки с внутренним сопротивлением системы и геометрических размеров зоны ввода энергии с размерами излучателя, концентрирования энергии и получения необходимой величины колебательной скорости излучателя.

Типовая колебательная система (рис. 14.19) состоит из электромеханического преобразователя  $I$ , волноводного звена - трансформатора или иначе

концентратора колебательной скорости 2, акустической развязки системы от корпуса машины 3, излучателя ультразвука - сварочного наконечника 4 и опоры 5, на которой располагаются свариваемые заготовки 6.

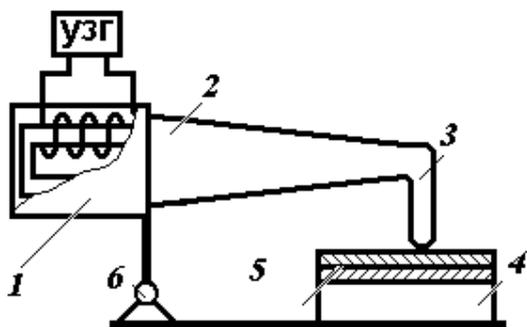


Рис. 14.19. Типовая схема механической колебательной системы УЗС;

1 - электромеханический преобразователь;  
2 - концентратор колебательной скорости;  
3 - акустическая развязка; 4 - сварочный наконечник; 5 – опора; 6 – заготовки.

При вводе механических колебаний в свариваемые металлы заготовки начинают вибрировать с ультразвуковой частотой. Форма колебаний определяется геометрическими размерами изделия. В наиболее простом и распространенном случае (сварка листа прямоугольной формы) в свариваемом изделии устанавливается стоячая волна с характерным чередованием узлов и пучностей плоской волны изгибных колебаний. Уровень напряжений, возникающих в пучностях, определяется мощностью энергии, вводимой в зону сварки. УЗС применяют в приборостроении, радиоэлектронике, авиационной промышленности.

### ***Сварка трением***

*Сварка трением – сварка с применением давления, при которой нагрев осуществляется трением, вызванным относительным перемещением свариваемых частей или инструмента.* Простейшая и наиболее распространенная схема сварки приведена на **рис. 14.20**. Две детали, подлежащие сварке, устанавливают соосно в зажимах машины; одна из них - неподвижна, а другая приводится во вращение вокруг их общей оси. На сопряженных торцовых поверхностях деталей, прижатых одна к другой

осевым усилием « $P$ », возникают силы трения. Работа, затрачиваемая при относительном вращении свариваемых заготовок на преодоление этих сил трения, преобразуется в тепло, которое выделяется на поверхностях трения и нагревает прилегающие к ним тонкие слои металла до температур, необходимых для образования сварного соединения (при сварке, черных металлов температуры в стыке достигают  $1000 \dots 1300^\circ \text{C}$ ). Таким образом, в стыке, действует внутренний источник тепловой энергии, вызывающий быстрый локальный нагрев небольших объемов металла. В процессе трения пластичный металл стыка выдавливается в радиальном направлении под воздействием осевого усилия и тангенциальных сил, возникающих в стыке при вращении одной детали относительно другой. Выдавленный металл «грат» - имеет характерную для сварки трением форму сдвоенного правильного кольца, расположенного по обе стороны плоскости стыка. При выдавливании пластичного металла, хрупкие окисные пленки, покрывавшие торцовые поверхности соединяемых заготовок до начала сварки, разрушаются, а их обломки, а также продукты сгорания адсорбированных жировых пленок и другие инородные включения вместе с металлом удаляются из стыка в грат. Нагрев прекращается путем быстрого (практически мгновенного) прекращения относительного вращения. При этом в контакт оказываются введенными очищенные торцовые поверхности соединяемых деталей, металл которых доведен до состояния повышенной пластичности. Для получения прочного соединения достаточно такой, подготовленный к сварке металл, подвергнуть сильному сжатию - проковать. Это достигается с помощью продолжающего еще некоторое время действовать осевого усилия. Таким образом, прочность образующегося сварного соединения непосредственно связана с величиной пластического деформирования торцов свариваемых деталей и с режимом проковки.

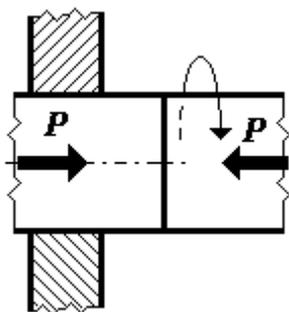


Рис. 14.20. Схема сварки трением:  $P$  – осевое усилие.

Технологическими достоинствами сварки трением являются:

- Высокая производительность. Объем тонкого слоя нагреваемого металла настолько незначителен, что весь цикл его нагрева обычно укладывается в промежуток времени от нескольких секунд до 0,5 мин (в зависимости от свойств материала и размеров сечения свариваемых деталей).
- Высокие энергетические показатели процесса. Локальное генерирование тепла и малые объемы нагреваемого при сварке трением металла обуславливают высокий к.п.д. процесса; расход энергии и мощности в 5...10 раз меньше чем, например, при электрической контактной сварке встык.
- Высокое качество сварного соединения. При правильно выбранном режиме сварки металл стыка и прилегающих к нему зон обладает прочностью и пластичностью, не меньшими, чем основной металл соединяемых деталей; стык свободен от пор, раковин, различного рода инородных включений и других макропороков, а металл стыка и з.т.в. в результате ударного термомеханического воздействия (быстрые нагрев и охлаждение в присутствии больших давлений), по своему характеру близкого к режимам термомеханической обработки металлов, приобретает сильно измельченную структуру.
- Независимость качества сварных соединений от чистоты их поверхности. При сварке трением нет необходимости в зачистке перед началом процесса вводимых в контакт поверхностей; в отличие, например, от контактной сварки боковые поверхности деталей также могут оставаться неочищенными, что в значительной мере экономит время вспомогательных операций.
- Возможность сварки металлов и сплавов в различных сочетаниях. Процесс сварки трением позволяет выполнять прочные соединения не только одноименных, но и разноименных металлов и сплавов, причем даже таких,

которые другими способами сварки либо вовсе не получаются, либо их получение сопряжено с большими трудностями (например, сочетания алюминий - сталь, медь - сталь, титан - алюминий, медь – алюминий).

○ Простота механизации и автоматизации. Сварку трением выполняют на специальных машинах; основные параметры процесса легко программируются, и, как правило, все оборудование представляет собой либо полуавтоматы с минимальным использованием ручного труда, либо автоматы.

К недостаткам сварки трением можно отнести: Искривление волокон текстуры проката в зоне пластического деформирования. Волокна близ стыка располагаются в радиальных направлениях и выходят на наружную (боковую) поверхность сваренной детали. В деталях, работающих в условиях динамических нагрузок, стык с таким расположением волокон может оказаться очагом усталостного разрушения, а в деталях, работающих в агрессивных средах - очагом коррозии. Лучшим средством предотвращения указанных дефектов является сохранение на детали грата.

Сварка трением широко применяется при изготовлении: в автомобилестроении - деталей рулевого управления, карданных валов легковых и грузовых автомобилей, полуосей, картеров задних мостов автомобилей, клапанов двигателей внутреннего сгорания, цилиндров гидравлических систем и др.; в тракторостроении - деталей рулевого управления, планетарных передач, валов отбора мощности, катков, траков, роторов турбо нагнетателей дизельного двигателя и др.; в электропромышленности - деталей высоковольтной аппаратуры, выводов бумаго-масляных конденсаторов, кислотных аккумуляторов и анодов игнитронов, поршней пневматических цилиндров сварочных машин и др.; в инструментальном производстве - при массовом изготовлении концевого режущего инструмента (фрезы, сверла, метчики).

## Сварка взрывом

Сварка взрывом – сварка с применением давления, при которой, соединение осуществляется в результате вызванного взрывом соударения свариваемых частей. При осуществлении сварки взрывом химическая энергия превращения заряда взрывчатого вещества (ВВ) в газообразные продукты взрыва трансформируется в механическую энергию их расширения, сообщая одной из свариваемых заготовок большую скорость перемещения.

Кинетическая энергия соударения движущейся части с поверхностью неподвижной части затрачивается на работу совместной пластической деформации контактирующих слоев металла, приводящей к образованию сварного соединения. Работа пластической деформации переходит в тепло, которое вследствие адиабатического характера процесса из-за больших скоростей может разогревать металл в зоне соединения до высоких температур (вплоть до оплавления локальных объемов).

Принципиальная схема сварки взрывом показана на рис. 14.21.

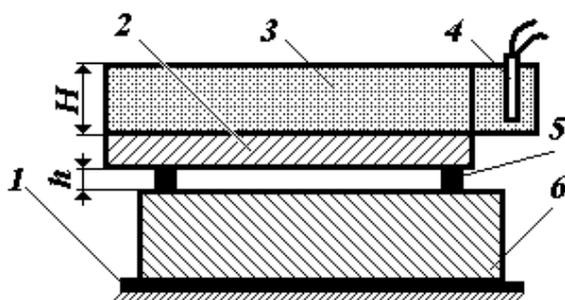


Рис. 14.21. Схема сварки взрывом: 1 – основание; 2, 6 – заготовки; 3 – взрывчатое вещество; 4 – детонатор; 5 – технологические опоры; h – зазор; H – толщина слоя взрывчатого вещества.

На основании *1* (земляной грунт, дерево, металл и т. п.) расположена одна из свариваемых заготовок *6* (в простейшем случае пластина), над ней параллельно, с определенным зазором *h*, на технологических опорах *5*, расположена вторая заготовка *2* (метаемая заготовка). На ее внешней поверхности находится заряд ВВ *3* заданной высоты *H* и площади (как правило, равной площади заготовки *2*). В одном из концов заряда ВВ находится детонатор *4*. При инициировании заряда ВВ по нему распространяется фронт детонационной волны со скоростью лежащей для существующих ВВ в пределах 2000...8000 м/с. Образующиеся позади него

газообразные продукты взрыва в течение короткого времени по инерции сохраняют прежний объем ВВ, находясь в нем под давлением 100...200 тыс. ати, Далее газообразные продукты взрыва расширяются по нормалям к свободным поверхностям заряда, сообщая находящемуся под ними участку металла импульс. Под действием этого импульса объемы метаемой заготовки последовательно вовлекаются в ускоренное движение к поверхности неподвижной заготовке и соударяются с ней. Вызываемое этим движением всестороннее неравномерное сжатие заставляет металл поверхностных слоев обеих соударяющихся заготовок совместно деформироваться, что приводит к тесному сближению свариваемых частей. При этом окисные пленки и. другие поверхностные загрязнения дробятся, рассредоточиваются, а также выносятся наружу под действием кумулятивного эффекта. Требуемая для второй стадии процесса энергия активации обеспечивается за счет работы пластической деформации и вызываемого ею нагрева. Объемная диффузия из-за скоротечности процесса, несмотря на нагрев, развиваться не успевает, что позволяет широко применять сварку взрывом для соединения разнородных металлов и сплавов.

Перспективы и области применения сварки взрывом определяются способностью создавать в твердой фазе прочные соединения за счет поверхностных металлических связей без развития объемной диффузии вследствие скоротечности процесса на больших, практически неограниченных площадях ( $20 \text{ м}^2$ ). Это позволяет применять сварку взрывом для: изготовления композиционных слябов с высокопрочным соединением слоев из разнородных металлов, сплавов и сталей для прокатки в двух и многослойные листы; непосредственного изготовления биметаллических листов металлов и сплавов в любых сочетаниях; изготовления сплошных и полых цилиндрических композиционных заготовок для профильного проката и непосредственного использования в деталях машин; непосредственной облицовки заготовок деталей машин (например, лопастей гидротурбин, лемехов плугов) металлами и сплавами; изготовления из

разнородных металлов и сплавов плоских композиционных карточек с высокопрочным соединением слоев, вырезки из них поперек слоев переходников необходимой конфигурации (полос, колец, фланцев и т. п.) и сварки их обычными способами между деталями из одноименных материалов; в этом случае открываются широкие возможности для создания композиций с промежуточными слоями, играющими при нагревах роль диффузионных барьеров между основными, и для повышения прочности и работоспособности таких переходников с помощью контактного упрочнения промежуточных слоев при уменьшении их относительной толщины в неограниченных пределах; изготовления в виде плоских листов и цилиндрических обечаек волокнистых композиционных материалов с неограниченным числом слоев матрицы и волокон; изготовления некоторых типов сварных соединений между элементами конструкций из однородных и разнородных материалов (например, труб с трубными досками); нанесения порошковых покрытий на металлические поверхности.

#### ***14.6. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ВИДЫ СВАРКИ***

К электромеханическим видам сварки относятся все способы контактной сварки.

##### ***Контактная сварка***

*Контактная сварка – сварка с применением давления, при которой, используется тепло, выделяющееся в контакте свариваемых частей при прохождении электрического тока.* Для осуществления контактной сварки кратковременно нагревают место соединения электрическим током с последующей осадкой разогретых заготовок. В процессе осадки пластически деформируются внешние слои заготовок, и формируется сварное соединение. Количество выделяемой теплоты определяется законом Джоуля – Ленца:  $Q=I^2R_{\Sigma}t$ , где:  $Q$  – количество теплоты, выделяемое при прохождении электрического тока по сварочной цепи, в Дж.;  $I$  – сварочный ток;  $R_{\Sigma}$  – полное омическое сопротивление сварочной цепи;  $t$  – время прохождения тока по

сварочной цепи. Полное сопротивление сварочной цепи складывается из: суммарного сопротивления тел заготовок и электрической подводки ( $R_{\text{заг}} + R_{\text{эл}}$ ) и сопротивления сварочного стыка ( $R_c$ ). Наличие выступов и впадин микронеровностей и различного вида пленок на поверхностях сварочного стыка определяет повышенное электрическое сопротивление  $R_c$ . При этом:  $(R_{\text{заг}} + R_{\text{эл}}) \ll R_c$ . Поэтому, при прохождении по сварочной цепи электрического тока максимальное количество теплоты выделяется в месте сварочного контакта заготовок. В результате высокой плотности тока в зоне контакта металл разогревается до термопластического состояния или до оплавления. При непрерывном сдавливании нагретых заготовок металл в зоне контакта пластически деформируется, разрушаются и удаляются к периферии стыка оксидные пленки, происходит сближение поверхностей до расстояний меньших межатомных – образуется сварное соединение.

Различают контактную сварку: стыковую, точечную, рельефную и шовную.

*Стыковая контактная сварка (СКС) – контактная сварка, при которой соединение свариваемых частей происходит по поверхностям стыкуемых торцов.*

Схема установки для СКС показана на рис. 14.22, а. На станине 2 установлены две плиты: неподвижная 3 и подвижная 6, перемещаемая по направляющим 7. Заготовки 4 устанавливаются в зажимах 5. Сварочный ток подается от трансформатора 1. При перемещении плиты 6, заготовки сжимаются проковочным усилием  $P$ . СКС соединяют круглые и не круглые стержни (рис. 14.22, б) (одинакового или различных диаметров), круглые или некруглые стержни к плоской заготовке, плоские или кольцевые заготовки.

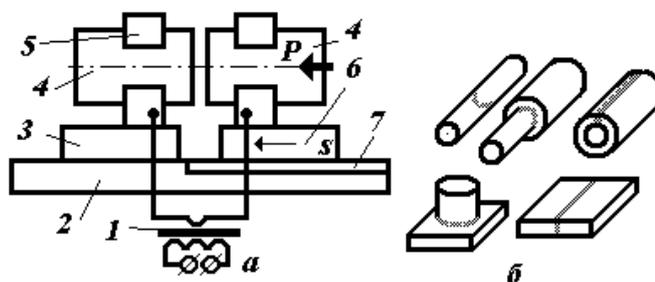


Рис. 14.22. Стыковая контактная сварка: а – схема установки; б – типовые заготовки; 1 - трансформатор; 2 – станина; 3 – неподвижная плита; 4 – заготовки; 5 - зажимы; 6 – подвижная плита; 7 – направляющие; Р – усилие сжатия

В зависимости от степени разогрева торцов заготовок различают: сварку сопротивлением и оплавлением.

*СКС сопротивлением* – сварка, при которой нагрев металла осуществляется без оплавления стыкуемых торцов. Для правильного формирования сварного шва необходимо протекание процесса сварки в определенной последовательности. Совместное графическое изображение изменения в процессе сварки тока и давления называют циклограммой сварки (рис. 14.23, а). Процесс сварки идет в три этапа: предварительный прижим заготовок; разогрев торцов; проковка (прижим заготовок и выдержка). Перед сваркой заготовки необходимо очистить от оксидных пленок, их торцы должны по форме соответствовать друг другу (рис. 14.23, б). Торцы должны иметь простой периметр (круг, квадрат, прямоугольник с малым соотношением сторон) и быть плотно прижаты друг другу предварительной механической обработкой. Соединения, сваренные сваркой

сопротивлением, характеризуются плавным очертанием.

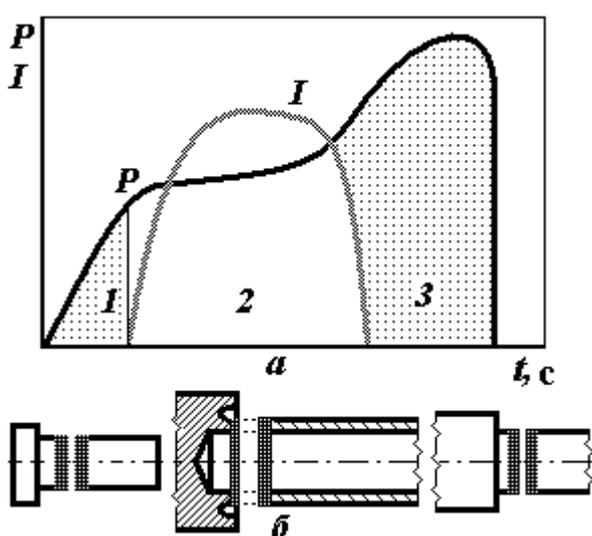


Рис. 14.23. СКС сопротивлением: а – циклограммы; б – подготовка торцов заготовок; I – ток; P – давление; t – время; 1 - предварительный прижим заготовок; 2 - разогрев торцов; 3 - проковка (прижим заготовок и выдержка).

Сваркой сопротивлением соединяют заготовки из низкоуглеродистых, низколегированных конструкционных сталей; алюминиевых сплавов; сечением до 200 мм<sup>2</sup>.

*СКС оплавлением – стыковая контактная сварка, при которой нагрев металла сопровождается оплавлением стыкуемых торцов.* Сварка оплавлением имеет две разновидности: сварка с непрерывным и прерывистым оплавлением.

При непрерывном оплавлении ([рис. 14.24, а](#)) заготовки устанавливают в электродах машины с наибольшим зазором по торцам. После подключения источника тока, заготовки сближают. Вначале соприкосновение заготовок происходит по небольшим площадкам, через которые протекает ток высокой плотности. Между торцами заготовок появляются перемычки из жидкого металла. Одновременно возрастает сварочный ток и развивается температура до 8000°С. Под воздействием высокой температуры перемычки испаряются. Давление паров металла в момент испарения перемычек достигает сотен атмосфер. Под действием магнитного поля, часть металла в виде искр (капель) и паров выбрасывается из стыка. Вместе с металлом из стыка выбрасываются и загрязнения (оксидные пленки), которые находились на торцах. По мере сближения заготовок число контактов (оплавляемых выступов) увеличивается. После равномерного оплавления всей поверхности свариваемого стыка, отключают сварочный ток и осаживают заготовки. При этом жидкий металл и часть пластически деформированного металла из стыка, выдавливаются наружу, образуя грат. Циклограмма сварки показана на [рис. 14.24, б](#).

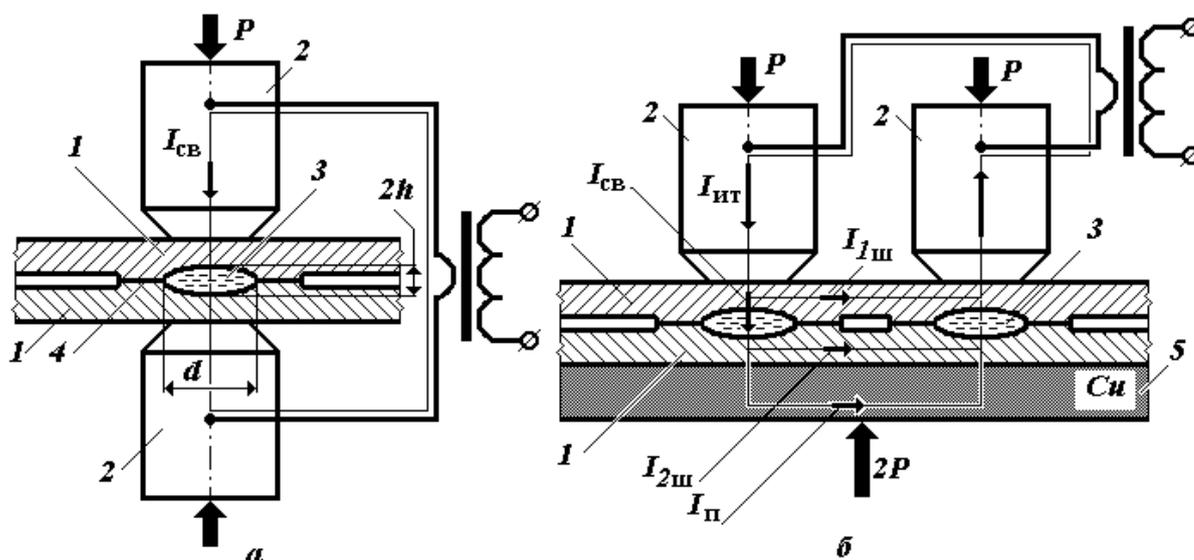


Рис. 14.24. СКС оплавлением: а – схема сварки; б – циклограммы;  $I$  – ток;  $P$  – давление;  $S$  – осадка;  $t$  – время.

При прерывистом оплавлении, заготовки под током приводят в кратковременное соприкосновение и вновь разводят на небольшое расстояние. При смыкании заготовок происходит прерывистое оплавление торцов, заготовки укорачиваются на заданную величину и одновременно равномерно разогреваются по сечению. Число смыканий может быть от двух до нескольких десятков, в зависимости от размеров сечения заготовок. После равномерного оплавления всей поверхности свариваемого стыка, отключают сварочный ток и осаживают заготовки. В процессе сварки оплавлением выравниваются неровности стыка, удаляются из стыка все оксиды и загрязнения. Поэтому не требуется особой предварительной подготовки торцов. Сварка позволяет соединять заготовки из разнородных металлов (быстрорежущая и углеродистая стали; медь и алюминий ...) сечением сложной формы. Однако, расплавленный металл, застывая, образует грат, который необходимо удалять механическим способом.

СКС широко применяется: для получения из проката длинных изделий или заготовок, поступающих в дальнейшую переработку; для изготовления деталей замкнутой формы (звеньев цепей; ободов автомобильных колес; колец жесткости для реактивных двигателей; зубчатых венцов; оконных

переплетов из легких сплавов и др.); для экономического образования сложных деталей из простых катаных, кованных, штампованных или механически обработанных заготовок, часто прошедших перед сваркой окончательную термическую обработку (например: кожух карданного вала автомобиля сваривают из трубы и двух поковок; тягу самолета, сваривают из трубы и двух штампованных проушин); для экономии легированных сталей (например: рабочая часть сверла из быстрорежущей стали сваривается с хвостовиком из низкоуглеродистой стали; заготовку клапана двигателя внутреннего сгорания, получают сваркой стержня из жаропрочной стали, образующего после высадки головку клапана, и хвостовика из конструкционной стали); для уменьшения отходов (например: сварка прутков арматуры железобетона в бесконечную плетть с отрезкой от нее стержней заданной длины; сварка коротких угольников, швеллеров и т. д.).

*Точечная контактная сварка (ТКС) – контактная сварка, при которой сварное соединение получается между торцами электродов, передающих усилие сжатия.*

ТКС широко применяется в штамповарных конструкциях, в которых две или более деталей, штампованные из листа, свариваются в жесткий каркасный узел (кузов легкового автомобиля, кабина грузовика, боковина и крыша пассажирского вагона, бункер комбайна, узлы самолёта и т. п.).

Сварка дает лучшие результаты при изготовлении узлов из относительно тонкого металла (в стальных конструкциях большого размера суммарная толщина свариваемых листов лежит в пределах 2...4 мм; в небольших узлах, легко подаваемых к мощным стационарным машинам – 5...6 мм). Важная область ТКС – соединение очень тонких деталей в электровакуумной технике, приборостроении и т. п. При сварке в массовом производстве с большим количеством точек (арматурных сеток, кузова автомобилей и т. п.) успешно применяется многоточечные машины. Общая мощность таковых машин превышает 1000 ква.

Перед началом сварки контактные поверхности зачищают и обезжиривают. Заготовки 1 устанавливают между нижним и верхним электродами 2 сварочной машины (рис. 14.25, а). Далее заготовки сжимают и подают ток. Прогрев осуществляют до появления жидкой точки 3 между контактными поверхностями. После этого производят проковку.

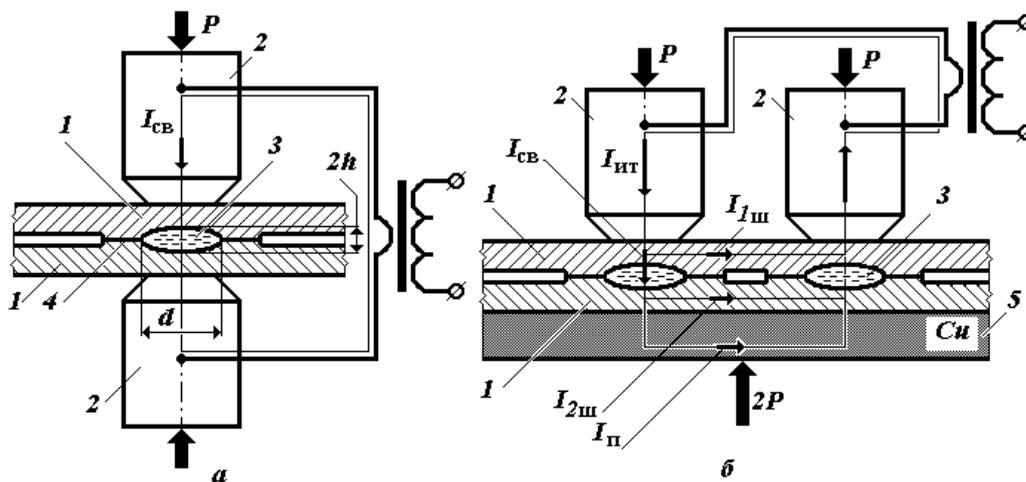


Рис. 14.25.  
Схемы  
точечной  
контактной  
сварки:  
а –  
двухсторонней; б – односторонней

1 – заготовки; 2 – электрод; 3 - жидкая точка; 4 – уплотняющий поясок; 5 - подкладка;  $I_{ит}$  – ток источника тока;  $I_{св}$  – сварочный ток;  $I_{1ш}$  – ток шунтирования в верхней заготовке,  $I_{2ш}$  – ток шунтирования между сварными точками;  $I_{п}$  – ток шунтирования в подкладке;  $h$  – величина проплавления;  $d$  – диаметр жидкой точки.

Для соединения заготовок одновременно в двух точках применяют одностороннюю сварку (рис. 14.25, б). Для этого, заготовки устанавливают на медную плиту и прижимают электродами, расположенными с одной стороны заготовок. При односторонней сварке необходимо учитывать шунтирование тока: в верхней заготовке ( $I_{1ш}$ ), между сварными точками ( $I_{2ш}$ ) и в медной пластине ( $I_{Cu}$ ).  $2I_{св} = I_{1ш} - I_{2ш} - I_{Cu}$ ; где:  $I_{ит}$  – ток источника тока;  $I_{св}$  – сварочный ток, необходимый для получения одной сварной точки.

Нагрев при ТКС характеризуется малой продолжительностью (от тысячных долей секунды до нескольких секунд) и значительной неравномерностью. Наиболее интенсивно нагревается центральный столбик, в пределах которого плотность тока наибольшая. Окружающий металл нагревается протекающим в нем током малой плотности и за счёт теплопередачи (скорость нагрева

значительно меньше). В начале нагрева ток имеет наибольшую плотность в области, прилегающей к контакту между свариваемыми деталями, а в дальнейшем интенсивное тепловыделение поддерживается здесь из-за роста удельного сопротивления при нагреве. Поэтому наиболее быстро нагревается центральная зона точки – её чечевицеобразное ядро, показанное в сечении на **рис. 14.25, а**. Образованию ядра такой формы способствует интенсивный отвод тепла в охлаждаемые электроды. При нагреве до некоторой критической температуры в контакте между деталями под действием силы «*P*» начинают образовываться общие зёрна – начинается сварка без расплавления. Дальнейший нагрев ведёт к расплавлению ядра, образующего после кристаллизации прочное соединение между деталями. Расплавленный металл удерживается в ядре окружающим его кольцом плотно сжатого, пластичного металла. При нарушении плотности этого кольца жидкий металл, сдавленный в ядре, частично выбрасывается - происходит выплеск. Выплеск происходит в начале процесса при слишком быстром нагреве и недостаточном давлении, металл плавится до образования уплотняющего кольца или к концу чрезмерного нагрева, когда из-за значительного увеличения диаметра ядра его тонкая оболочка прогибается, растёт гидростатическое давление в ядре и кольцо прорывается.

Основными параметрами режима точечной сварки являются: сварочный ток, продолжительность его включения, усилие на электродах и размеры их контактной поверхности. Различают сварку на мягких и жестких режимах. Для мягкого режима характерны: большая продолжительность протекания сварочного тока (0,5...3 с); плавный нагрев металла с большой з.т.в.; обеспечение минимального диаметра ядра. Этот режим целесообразен для сварки углеродистых и низколегированных сталей, склонных к закалке. Для жесткого режима характерны: предельно возможный сварочный ток; малая продолжительность протекания сварочного тока (0,001...0,01 с); большое усилие сжатия электродов. Такой режим рекомендуется для сварки высоколегированных сталей, алюминиевых и медных сплавов.

ТКС не позволяет получить непрерывный шов. Размещение сварных точек определяется условиями шунтирования и беспрепятственной пластической деформации. Минимальное расстояние между сварными точками должно быть более 10 суммарных толщин свариваемых листов. С увеличением толщины деталей увеличивается минимальный допустимый шаг точек и их наименьшее расстояние до элементов, затрудняющих деформацию деталей.

ТКС можно сваривать листы разной толщины. При этом надо учитывать, что ядро сварной точки будет смещаться к центру пакета. Поэтому, для того чтобы сварная точка была на границе листов, соотношение толщин листов должно быть не более трех.

*Шовная контактная сварка (ШКС) – контактная сварка, при которой соединение свариваемых частей происходит между вращающимися дисковыми электродами, передающими усилие сжатия.* ШКС предназначена для соединения листовых материалов непрерывным швом. Для этого, заготовки размещают между вращающимися роликами – электродами. ШКС, так же как и ТКС, можно выполнять при одностороннем расположении электродов (рис. 14.26, а). Различают непрерывную и импульсную ШКС (рис. 14.26, б). При непрерывной сварке происходит перегрев металла шва и околошовной зоны, что отрицательно сказывается на качестве шва и работоспособности роликов. При импульсной подаче тока перегрева металла не происходит. При этом необходимо, чтобы сварные точки перекрывали друг друга на  $1/3$  или на  $1/4$  их диаметра. Из-за большого влияния шунтирования нецелесообразно сваривать листы суммарной толщины более трех мм.

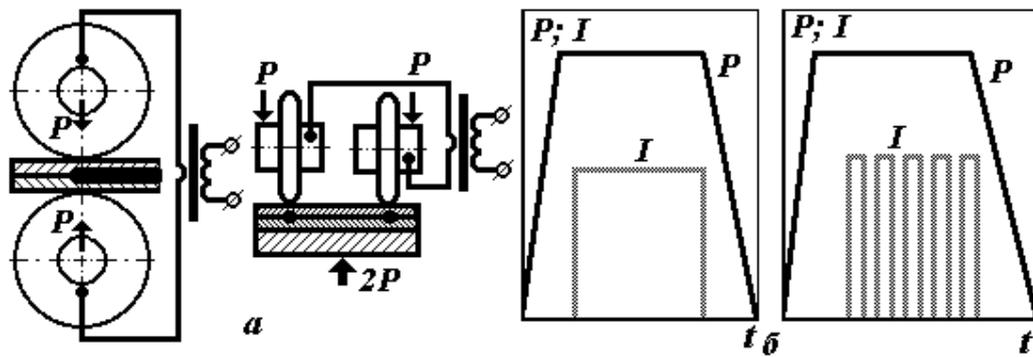


Рис. 14.26. Шовная контактная сварка: а – схемы; б – циклограммы;  $I$  – ток;  $P$  – давление;  $t$  – время.

*Рельефная сварка (РФ) – контактная сварка, при которой сварное соединение получается на отдельных участках, обусловленных их геометрической формой, в том числе по выступам (рис. 14.27).*

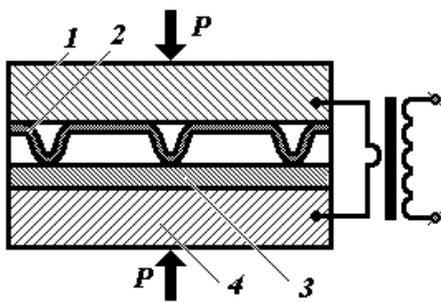


Рис. 14.27. Схема рельефной сварки: 1 – верхний электрод; 2 – листовая заготовка с отштампованным рельефом; 3 – листовая заготовка без рельефа; 4 – нижний электрод;  $P$  – усилие сжатия заготовок.

При РФ листовых заготовок на одной из них, предварительно изготавливают рельеф (выступы круглой, продольной, кольцевой или иной формы). Далее заготовки сжимают и подают ток. Прогрев осуществляют до появления жидких точек между контактными поверхностями. После этого производят проковку. Форма, размеры и число выступов рельефа выбираются в зависимости от формы и толщины свариваемых заготовок, а также в зависимости от назначения готового изделия. В качестве рельефа можно использовать и естественные грани или ребра заготовок, образовавшиеся при штамповке, прокатке или механической обработке. Точность выполнения рельефа должна обеспечивать равномерное распределение сварочного тока и

усилия сжатия. Режим сварки должен обеспечивать оптимальную скорость нагрева рельефов по всем сварным точкам.

#### ***14.7. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ***

Низкоуглеродистые и большинство низколегированных конструкционных сталей обладают хорошей свариваемостью. Основная трудность при их сварке заключается в закалке з.т.в., и возможности образования холодных трещин. Склонность к образованию холодных трещин повышается при насыщении металла шва водородом, который понижает пластичность металла. Источником водорода служит влага, содержащаяся в электродных покрытиях, флюсах, защитных газах. Для предотвращения появления холодных трещин рекомендуется: При дуговой сварке; замедлять охлаждение сварного шва (предварительный и сопутствующий сварке подогрев заготовок до 100...300°С); не проводить сварку в помещениях со сквозняком; прокаливать электроды и флюсы ( $T= 600...700^{\circ}\text{C}$ ); Применять для сварки электроды с покрытием основного типа. Заменять однослойную сварку многослойной. При этом сварку ведут валиками небольшого сечения по неостывшим (ниже 100...300° С) нижним слоям металла. Вести сварку на постоянном токе обратной полярности. непосредственно после сварки производить отпуск изделий до температуры 300°С и выше. при электрических способах сварки работать на мягких режимах (длительный нагрев заготовок и быстрое удаление сваренного изделия из зоны сварки). Контактную и стыковую сварку производить методом прерывистого оплавления, что обеспечивает подогрев деталей перед сваркой. Трудности при сварке высокохромистых и хромоникелевых сталей связаны с тем, что: при продолжительном пребывании металла в зоне температур 500...800°С и в процессе охлаждения в области высоких температур (около 1000°С) возможно выпадение карбидов хрома на границах зерен, что увеличивает склонность к межкристаллитной коррозии и снижает

коррозионную стойкость стали; и возможна закалка шва и в з.т.в. с образованием холодных трещин. С целью предупреждения межкристаллитной коррозии необходимо: Производить сварку при малых погонных энергиях, т.е. применять пониженные значения тока и накладывать валики малого сечения с целью обеспечить большие скорости охлаждения при сварке. Применять теплоотводящие медные подкладки или водяное охлаждение. Вводить в сталь и наплавленный металл, сильные карбидообразователи (титан, ниобий), способные связать углерод в карбиды. После сварки необходимо производить отжиг ( $900^{\circ}\text{C}$ ) изделия. Для предупреждения горячих трещин рекомендуется сваривать заготовки с подогревом до  $200\dots300^{\circ}\text{C}$ , вводить в сварочные материалы легирующие элементы, способствующие измельчению кристаллов (кремний, алюминий, марганец, молибден) и снижать содержание углерода. Эти стали имеют повышенное электрическое сопротивление и низкую теплопроводность, поэтому хорошо свариваются контактной сваркой. При сварке хромоникелевых сталей с повышенным содержанием хрома (до 25%) и никеля (до 20%) металл шва склонен к образованию крупнокристаллической первичной структуры и возникновению горячих трещин. Для уменьшения образования горячих трещин необходимо: применять специальную аустенитную сварочную проволоку (сталь св X25Н15Г7ВЗ, сталь св X25Н15Г7Ф); основные электродные покрытия и флюсы; вести сварку на небольших токах и пониженном напряжении. Для того чтобы получать широкие и выпуклые, а не вогнутые сварные швы; в отдельных случаях полезно применить подогрев до  $300\dots400^{\circ}\text{C}$ .

Чугуны относятся к группе материалов, обладающих плохой технологической свариваемостью. Это вызвано несколькими причинами: В связи с повышенной жидкотекучестью чугуна затруднено удерживание расплавленного металла шва от вытекания. Склонность чугуна при высоких скоростях охлаждения закаливаться с образованием хрупких закалочных структур приводит к образованию холодных трещин. Кроме того, при

быстром охлаждении происходит отбеливание сварного соединения и на границе сварного шва и основного металла образуется тонкая прослойка из белого чугуна. Поскольку эта прослойка непластична, то при незначительных деформациях по ней происходит разрушение шва. Чугун сваривают при выполнении ремонтных работ и исправлении дефектов в отливках. Качество сварного соединения чугунных изделий характеризуется:

обрабатываемостью обычным режущим инструментом, твердостью металла шва, з.т.в. и основного металла; равнопрочностью соединения; однотипностью наплавленного и основного металла по химическому составу и структуре

Горячую сварку чугуна выполняют с предварительным подогревом свариваемой заготовки. Необходимость предварительного подогрева объясняется тем, что чугунная наплавка на холодное изделие быстро охлаждается, особенно в интервалах температур 1200...600°C. Температура предварительного подогрева определяется: размерами заготовок; общей жесткостью места, подлежащего заварке; толщиной стенок; объемом наплавленного металла; структурой чугуна. Для большинства заготовок подогрев до 400...450°C обеспечивает возможность получения качественного сварного соединения и создает условия, исключаящие трещинообразование.

Для заделки литейных пороков применяют электродуговую сварку угольным, графитовым электродом или чугунными электродами со стабилизирующим покрытием. Перед сваркой вырубают дефектные места и заформовывают полученную впадину графитом и кварцевым песком. Для улучшения процесса сварки применяют флюс на основе безводной технической буры ( $Na_2B_4O_7$ ), прокаленной при температуре около 400°C и растертой в порошок, или флюс, состоящий из 23% технической прокаленной буры 27%, соды ( $Ca_2CO_3$ ) и 50% азотнокислого натрия ( $NaNO_3$ ). Сваренное изделие охлаждают вместе с печкой.

сварное соединение обладает механическими свойствами, структурой и химическим составом, свойственным серым литейным чугунам.

При заварке литейных дефектов в крупногабаритных заготовках, а также при ремонтной сварке (например, приварка отбитого прилива, наплавка недоливной части, заварка локальной трещины ...) применяют сварку с местным подогревом заготовки. Технологически этот вид сварки отличается от горячей сварки только местным подогревом заготовки. Сварка с местным подогревом значительно уменьшает время на подогрев и охлаждение детали и облегчает условия труда сварщика.

Холодную сварку чугуна производят без подогрева заготовки. К холодной сварке чугуна относится электродуговая сварка с применением стальных; медно-железных; медно-никелевых электродов и электродов из никелевого аустенитного чугуна. Сварка стальными электродами (со стабилизирующим покрытием, или покрытием с карбидообразующими элементами) производится с применением шпилек. Сталь при наплавке на чугун плохо сцепляется с ним из-за разной усадки. Кроме того, наплавленная на чугун сталь обогащается углеродом в зоне плавления, становится хрупкой, склонной к закалке, и дает при остывании трещины. Поэтому при сварке чугуна для более надежного сцепления наплавленного металла с основным, на кромках в шахматном порядке ставят на резьбе стальные шпильки. Шпильки обваривают кругом, после чего шов заполняют наплавленным металлом. Сварка обеспечивает шов, хорошо обрабатываемый резанием. Медь и никель в составе электродов способствуют графитизации чугуна и препятствуют его отбеливанию.

#### ***14.8. КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ***

*Дефект изделия – каждое отдельное несоответствие изделия требованиям, установленным нормативной документацией.*

В сварочном производстве различают дефекты подготовки и сборки заготовок под сварку и собственно сварочные дефекты. Дефекты подготовки и сборки проявляются в неправильных углах скоса кромок, непостоянстве зазора между стыкуемыми кромками, расслоениях и загрязнениях на

кромках, несовпадении стыкуемых поверхностей, несоответствии линейных и угловых размеров изделия чертежу и т.д. основные причины этих дефектов – ошибки конструктора, несоответствие исходных материалов технологическим требованиям, неисправности технологического оборудования и оснастки, низкая квалификация сварщика и низкая технологическая дисциплина на производстве. Сварочные дефекты могут быть наружными (дефекты формы шва: наплывы, подрезы, не заделанные кратеры, прожоги) и внутренними (дефекты структуры материала и различные несплошности). Наплывы - натекание расплавленного металла электрода на нерасплавленный основной металл из-за чрезмерной силы тока при длинной дуге и большой скорости сварки, неудобного пространственного положения шва, увеличенного наклона плоскости, неправильного ведения электрода, недостаточного опыта сварщика. Подрезы – углубления в основном металле, идущие по краям шва. Возникают из-за значительного тока, повышенного напряжения дуги, неудобного пространственного положения при сварке, небрежности сварщика. Кратер – углубление в конце шва при внезапном прекращении сварки. Прожоги – сквозные отверстия в сварном шве, образующиеся в результате вытекания сварочной ванны при сварке металла небольшой толщины, и первого слоя в многослойных швах, при сварке снизу вверх вертикальных швов. Причинами прожогов являются чрезмерно высокая погонная энергия дуги, неравномерная скорость сварки, увеличенный зазор между кромками свариваемых элементов. Поджоги – возникают в результате возбуждения дуги «чирканье электродом» на краю кромки. К внутренним дефектам (несплошностям) относятся: поры, шлаковые включения, непровары, несплавления, трещины. Поры – полости округлой формы, заполненные газом. Они образуются вследствие загрязненности кромок, использования влажного флюса, отсыревших электродов, недостаточной защиты шва при сварке в  $CO_2$ , увеличенной скорости сварки, завышенной длины дуги. Шлаковые включения в металле сварного шва - небольшие объемы,

заполненные неметаллическими веществами. Окисные пленки – возникают из-за: загрязненности поверхностей свариваемых элементов; плохой зачистке от шлака слоев шва при многослойной сварке; низкого качества электродного покрытия или флюса; низкой квалификации сварщика.

Непровары – местные несплавления в сварном соединении. Причинами непроваров являются: плохая зачистка кромок; блуждание или отключение дуги; чрезмерная скорость сварки; смещение электрода в сторону одной из кромок; неудовлетворительное качество исходных материалов; неудовлетворительная работа сварочного оборудования; низкая квалификация сварщика. Трещины – частичное местное разрушение сварного соединения в виде разрыва. Появлению трещин способствуют факторы: сварка легированных сталей в жестко закрепленных конструкциях; высокая скорость охлаждения при сварке углеродистых сталей, склонных к закалке на воздухе; применение высокоуглеродистой электродной проволоки; использование повышенных плотностей сварного тока; недостаточный зазор между кромками деталей при электрошлаковой сварке; выполнение работ при низкой температуре или на сквозняке. Слипания - несплошности малого раскрытия на свариваемых поверхностях или кромках металла.

Возникновение слипания наиболее при аргонодуговой сварке алюминиевых и магниевых сплавов и при сварке давлением.

Различают три уровня контроля производства сварных конструкций: предварительный (входной), текущий и приемочный.

При входном контроле устанавливают соответствие сертификационных данных в документах предприятий (производств) поставщиков и фактическое соответствие основных параметров поставляемых материалов и полуфабрикатов требованиям, предъявляемым к ним в соответствии с назначением изделия. При изготовлении ответственных конструкций сваривают контрольные образцы. Из них вырезают образцы для испытаний. По результатам испытаний оценивают качество основного и сварочных материалов, квалификацию сварщиков, корректируют технологические

режимы сварки. При текущем контроле проверяют соблюдение сварщиками технологических режимов, исправность технологического оборудования и оснастки. Контролируют фактические геометрические параметры сварного шва, наличие в нем дефектов и геометрические параметры сварной конструкции. Замеченные отклонения устраняются в процессе изготовления данной конструкции.

Ответственные конструкции подвергаются приемочному контролю.

Поверхностные дефекты и геометрические отклонения шва и конструкции в целом определяются внешним осмотром и с помощью линейно – угловых средств измерений. Проводятся испытания сварных швов на плотность, герметичность. Для выявления внутренних дефектов швы подвергаются магнитному контролю, контролю различными видами излучений (рентгеновское, гамма-излучение), контролю ультразвуком.

Испытанию на плотность и герметичность подвергаются емкости, сосуды, трубопроводы, предназначенные для кратковременного или продолжительного хранения или передачи жидкостей или газов под избыточным давлением. Различают испытания: гидравлические, пневматические, с помощью течеискателей и керосином. При гидравлических испытаниях, изделие заполняют водой, создают избыточное давление (в 1,5...2 раза больше рабочего). Выдерживают изделие в течение 5...10 минут. Затем контролируют швы на наличие течи, капель, отпотеваний. При пневматических испытаниях, в изделие нагнетается воздух под избыточным давлением (на 0,01..0,02 МПа). Швы смачиваются мыльным раствором или опускают в воду. Наличие неплотности определяется по мыльным или воздушным пузырькам. При испытаниях с помощью течеискателей внутри изделия создается разрежение, а швы снаружи обдуваются воздушно - гелиевой смесью. Через неплотности гелий засасывается внутрь изделия, откуда отсасывается в течеискатель и регистрируется специальной аппаратурой. При испытаниях керосином, швы снаружи смачиваются керосином. Другая сторона шва окрашивается мелом.

Неплотности обнаруживаются в виде потемневших пятен на мелованной стороне.

Электромагнитные методы контроля основаны на регистрации изменения взаимодействия электромагнитного поля с контролируемым объектом и эталонным образцом. Для этого используют как постоянные, так и переменные (с частотой до 10 МГц) электромагнитные поля. При взаимодействии электромагнитного поля 2 (рис. 14.28) с исследуемым объектом 3 дефект 9 даст возмущение поля 8. Структуру поля вблизи объекта 3 можно установить с помощью подвижного датчика 4 и сканирующей системы 5. Регистрация структуры поля осуществляется измерительной 6 и записывающей 7 системами. При сравнении структуры поля эталонного объекта, не имеющего дефектов со структурой исследуемого объекта можно судить о наличии дефектов. Магнитопорошковый метод контроля основан на различии магнитного рассеивания основного металла сварного соединения и дефектных участков. Исследуемый объект намагничивают. На поверхность сварного соединения наносят масляную суспензию железной окалины. Для облегчения подвижности окалины, образец слегка простукивают. По скоплению окалины судят о наличии дефектов с глубиной залегания до 0,6 м.

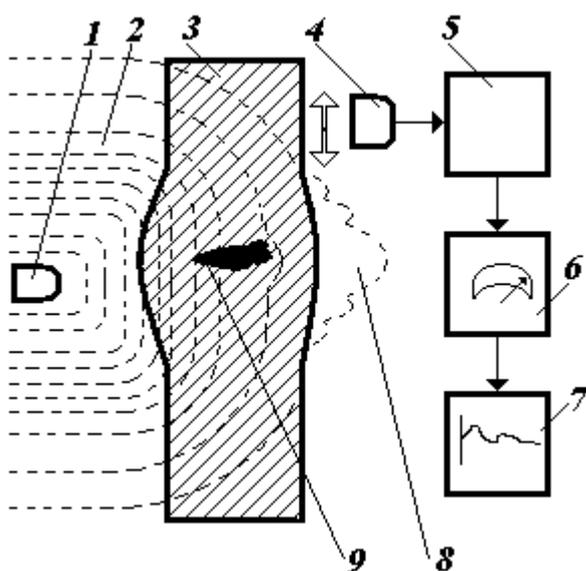


Рис. 14.28. . Схема установки для электромагнитного контроля:  
 1 – источник излучения; 2 – электромагнитное поле; 3 – исследуемый объект; 4 – датчик; 5 – сканирующая система; 6 – измерительная система; 7 – записывающая система; 8 – возмущение электромагнитного поля;

9 – дефект.

Радиационные методы контроля основаны на поглощении и рассеивании ионизирующего излучения 2, проходящего через исследуемый объект 3 (рис. 14.29).

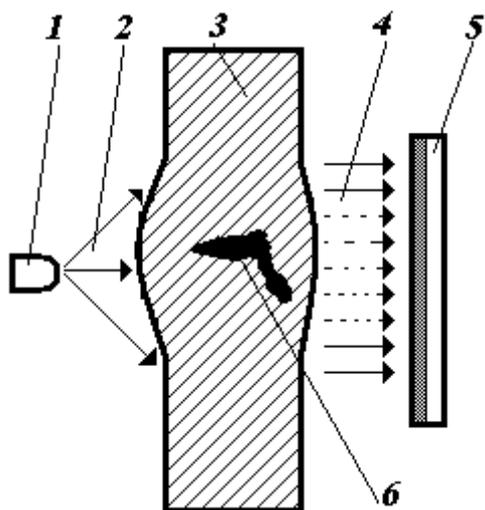


Рис. 14.29. Схема радиационной дефектоскопии: 1 – источник излучения; 2 – излучение; 3 – исследуемый объект; 4 – ослабленное излучение; 5 – детектор; 6 – дефект.

Степень ослабления излучения зависит от:

интенсивности и энергии излучения; толщины и плотности объекта 3.

Наличие в объекте дефекта (имеющего определенные размеры и иную, чем у объекта плотность) меняет характеристики ослабленного излучения 4.

Следовательно, структура ослабленного излучения несет информацию о внутренней структуре объекта 3. В промышленности применяют установки с рентгеновским излучателем или с источником гамма-излучения (кобальт-60, тулий-170, иридий-192). Промышленные рентгеновские аппараты позволяют просвечивать соединения из стали толщиной до 200мм с регистрацией дефектов, размеры которых составляют до 2% от толщины металла. Промышленные аппараты с гамма источником более компактны, чем рентгеновские, но при малых толщинах исследуемого объекта (от 50 мм) имеют низкую чувствительность.

Ультразвуковые методы контроля основаны на изменении структуры ультразвуковой волны 6 (рис. 14.30) при прохождении участков с различной плотностью и протяженностью. Акустическое поле излучателя 5 распространяется в объеме исследуемого объекта 1. При наличии дефекта 4 акустическое поле изменяет свою структуру (появятся акустическая тень 7 и отраженная волна 3). Регистрируя с помощью приемника 2 отраженную

волну и приемника 8 ослабление волны, можно судить о расположении и размерах дефекта. Промышленные ультразвуковые дефектоскопы позволяют обнаружить дефекты размером  $1 \dots 2 \text{ мм}^2$  на глубине от 1 до 250 мм.

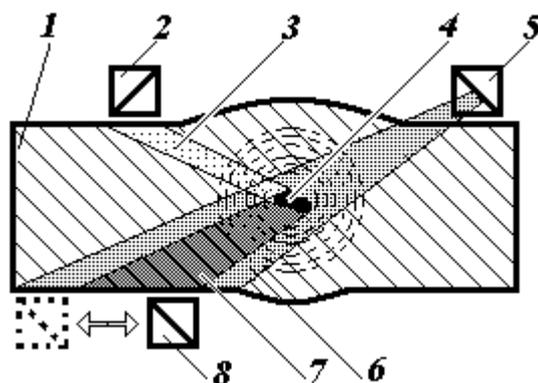


Рис. 14.30. Схема ультразвуковой дефектоскопии: 1 - исследуемый объект; 2, 8 – приемник акустических колебаний; 3 – отраженная волна; 4 – дефект; 5 – излучатель; 6 – ультразвуковая волна; 7 - тень.

### ***Контрольные вопросы***

1. Что такое сварка плавлением; сварка с применением давления?
2. Что такое зона термического влияния?
3. Какую роль в сварочном процессе играет покрытие электродов?
4. Какие мероприятия необходимо предпринять по защите сварщика от воздействия ультрафиолетового излучения?
5. Почему сварка под флюсом обладает повышенной производительностью и обеспечивает качественный шов?
6. В чем заключается сущность электрошлаковой сварки?
7. В чем заключается сущность высокочастотной сварки?
8. Как работает инжекторная горелка?
9. Какие металлургические процессы происходят при газовой сварке?
10. Какие заготовки можно соединять электроннолучевой сваркой?
11. Опишите схему формирования шва при лазерной сварке.
12. В чем особенности физических явлений, протекающих при сварке трением?

13. Где и почему выделяется наибольшее количество тепла при контактной сварке?
14. Какие затруднения возможны при сварке хромистых высоколегированных сталей?
15. Какие дефекты могут появиться при сварке?
16. Какие методы неразрушающего контроля применяют для выявления внутренних дефектов в сварных соединениях и их сущность?

## ***ГЛАВА 15. МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК***

Высокие требования к изделиям машиностроения по качеству надежности и долговечности обеспечиваются технологическими методами обработки заготовок. Технологические методы обработки заготовок условно можно разделить на три группы: механическая обработка, электрофизические и электрохимические методы; комбинированные методы. Методы механической обработки можно, в свою очередь, разделить на две группы: формообразование поверхности заготовок резанием (лезвийная обработка, абразивная обработка и отделочная обработка) и пластическим деформированием.

### ***15.1. Физико-механические основы обработки материалов резанием***

Обработка материалов резанием – это процесс срезания режущим инструментом 5 (рис. 15.1, а) с поверхности заготовки 4 слоя металла в виде стружки б, с целью получения заданной геометрической формы, точности размеров, взаиморасположения и шероховатости поверхности детали. Резание металлов – это сложный процесс физико-механического взаимодействия режущего клина инструмента, заготовки и окружающей среды. Для обработки детали, режущий инструмент и заготовку необходимо установить и закрепить в рабочих органах станка и сообщить им относительные движения. Движения рабочих органов станка разделяются на движения резания, установочные и вспомогательные. Движения, которые обеспечивают срезание с заготовки поверхностного слоя металла или изменение состояния обработанной поверхности называются движениями резания. К ним относят: главное движение и движение подачи. Главным движением ( $D_p$ ) называется движение, определяющее скорость деформирования и отделения стружки. Движением подачи ( $D_s$ ) называется движение, обеспечивающее непрерывность врезания режущей кромки инструмента в материал заготовки. Эти движения могут быть вращательным, поступательным, возвратно-поступательным, непрерывным или

прерывистым. В начальный момент процесса резания, движущийся режущий клин  $7$  вдавливается в материал заготовки, создавая в срезаемом слое упругие деформации. При дальнейшем перемещении клина упругие деформации переходят в пластические.

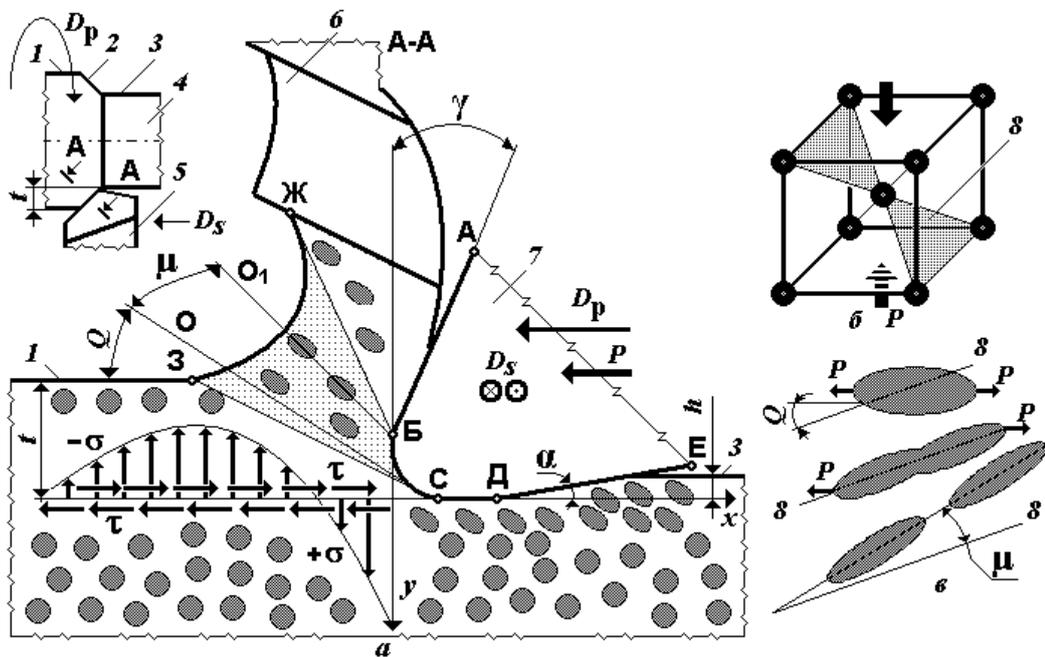


Рис. 15.1. Схема зоны резания: а – схема упруго напряженного состояния материала заготовки в зоне резания; б – плоскость сдвига в ОЦК; в – этапы разрушения кристаллического тела; 1 – обрабатываемая поверхность; 2 – поверхность резания; 3 - обработанная поверхность; 4 – заготовка; 5 – режущий инструмент; 6 – стружка; 7 – режущий клин; 8 – плоскость сдвига; ВС – скругление режущего клина; АВС – передняя поверхность; СД – площадка износа; СДЕ – задняя поверхность; БСЗЖ – зона стружкообразования; СЗ – плоскость начала деформаций сдвига; БЖ – плоскость конца деформаций сдвига; СО – плоскость сдвига; БО1 – направление осей деформированных кристаллов;  $P$  – сила;  $D_p$  – главное движение резания;  $D_s$  – движение подачи;  $Q$  – угол сдвига;  $\mu$  – угол поворота оси БО1;  $\gamma$  – передний угол;  $\alpha$  – задний угол;  $t$  – глубина резания;  $h$  – упругое восстановление обработанной поверхности;  $\sigma$ ,  $\tau$  – нормальные и касательные напряжения.

В плоскости, перпендикулярной движению резания возникают нормальные напряжения  $\sigma$ . В плоскости, совпадающей с движением резания – касательные напряжения  $\tau$ . Рост пластических деформаций приводит к деформации сдвига. Эти деформации происходят в зоне стружкообразования СБЖЗ. В плоскости БЖ происходит разрушение кристаллов (скалывается элементарный объем металла и образуется стружка). Пластическая деформация кристаллического тела происходит в плоскости  $\delta$  минимального сопротивления деформации (рис. 15.1, б) (в плоскости сдвига). При этом тело вытягивается в направлении плоскости сдвига (рис. 15.1, в). Оси кристаллов поворачиваются на угол  $\mu$ . Угол поворота оси кристалла  $\mu$  лежит в пределах  $0 \dots 30^\circ$  (с увеличением пластичности металла – угол увеличивается). Условно можно считать, что деформации сдвига происходят в плоскости «СО» под углом сдвига  $Q = 30^\circ$ .

При обработке, на заготовке 4 можно выделить три поверхности: 1 – обрабатываемая поверхность, 3 – обработанная поверхность, 2 – поверхность резания (соединяет обрабатываемую и обработанную поверхности).

Режущий клин 7 очерчен следами двух поверхностей: АВС – передняя поверхность (поверхность, контактирующая с зоной стружкообразования, и поверхность, по которой стекает стружка); СДЕ – задняя поверхность (поверхность, обращенная к обработанной поверхности заготовки).

Очевидно, что угол  $\gamma$  (называемый передним углом) определит: величину усилия, необходимого на внедрение режущего клина в материал заготовки и прочностные свойства режущего клина. По мере прохождения режущего инструмента, обработанная поверхность, вследствие воздействий упругих и пластических деформаций, упруго восстанавливается на величину  $h$ , и структура поверхностных слоев отличается от структуры сердцевины. Твердость поверхностного слоя будет выше твердости сердцевины, «наклёпанный слой» или «наклеп». Величина упругого восстановления обработанной поверхности, твердости поверхностного слоя, глубины

расположения наклепанного слоя и эпюры напряжений зависят от физико-механических свойств обрабатываемого металла, геометрии режущего инструмента, условий обработки, режимов резания. Поэтому режущий клин должен быть заточен под углом  $\alpha$  (задний угол), что уменьшит пластическое деформирование (и возможное разрушение) обработанной поверхности. Срезанный сегмент стружки претерпевает дополнительную деформацию вследствие трения о переднюю поверхность, и завивается в спираль. Структура металла в зоне СБЖЗ отличается от структуры нижележащих слоев основного металла. В этой зоне кристаллы деформированы и разрушены. Они измельчены и вытянуты цепочкой примерно в одном направлении. (На рисунке недеформированные слои условно показаны в виде окружностей, по мере деформации окружности сплющиваются). Характер деформаций срезаемого слоя зависит от физико-механических свойств обрабатываемого металла, геометрии режущего инструмента, условий обработки, режимов резания и т.д.

При обработке заготовок резанием образуется стружка: сливная, скалывания и надлома. Сливная стружка образуется при обработке пластичных материалов. Она представляет собой сплошную зазубренную ленту с гладкой прирезцовой стороной. Эта стружка достаточно опасна для оператора (травмирование оператора). Стружка скалывания образуется при обработке материалов средней твердости. Она представляет отдельные сегменты ленты с гладкой прирезцовой стороной и ярко выраженными зубринами на внешней стороне. Эта стружка так же может травмировать оператора, но ее легче убирать от станка. При резании хрупких материалов образуется стружка надлома. Она представляет собой отдельные сегменты неправильной формы. Стружка удобна для транспортирования, но может травмировать лицо, глаза и руки оператора.

Для любого процесса резания можно составить схему обработки (рис. 15.2). На схеме условно изображают обрабатываемую заготовку 2; ее базирование 8 и закрепление 7 в рабочем приспособлении станка 3; режущий инструмент 1

в положении соответствующем концу обработки. Обработанную поверхность б выделяют красной или утолщенной черной линией. Используя условные обозначения, показывают характер движений резания (движение резания  $D_p$  и движение подачи  $D_s$ ), их направление. Различают движения подачи: продольное  $D_{s\text{прод}}$ ; поперечное  $D_{s\text{поп}}$ ; вертикальное  $D_{sv}$ ; круговое  $D_{скр}$  и другие.

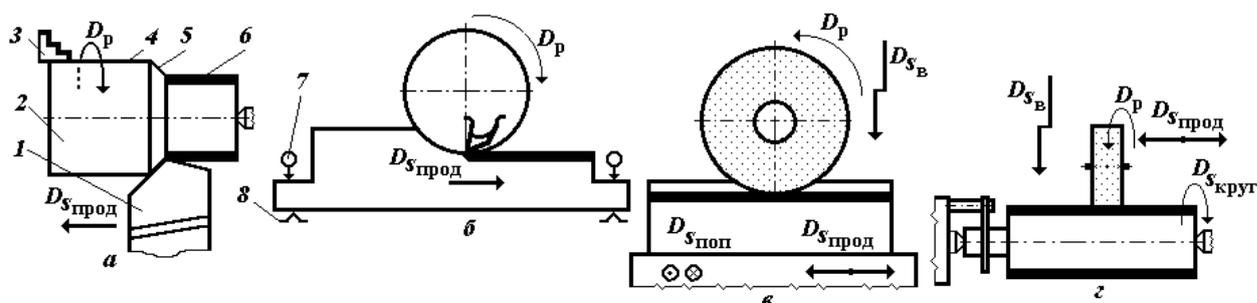


Рис. 15.2. Схемы обработки заготовок: а - продольным точением; б - поперечным точением; в - растачиванием; г - фрезерованием; д - плоским шлифованием; е - круглым шлифованием: 1- режущий инструмент; 2 – заготовка; 3 – станочное (рабочее) приспособление; 4 – обрабатываемая поверхность; 5 – поверхность резания; 6 – прижим; 7 – базирующий элемент.

Элементами процесса резания являются: скорости движений резания и глубина резания. Совокупность этих элементов называется «режим резания».

Скорость резания ( $V_p$ ) - путь точки режущего лезвия инструмента относительно заготовки в единицу времени, в направлении главного движения. Размерность скорости резания: для лезвийной обработки – м/мин; для абразивной обработки – м/с. Если главное движение является вращательным, то

$V_p = \pi Dn/1000$ , (для лезвийной обработки) или  $V_p = \pi Dn/60000$ , (для шлифования), где:  $D$  - наибольший диаметр обрабатываемой поверхности заготовки или диаметр вращающегося инструмента в мм;  $n$  - частота вращения заготовки (инструмента) в оборотах в минуту. Если главное движение является возвратно-поступательным, а скорости рабочего и холостых ходов разные, то средняя скорость равна:  $V_{cp} = Lm(K+1)/1000$ , в м/мин, где:  $L$  – расчетная длина хода резца, в мм;  $m$  – число двойных ходов

резца в минуту;  $K = V_{px} / V_{xx}$  – коэффициент отношения скорости рабочего хода ( $V_{px}$ ) к скорости холостого хода ( $V_{xx}$ ). Скорость движения подачи (подача) ( $S$ ) – путь точки режущего лезвия инструмента относительно заготовки в единицу времени, в направлении движения подачи. Различают: подачу в минуту (минутная подача) подачу на оборот; подачу на зуб и подачу на двойной ход. Подача в минуту ( $S_M$ ) – перемещение режущего инструмента в минуту [мм/мин], подача на оборот ( $S_o$ ) – перемещение режущего инструмента за 1 оборот заготовки или инструмента [мм/оборот], подача на зуб ( $S_z$ ) – перемещение режущего многозубого инструмента за время поворота на угол, равный угловому шагу зубьев [мм/зуб], подача на двойной ход ( $S_{2x}$ ) – перемещение режущего инструмента за один двойной ход [мм/дх].  $S_M = S_o n = S_z n Z = S_{2x} N$ , где:  $Z$  – число зубьев инструмента,  $N$  – число двойных ходов в минуту. Глубина резания ( $t$ ) – кратчайшее расстояние между обработанной и обрабатываемой поверхностями [мм].

Рассмотрим параметры режущего инструмента. Режущий инструмент (рис. 15.3) состоит из рабочей части (головки) 2 и тела (стержня) 3. Тело резца служит для его установки и закрепления в резцедержателе. Рабочая часть резца образуется при его заточке и содержит следующие элементы: переднюю, поверхность 4 (поверхность по которой сходит стружка); главную заднюю поверхность 6 (она наиболее развита и направлена по движению подачи); вспомогательную заднюю поверхность 1 (направлена против движения подачи). Пересечение передней и главной задней поверхностей дает главную режущую кромку 7. пересечение передней и вспомогательной задней поверхностей дает вспомогательную режущую кромку 5. Режущие кромки пересекаются в вершине резца 8. Расположение поверхностей и кромок резца определяется его заточкой (геометрия инструмента).

Для определения углов, под которыми располагаются элементы инструмента, вводят координатные плоскости (рис. 15.4). Основная плоскость ( $P_v$ ) параллельна возможным направлениям движения подачи для данного способа обработки. Плоскость резания ( $P_n$ ) проходит через главную

режущую кромку касательно поверхности резания. Главная секущая плоскость ( $P_{\tau}$ ) проходит через главную режущую кромку перпендикулярно поверхности резания.

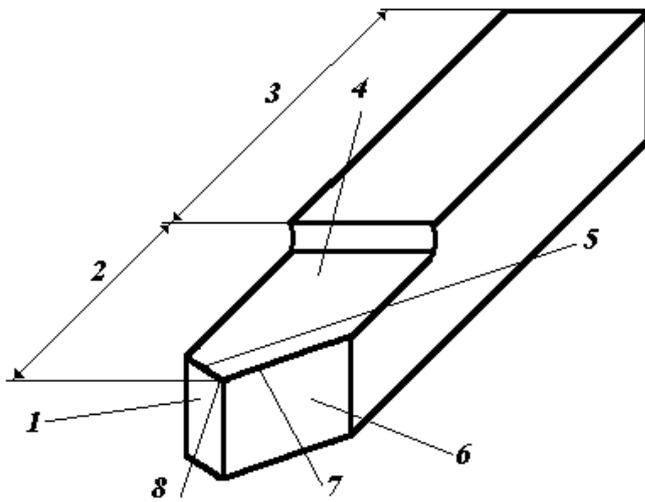


Рис. 15.3. Элементы и части прямого токарного проходного резца; 1, 6 – вспомогательная и главная задние поверхности; 2 – головка резца; 3 – тело резца; 4 – передняя поверхность; 5, 7– вспомогательная и главная режущие кромки; 8 – вершина резца.

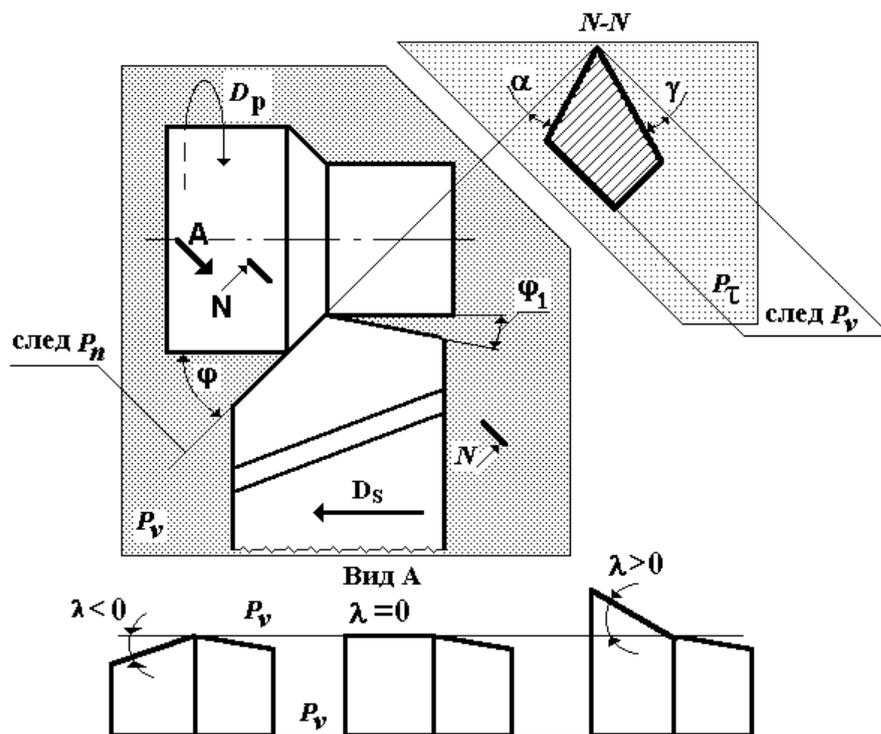


Рис. 15.4. Углы резца в статической системе координат:  $D_s$  – движение подачи;  $D_p$  – движение резания;  $P_v$  – основная плоскость;  $P_n$  – плоскость резания;  $P_{\tau}$  – главная секущая плоскость;  $\alpha, \gamma$  – главные задний и передний углы;  $\phi, \phi_1$  – главный и вспомогательный углы в плане;  $\lambda$  – угол наклона главной режущей кромки.

Главные углы (рис. 15.4) рассматриваются в главной секущей плоскости ( $P_\tau$ ). Главный задний угол  $\alpha$  лежит между касательной к главной задней поверхности в рассматриваемой точке главной режущей кромки и плоскостью резания. Наличие угла уменьшает трение между обработанной и главной задней поверхностями, что увеличивает стойкость инструмента. Однако чрезмерное увеличение угла приводит к уменьшению прочности режущего лезвия. Главный передний угол  $\gamma$  лежит между основной плоскостью  $P_v$  и передней поверхностью. Угол оказывает большое влияние на процесс резания. С увеличением угла уменьшаются деформации срезаемого слоя, улучшаются условия схода стружки; уменьшаются силы резания; повышается качество обработки. Однако чрезмерное увеличение угла приводит: к уменьшению прочности режущего лезвия; увеличению износа режущего лезвия; вследствие выкрашивания, к ухудшению теплоотвода от инструмента.

Углы в плане рассматриваются между направлением движения подачи и проекцией соответствующей режущей кромки на основную плоскость.

Главный угол в плане  $\phi$  определяет параметры переходного конуса между обрабатываемыми цилиндрами и угол фасок, т.е. определяется конструктором. В основном, угол влияет на шероховатость обработанной поверхности. С уменьшением угла шероховатость, уменьшаются сила и температура резания, приходящиеся на единицу длины режущей кромки, но резко увеличивается сила резания в направлении перпендикулярном оси заготовки. Вспомогательный угол в плане  $\phi_1$  влияет на шероховатость обработанной поверхности (с уменьшением угла она уменьшается).

Главная режущая кромка не всегда совпадает с основной плоскостью, поэтому рассмотрим угол наклона главной режущей кромки  $\lambda$ . Это угол между главной режущей кромкой и основной плоскостью, проведенной через вершину резца. Если вершина является высшей частью главной режущей кромки, то  $\lambda < 0$ , если вершина совпадает с основной плоскостью, то  $\lambda = 0$ ,

если вершина является нижней частью главной режущей кромки, то  $\lambda > 0$ . С увеличением угла ухудшается качество обработанной поверхности. Но чаще всего, выбор величины и знака угла определяется направлением схода стружки. При отрицательных углах, стружка сходит по направлению движения подачи, что безопасно при работе на универсальных станках. При положительных углах, стружка сходит по направлению против движения подачи, что безопасно при работе на станках с автоматическим и полуавтоматическим циклом. Положительные углы применяются при обработке отверстий, для того, чтобы стружка выходила из отверстия. Под силой резания понимают силу сопротивления перемещению режущего инструмента относительно обрабатываемой заготовки. Работа, затрачиваемая на деформирование и разрушение поверхностных слоев заготовки, расходуется на упругое и пластическое деформирование металла, на его разрушение и на трение задней поверхности об обработанную поверхность и стружки о переднюю поверхность режущего инструмента (рис. 15.5, а). Результатом сопротивления металла заготовки процессу резания является возникновение реактивных сил, действующих на режущий инструмент: Сил упругого ( $P_{уп1}$  и  $P_{уп2}$ ) и пластического ( $P_{п1}$  и  $P_{п2}$ ) деформирования, направленных перпендикулярно соответственно к задней и передней поверхностям инструмента. Сил трения ( $T_1$  и  $T_2$ ) по задней и передней поверхностям.

Векторная сумма всех этих сил даст единичную силу резания  $P_i$  по сечению резца. Просуммировав единичные силы, получим равнодействующую силу резания:  $P = \sum P_i = \sum P_{уп} + \sum P_{п} + \sum T$ . Однако, вследствие переменности условий резания (неоднородность структуры металла заготовки; допуски на размеры обрабатываемой поверхности; и т.д.), равнодействующая сила резания переменна по величине и направлению.

Для расчетов используют, не силу « $P$ », а ее проекции на заданные координатные оси (рис. 15.5, б). Ось  $OX$  проводят в направлении, противоположном направлению движения подачи. Ось  $OZ$  проводят в

направлении главного движения. Ось  $OY$  проводят в направлении перпендикулярном обработанной поверхности. Полученные проекции называют:  $P_z$  – главная составляющая силы резания;  $P_x$  – осевая составляющая силы резания;  $P_y$  – радиальная составляющая силы резания. Главную составляющую силы резания  $P_z$  определяют по эмпирической формуле:  $P_z = C_p t^x S^y V^z K_1 K_2 \dots K_i$ , где:  $C_p$  – коэффициент, учитывающий физико-механические свойства обрабатываемого материала; показатели степени ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) и коэффициенты  $K_1 K_2 \dots K_i$  учитывают факторы, не вошедшие в формулу. Аналогичные формулы существуют и для расчета других составляющих силы резания.

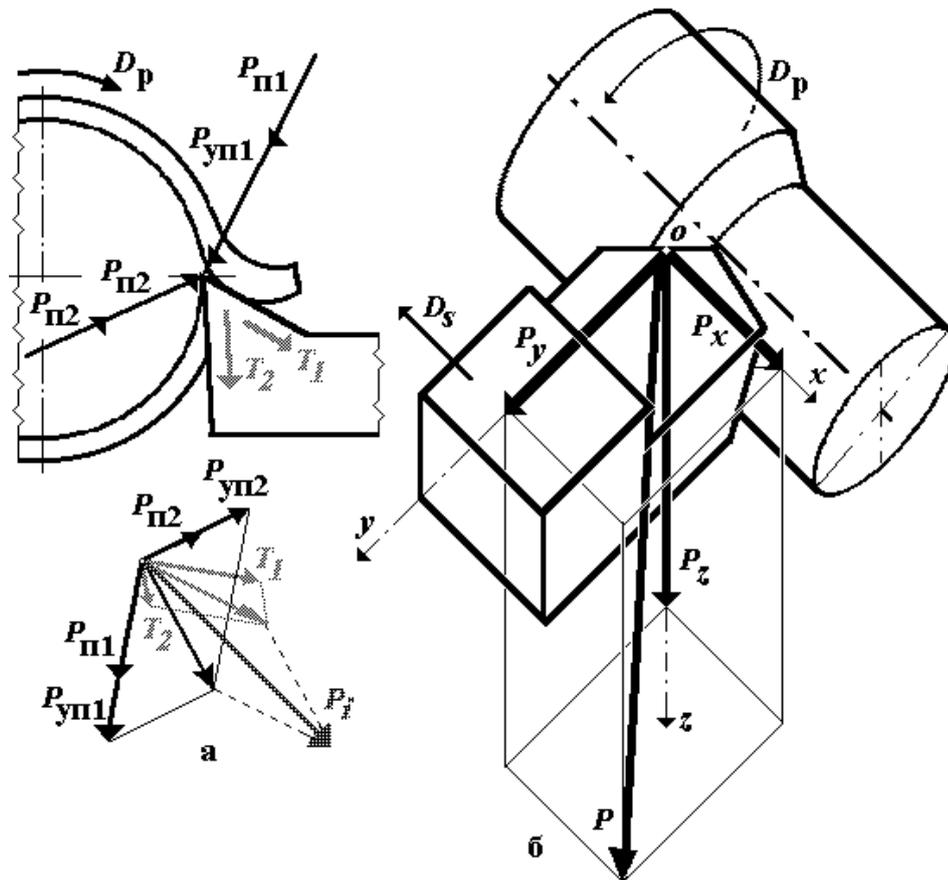


Рис. 15.5. Сила резания: а - плоская система сил; б - разложение силы резания на составляющие:  $D_p$  – движение резания;  $D_s$  – движение подачи;  $P_{уп1}$ ,  $P_{п1}$  – реактивные силы упругой и пластической деформации по передней поверхности;  $P_{уп2}$ ,  $P_{п2}$  – реактивные силы упругой и пластической деформации по задней поверхности;  $T_1$ ,  $T_2$  – силы трения;  $P$  – сила резания;  $P_z$ ,  $P_x$ ,  $P_y$  – главная, осевая и радиальная составляющие силы резания.

Процесс резания сопровождается обильным тепловыделением. Источниками тепла являются: упругопластическое деформирование обрабатываемого материала в зоне стружкообразования ( $Q_{уп}$ ); трение стружки о переднюю поверхность ( $Q_{пп}$ ); трение задних поверхностей о поверхность резания и обработанную поверхность ( $Q_{зп}$ ). Потребителями тепла являются: стружка ( $q_c$  – количество тепла отводимое стружкой); заготовка ( $q_z$ ); режущий инструмент ( $q_{и}$ ) и среда, окружающая зону резания ( $q_{ср}$ ). Тепловой баланс процесса резания можно представить в виде:  $Q = P_z V_p = Q_{уп} + Q_{пп} + Q_{зп} = q_c + q_z + q_{и} + q_{ср}$ . В зависимости от метода и условий обработки стружка, заготовка, инструмент и среда потребляют различные доли тепла.

Распределение потребления тепла в основном зависит от скорости резания. При обработке металлических материалов, основную долю тепла (до 85%) потребляет стружка, инструмент и заготовка потребляют соответственно 2...8% и 10...40%. При обработке неметаллических материалов, низкая теплопроводность материала заготовки и стружки не позволяет им потреблять большое количество тепла (в сумме 5...15%). Основную долю тепла (до 75%) потребляет режущий инструмент.

Нагрев заготовки и режущего инструмента отрицательно сказываются на точности обработки и стойкости инструмента. Нагрев режущего клина в зоне стружкообразования до 800...1000°C вызывает структурные превращения в материале инструмента, снижается его твердость, теряются его режущие свойства. Нагрев тела инструмента вызывает изменение его размеров и геометрии, что вызывает уменьшение размеров обработанной поверхности, ухудшение ее шероховатости. Например, увеличение длины токарного резца при обточке цилиндра приводит к конусности обработанной поверхности. Неравномерный нагрев заготовки приводит к изменению ее размеров и геометрии.

Вся гамма физико-химических процессов при резании металлов (трение стружки о переднюю поверхность, трение обработанной поверхности о

заднюю; высокие температуры и высокие давления в зоне резания, окисление материала передней поверхности и т.д.) приводит к изнашиванию режущего инструмента. Различают (рис. 15.6, а): износ по передней поверхности (вытирание лунки шириной « $b$ ») и износ по задней поверхности (ленточка, шириной « $h_3$ »). Для определения оптимального времени работы инструмента исследуют зависимость износа инструмента от времени его работы. На диаграмме «износ-время» (рис. 15.6, б) можно выделить три зоны: 1 – зона приработки; 2 – зона нормального износа и 3 – зона аварийного износа. Время работы инструмента от переточки до переточки называется «стойкость».  $T_{\phi}$  – физическая стойкость, т.е. работа инструмента, не доходя до зоны аварийного износа. Но при чистовой обработке, износ может существенно влиять на точность обработки, вследствие уменьшения его фактического вылета  $L_n < L_{и}$ , где:  $L_n$  – вылет нового (заточенного) инструмента;  $L_{и}$  – вылет изношенного инструмента. Поэтому, для чистовой обработки назначают размерную стойкость  $T_p$ , (инструмент изнашивается до величины, при которой происходит существенное влияние износа на точность обработки). Различают: минутную стойкость  $T_m$  – период работы в минутах; штучную стойкость  $T_{шт}$  – количество обработанных деталей до переточки. Наибольшее влияние на стойкость инструмента влияет скорость резания, поэтому в расчетах стойкости чаще всего используется зависимость:  $T^m = C_m / V_p$ , где:  $C_m$  – постоянная величина;  $m$  – показатель относительной стойкости (для точения,  $m = 0,1 \dots 0,3$ ).

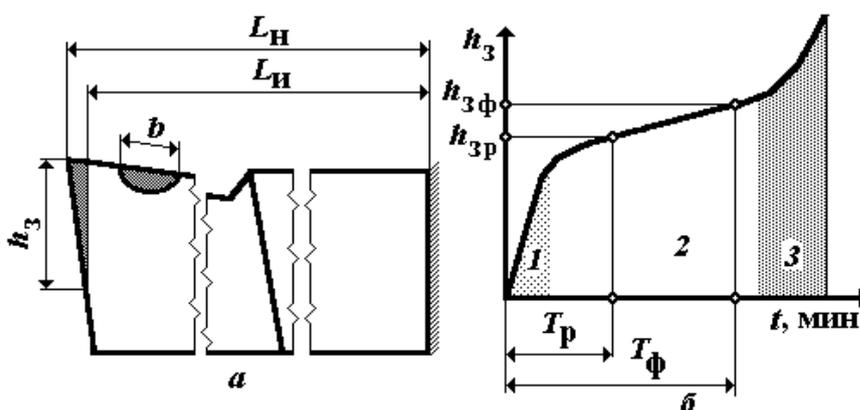


Рис. 15.6. Износ и стойкость режущего инструмента:  
а – износ инструмента по задней ( $h_3$ ) и передней ( $b$ ) поверхностям; б –

диаграмма «Износ - время»:  $L_n$  – вылет нового (заточенного) инструмента;  $L_{ин}$  – вылет изношенного инструмента;  $t$  – время непрерывной работы инструмента;  $h_{зф}$ ,  $h_{зр}$  – физический и размерный износ по задней поверхности;  $T_f$ ,  $T_r$  – физическая и размерная стойкость инструмента; 1 – зона приработки; 2 – зона нормального износа; 3 – зона аварийного износа.

### ***15.2. Точность и производительность обработки***

Под точностью обработки понимается соответствие изготовленного изделия или партии изделий (детали, узла, машины) эталону, т.е. его (ее) чертежу.

Применительно к обрабатываемым деталям различают: размерную точность (соответствие размеров изделия чертежу), геометрическую точность (соответствие формы, волнистости и шероховатости поверхности требованиям чертежа), соответствие физико-химических свойств, структурного состояния (микротрещины, надрывы, измельченная структура) поверхностных слоев; соответствие остаточных напряжений в поверхностных и глубинных слоях детали (глубина их проникновения, величина, знак) требованиям чертежа и т.д.

Физико-механическое состояние обработанной поверхности характеризуется деформационными изменениями ее поверхностных слоев. Следствием этих изменений является: деформационное упрочнение (наклеп) поверхности и степень деформации отдельных зерен. Наклеп поверхностного слоя оценивается по глубине  $h_n$  и степени  $u_n$  наклепа.  $U_n = 100 (H_{max} - H_{исх}) / H_{исх}$ , где:  $H_{max}$  и  $H_{исх}$  – максимальная и исходная микротвердость поверхностного слоя металла. Деформационное упрочнение поверхностного слоя зависит от пластических свойств обрабатываемого металла, режимов резания, геометрии и износа режущего инструмента, условий обработки.

Производительность обработки (число деталей выпускаемых в единицу времени) рассчитывается по формуле:  $Q = 1 / T_{шт}$ . Штучное время  $T_{шт}$  складывается из: основного технологического ( $T_o$ ), подготовительно - заключительного ( $T_{пз}$ ) времен, и времени на организационное и техническое

обслуживание рабочего места ( $T_{\text{орг.тех}}$ ). Основное технологическое время, т.е. время, затрачиваемое непосредственно на обработку поверхности (детали)  $T_0 = T_M + T_B + T_{XX}$ . Время холостых ходов ( $T_{XX}$ ) затрачивается на быстрый подвод – отвод режущего инструмента в зону обработки. Вспомогательное время ( $T_B$ ) - затрачивается на следующие перемещение режущего инструмента с рабочей подачей: подвод, врезание, прохождение участков, не требующих снятия стружки, перебеги (гарантированный отвод инструмента). Машинное время ( $T_M$ ) – это время, затрачиваемое на снятие стружки  $T_M = L/(nS_o)$ , где:  $L$  - длина обработки в мм,  $n$  – частота вращения в об/мин.

### ***15.3. Инструментальные материалы***

В зоне резания, на инструмент воздействуют: высокотемпературное поле ( $300 \dots 800^\circ\text{C}$  и выше); высокие давления (более 500 мПа); высокое истирающее воздействие стружки. Режущий инструмент находится в достаточно агрессивной физико-химической среде. Поэтому инструментальные материалы должны обладать особыми физико-механическими и технологическими свойствами. Основные из них: высокая твердость, прочность, пластичность, температуростойкость; высокое сопротивление схватываемости с обрабатываемой поверхностью и износостойкость; низкая склонность трещинообразованию; хорошая свариваемость или способность к соединению пайкой; низкая стоимость и высокая технологичность. Обработке подвергаются самые различные материалы, поэтому, характеризуя инструментальный материал, приводят скорости резания для стандартных условий резания, а именно: наружное точение стали 45, глубина резания 1 мм, подача 0,1 мм/об.

Углеродистые стали, относятся к инструментальным материалам общего назначения, применяемым для изготовления ручного режущего инструмента (скорость резания до 3 м/мин). Основные марки: У9; У10; У10А; У11А; У12А.

Низколегированные стали как и углеродистые, применяются для ручного режущего инструмента, но могут применяться и для инструмента, работающего со скоростями до 5 м/мин. В основном, применяются, стали легированные хромом, ванадием, кремнием и марганцем.

Быстрорежущие стали широко применяются в промышленности для изготовления инструментов работающих со скоростями резания 20...100 м/мин. Различают: стали обычной производительности (до 20 м/мин) (марки: P9; P12; P18; P6M5; P9K10); стали повышенной производительности (до 70 м/мин) (марки: P6M5K5; 10P6M5Ф3; P10K5Ф5) и порошковые стали (до 100 м/мин) (марки: P6M5K5M; P6M5K5OM; 10P6M5K5Ф3OM). Для порошковых сталей: окончание «М» - мелкая структура; окончание «ОМ» - особо мелкая структура. С 1980 г. в промышленности применяются, быстрорежущие стали, с интерметаллидным упрочнением, марок В11М7К23; В4М12К23 и др. Эти стали, применяются, в основном, для точения, фрезерования и строгания труднообрабатываемых материалов. По сравнению со сталью P18 их стойкость выше: при обработке титановых сплавов - в 20...35 раз; при обработке аустенитных и нержавеющей сталей – в 8...15 раз; при обработке чугунов – в 3...4 раза.

Металлокерамические твердые сплавы состоят из тонко измельченных карбидов тугоплавких металлов (вольфрам, титан, тантал), соединенных связкой – кобальтом. Благодаря наличию карбидов тугоплавких металлов сплавы имеют высокую температуростойкость, твердость и износостойкость. Поэтому допускается скорость резания 100...150 м/мин. Существует четыре вида твердых сплавов: вольфрамовые; вольфрамо-титановые; вольфрамо-титано-танталовые и безвольфрамовые. В группу вольфрамовых твердых сплавов входят: ВК3; ВК3М; ВК4; ВК6 ОМ; ВК6М; ВК8; ВК10 ОМ; ВК10М; ВК15 (В - карбид вольфрама, К - кобальт, число после «К» - процентное содержание кобальта, остальное - карбиды вольфрама, М – мелкозернистый, ОМ - особомелкозернистый). По сравнению с другими вольфрамсодержащими твердыми сплавами они характеризуются

наибольшими: пределом прочности на изгиб и вязкостью; но наименьшими: температуростойкостью и твердостью. Поэтому, вольфрамовые твердые сплавы рекомендуются для обработки чугуна, цветных сплавов и труднообрабатываемых материалов с небольшими скоростями резания. В группу вольфрамо-титановых твердых сплавов входят: Т30К4; Т15К6; Т14К8; Т5К10; Т5К12 (Т – карбид титана, число после «Т» - процентное содержание карбида титана, К – кобальт, число после «К» - процентное содержание кобальта, остальное - карбиды вольфрама). Эти сплавы характеризуются наибольшими: твердостью, температуростойкостью и износостойкостью; но менее прочны, чем сплавы группы «ВК». Поэтому они рекомендуются для обработки сталей. В группу вольфрамо-титано-танталовых твердых сплавов входят: ТТ7К12; ТТ8К6; ТТ30К4; ТТ20К9 (ТТ – карбиды титана и тантала, число после «ТТ» суммарное процентное содержание карбидов титана и тантала, К – кобальт, число после «К» - процентное содержание кобальта, остальное - карбиды вольфрама.). Эти сплавы, по своим показателям, занимают промежуточное место между сплавами групп «ВК» и «ТК». Поэтому, они очень эффективны при черновой обработке сталей и чугунов, при строгании и фрезеровании. В группу безвольфрамовых твердых сплавов входят: КНТ-16 и ТН-20 (Т-карбид титана, Н-никель, КН - карбонитрид титана, число – суммарное процентное содержание никеля и молибдена, остальное – карбид титана или карбонитрид титана). Эти сплавы рекомендуются для полужесткого и жесткого точения и фрезерования чугуна, углеродистых сталей и цветных сплавов.

Минералокерамика – инструментальный материал на основе окиси алюминия, обладающий большими, чем у твердых сплавов, твердостью и температуростойкостью, но меньшей ударной вязкостью. Поэтому, их используют только для чистовой обточки и расточки деталей из высокопрочных чугунов, закаленных сталей и для резания неметаллических материалов со скоростями до 200 м/мин. Различают: оксидную (белую), оксидно-карбидную, оксидно-нитридную керамику и керметы. Оксидная

керамика полностью состоит из окиси алюминия (марки: BO13; ВШ-75). Её рекомендуют для чистового и получистового точения нетермообработанных сталей, серых и ковких чугунов твердостью менее HB 400. Оксидно-карбидная керамика, кроме окиси алюминия, имеет в своем составе легирующие добавки карбидов хрома, титана, вольфрама и молибдена (B3; BOK60; BOK63). Её рекомендуют для чистового и получистового точения и фрезерования закаленных сталей, отбеленных и серых чугунов, нержавеющей сталей. Оксидно-нитридная керамика состоит из нитридов кремния и тугоплавких материалов, включая и окись алюминия (силинит-Р, ОНТ-20). Эта керамика позволяет заменить вольфрамсодержащие твердые сплавы при получистовом и чистовом точении различных материалов. При точении закаленных сталей качество обработки соизмеримо со шлифованием. Керметы состоят из окиси алюминия, химически связанной металлами (железо, никель, титан, цирконий, хром или молибден) (B3, B4). Керметы рекомендуются для получистового и чистового точения хромоникельмолибденовых сталей твердостью *HRC* 50...55 со скоростью резания 110...200 м/мин.

При резании металлов применяют: синтетические алмазы и материалы на основе кубического нитрида бора (композиты). Алмаз обладает наибольшей, из всех известных материалов, твердостью, малыми коэффициентами линейного расширения и трения. Но, он обладает низкой прочностью на изгиб и ударной вязкостью. При 750°С алмаз растворяется в железе, что препятствует его применению при обработке сплавов, содержащих железо. Балласы (АБС) применяются для обработки деталей из стеклопластика со скоростями резания 350...450 м/мин. Карбонадо (АСПК) применяется для обработки алюминиевых и медных сплавов. Композиты: синтетический материал, по твердости, не уступающий алмазу, превосходящий его по температуростойкости, и инертный к железу. Выпускаются следующие марки: композит 01 (эльбор-Р); композит 02 (белбор); композит 05 и 5И (исмит); композит 09 (ПТНБ-ИК); композит 10 (гексагонит-р). Основная

область применения композитов: чистовое и тонкое точения и фрезерования закаленных сталей, со скоростями резания 60...120 м/мин; серых и высокопрочных чугунов - 400-1200 м/мин; твердые сплавы (группы «ВК») – 8...12 м/мин.

#### ***15.4. Общие сведения о металлорежущих станках***

Современные металлорежущие станки это совершенные рабочие машины, использующие механические, электрические, электронные, пневматические, гидравлические системы для осуществления требуемых движений и управления технологическим циклом. Станкостроение призвано обеспечить современное производство машинами, обеспечивающими повышение точности, производительности и надежности обработки заготовок деталей машин.

По технологическому назначению, различают станки токарной, фрезерной, сверлильной и т.д. групп. По степени универсальности, различают: станки универсальные; широкого применения; специализированные и специальные. Универсальные станки предназначены для выполнения разнообразных работ, используя различные заготовки. Станки широкого назначения предназначены для выполнения определенных работ, используя заготовки определенных наименований. Специализированные станки предназначены для обработки заготовок одного наименования, но разных размеров (например: обработка зубчатого венца на зубофрезерном станке). Специальные станки выполняют вполне определенный вид работ на одной определенной заготовке. По степени автоматизации, различают станки с ручным управлением, полуавтоматы, автоматы, станки с программным управлением. По числу главных рабочих органов, различают одно и многошпиндельные станки, одно и многопозиционные станки и т.д. По точности, различают пять классов точности станков: «Н» - нормальный; «П» - повышенный; «В» - высокий; «А» - особо высокой точности; «С» - особо точные станки.

В Российском машиностроении принята Единая система условных обозначений станков, разработанная в ЭНИМС. В соответствии с этой системой, каждому станку присваивается определенный шифр. Первые две цифры шифра определяют группу и тип станка. Буква на втором или третьем месте позволяет различить станки одного типоразмера, но с разными техническими характеристиками. Третья или четвертая цифра показывают условный типоразмер станка. Последняя буква указывает на различные модификации станков одной базовой модели. Все металлорежущие станки разбиты на 10 групп, а каждая группа – на 10 типов. Ниже: № и название группы указаны курсивом, а № и название типа указаны в скобках. *Группа 0 – резервная. Группа 1 – токарные станки* (0- специализированные автоматы и полуавтоматы; 1- одношпиндельные автоматы и полуавтоматы, 2- многошпиндельные автоматы и полуавтоматы; 3 - револьверные; 4 - сверлильно-отрезные; 5 - карусельные; 6 -токарные и лобовые; 7 - многорезцовые; 8 - специализированные; 9 - разные токарные). *Группа 2 – сверлильные и расточные станки* (0 - резервный; 1 - вертикально-сверлильные; 2 - одношпиндельные полуавтоматы; 3 - многошпиндельные полуавтоматы; 4 - координатно-расточные; 5 – радиально-сверлильные; 6 – горизонтально-расточные; 7 – алмазно - расточные; 8 – горизонтально-сверлильные; 9 - разные сверлильные). *Группа 3 – шлифовальные и доводочные станки* (0 - резервная; 1 – круглошлифовальные; 2 – внутришлифовальные; 3 – обдирочные шлифовальные; 4 – специализированные шлифовальные; 5 – резервная; 6 – заточные; 7 – плоскошлифовальные; 8 – притирочные и полировочные; 9 – разные, работающие абразивом). *Группа 4 – комбинированные станки. Группа 5 – зубо и резьбообрабатывающие станки* (0 – резьбонарезные; 1 – зубострогальные для цилиндрических колес; 2 – зуборезные для конических колес; 3 - зубофрезерные; 4 – для нарезания червячных пар; 5 – для обработки торцов зубьев; 6 – резьбофрезерные; 7 – зубоотделочные и поверочные; 8 – зубо и резьбошлифовальные; 9 – разные зубо и

резьбообрабатывающие станки). *Группа 6 – фрезерные станки* (0 – резервная; 1 – вертикальные консольные; 2 – непрерывного действия; 3 – резервная; 4 – копировальные и гравировальные; 5 – вертикальные бесконсольные; 6 – продольные; 7 – консольные широкоуниверсальные; 8 – горизонтальные консольные; 9 – разные фрезерные). *Группа 7 – строгальные, долбежные, протяжные станки* (0 – резервная; 1 – продольно-строгальные одностоечные; 2 – продольно-строгальные двухстоечные; 3 – поперечно-строгальные; 4 – долбежные; 5 – протяжные горизонтальные; 6 – резервная; 7 – протяжные вертикальные; 8 – резервная; 9 – разные строгальные). *Группа 8 – разрезные станки* (0 – резервная; 1 – разрезные, работающие резцом; 2 – разрезные, работающие абразивным кругом; 3 – разрезные, работающие гладким диском; 4 – правильно-отрезные; 5 – пилы ленточные; 6 – пилы дисковые; 7 – пилы ножовочные). *Группа 9 – разные станки* (1 – опиловочные; 2 – пилонасекательные; 3 – правильно и бесцентрово-обдирочные; 4 – балансировочные; 5 – для испытания сверл и шлифовальных кругов; 6 – делительные машины). Условный типоразмер станка обычно показывает наибольший размер обрабатываемой заготовки. Например: универсальный токарно-винторезный станок мод. 16К20 – «20» - высота центров, т.е. расстояние от оси вращения заготовки до направляющих, 200 мм; вертикально - сверлильный станок мод. 2Н135 – «35» - наибольший диаметр сверления – 35 мм. Шифр станков с ЧПУ снабжен дополнительным буквенно-числовым шифром (Ф – оснащение ЧПУ, далее, обозначается конкретная система ЧПУ). Например: 16К20Ф3С32 – 1- станок токарной группы, 6 - винторезный, К – модернизированный, 20 – высота центров 200 мм, Ф – оснащен ЧПУ, 3 – управление тремя координатными движениями, С32 – система ЧПУ.

Тенденция применения принципов крупносерийного производства при изготовлении деталей мелкими и средними сериями требует применения станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Управление рабочим циклом станка с помощью микропроцессоров позволяет превратить станок в

т.н. станочный модуль. Станочный модуль (единая система «станок – промышленный робот - тактовый стол») обеспечивает сочетание гибкости (возможность быстрой переналадки станка на изготовление деталей нескольких типоразмеров) и универсальности (возможность обработки различных типов заготовок) с высоким уровнем автоматизации обработки. Объединение станочных модулей различного технологического назначения в единую систему с общим управлением технологическим циклом от ЭВМ позволяет получить гибкую производственную систему.

### ***15.5. Автоматизация производства в механообрабатывающих цехах***

Автоматизация производства – применение технических средств, экономико-математических методов и систем управления, освобождающих человека частично или полностью от непосредственного участия в процессах преобразования заготовки в деталь (готовое изделие). Цель автоматизации – повышение производительности и эффективности труда, улучшение качества продукции, устранение человека от работы в условиях опасных для здоровья.

Автомат – станок, у которого все основные и вспомогательные движения (в том числе и возобновление цикла работы) осуществляются без участия оператора. Полуавтомат - рабочая машина, которая работает по автоматическому циклу, но для повторения цикла обработки (чаще всего: для снятия детали и установки заготовки) требуется вмешательство оператора. В работу автомата заложены следующие принципы обработки: Одинарный – в обработке заготовки участвует только один режущий инструмент.

Параллельный – в обработке заготовки одновременно участвуют несколько инструментов, работающих одновременно. Последовательный - в обработке заготовки одновременно участвуют несколько инструментов, вступающих в работу последовательно, один за другим. Параллельно - последовательный – в обработке участвуют несколько групп инструментов, инструменты одной группы работают параллельно, а группы вступают в работу последовательно. Непрерывный – в обработке заготовки (группы заготовок) участвует группа

инструментов при непрерывной подаче заготовок. Объединение станков – автоматов в единую систему, расставленную по ходу выполнения технологического процесса преобразования заготовки в готовую деталь (механическая обработка заготовки, межоперационное транспортирование и накопление заготовок, загрузка – разгрузка станков, автоматический контроль хода выполнения операций ...) позволяет получить автоматическую линию.

Современное машиностроение характеризуется быстрой сменяемостью объектов производства. В этих условиях актуально построение гибкого автоматизированного производства (ГАП) как в крупно так и мелкосерийном производстве. Основой ГАП является применение станков с числовым программным управлением оснащенных магазином режущих инструментов с автооператором (автоматическая рука) для автоматической замены инструмента, т.е. многооперационный станок – обрабатывающий центр (ОЦ). Применение ОЦ позволяет последовательно выполнять большое число разных этапов обработки различными инструментами на одном рабочем месте без снятия заготовки со станка. В магазинах современных обрабатывающих центров можно разместить до 300 различных инструментов. Поэтому появилась возможность обрабатывать с четырех – пяти сторон сложные корпусные детали, т.е. на одном рабочем месте превратить заготовку в готовую деталь.

Общая компоновка обрабатывающего центра показана на [рис. 15.7](#).

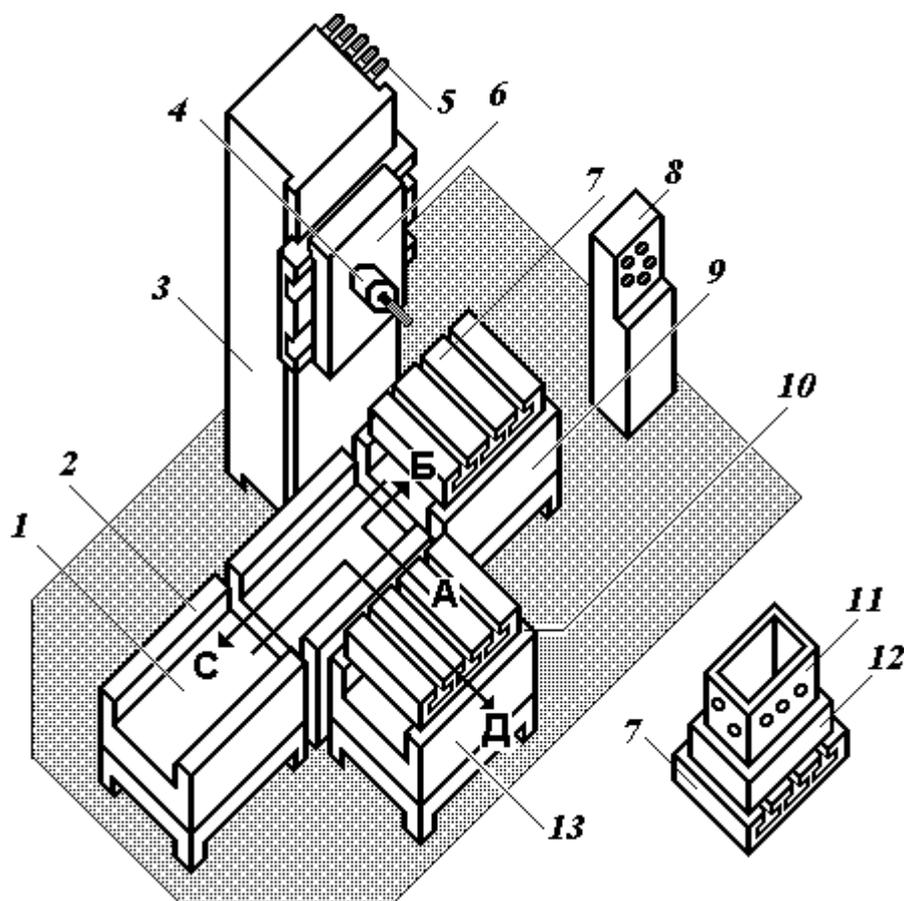


Рис. 15.7. Обрабатывающий центр: 1 – позиция ожидания; 2 – направляющие; 3 – колонна; 4 – шпиндель; 5 – магазин режущих инструментов; 6 – шпиндельная бабка; 7 – стол; 8 – устройства программирования и управления; 9 – рабочая позиция; 10 – загрузочно-разгрузочная позиция; 11 – заготовка; 12 – приспособление – спутник; 13 – тумба; А, Б, С, Д – направления перемещения заготовки и детали.

В комплект обрабатывающего центра входят: вертикальная колонна 3 со шпиндельной бабкой 6, автооператором и магазином режущих инструментов 5, несколько транспортных тумб 13 снабженных транспортером и направляющими 2 необходимых для перемещения стола 7. заготовка 11 устанавливается или непосредственно на столе или в приспособлении – спутнике 12. Стол с заготовкой устанавливается на загрузочной позиции 10 и по команде с устройства управления 8 перемещается по стрелке А-Б на рабочую позицию 9. Рабочая позиция снабжена дискретным поворотным

устройством для поворота стола и заготовки на требуемый угол. По команде устройства управления, автооператор вставляет в шпиндель 4 требуемый режущий инструмент, задает частоту вращения шпинделя и перемещает инструментальную бабку по вертикальным и горизонтальным направляющим колонны. По окончании обработки, стол с обработанной деталью перемещается на позицию ожидания 1 (по стрелке Б-С), а в зону обработки подается новая заготовка. Как только освободится позиция 10, на нее перемещается обработанная деталь (по стрелке С-Д).

### ***15.6. Лезвийная обработка деталей машин***

В лезвийной обработке (зависимости от вида и направления движений резания, вида обработанной поверхности) можно выделить следующие технологические методы: точение, строгание, сверление, фрезерование, протягивание.

#### **Точение**

Точение – лезвийная обработка резанием (ЛОР) цилиндрических и торцевых поверхностей; главное движение – вращательное, придается заготовке или режущему инструменту; движение подачи - прямолинейное или криволинейное, придается режущему инструменту вдоль, перпендикулярно или под углом к оси вращения. Точением обрабатываются шейки и торцевые поверхности круглых стержней (валов); наружные и внутренние цилиндрические поверхности и торцы дисков; внутренние цилиндрические торцевые поверхности некруглых стержней и корпусных деталей.

В зависимости от вида обработанной поверхности различают: обтачивание (обработка наружных поверхностей) и растачивание (обработка внутренних поверхностей). В зависимости от направления движения подачи различают: продольное точение (рис. 15.8, а) (движение подачи направлено вдоль оси вращения заготовки); поперечное точение (рис. 15.8, б) (движение подачи направлено перпендикулярно оси вращения заготовки); нарезание канавок и отрезание (рис. 15.8, в), точение конусов (движение подачи направлено под

углом к оси вращения заготовки); нарезание винтовых поверхностей (рис. 15.8, з) и точение фасонных поверхностей (рис. 15.8, д).

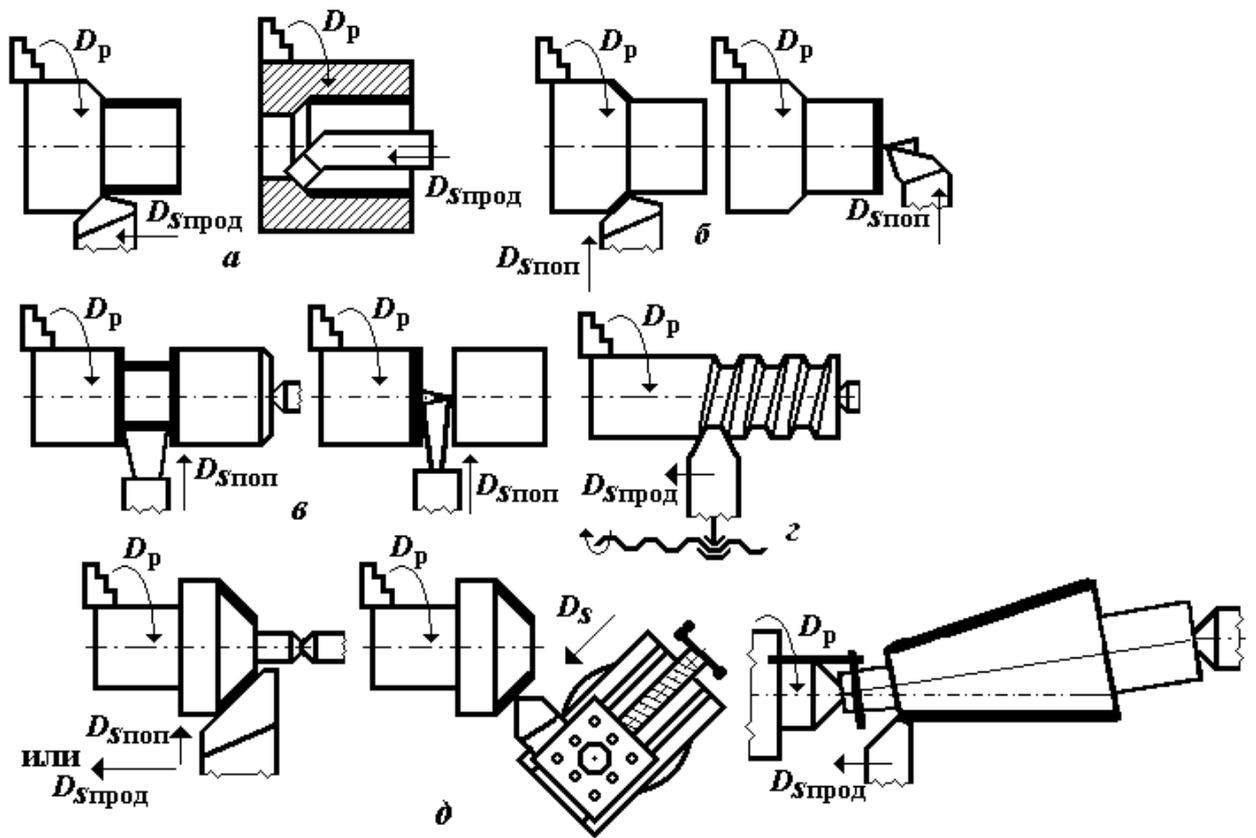


Рис. 15.8. Основные технологические схемы точения:

а – продольное точение; б – поперечное точение; в – нарезание канавки и отрезание; г – нарезание резьбы; д – точение конических поверхностей.

По характеру обработки, различают резцы: для чернового, получистового, чистового точения. По типу инструментального материала и способу его крепления на головке, различают резцы: цельные из углеродистых или из быстрорежущих сталей; с напайной пластинкой из быстрорежущей стали или из твердого сплава; с механическим креплением пластинки твердого сплава или кристалла сверхтвердого материала. По виду пластины твердого сплава, различают резцы; с перетачиваемыми и с неперетачиваемыми пластинами. Характер базирования и закрепления заготовки в рабочих приспособлениях токарных станков зависит от типа станка, вида обрабатываемой поверхности,

типа заготовки (вал, диск, кольцо, некруглый стержень ...), отношения длины заготовки к ее диаметру, требуемой точности обработки и т.д.

При обработке круглых стержней на универсальных токарных станках чаще всего применяется трех, четырех или шести кулачковые патроны.

Основные станки токарной группы показаны на **рис. 15.9**.

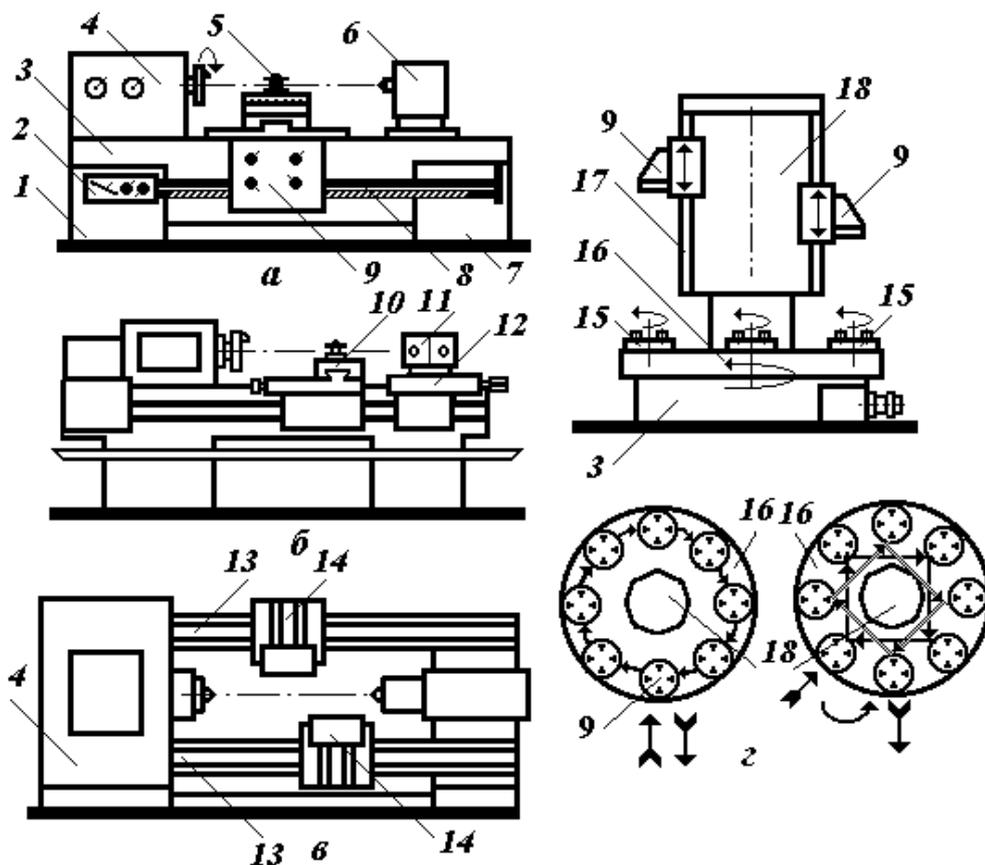


Рис. 15.9. Станки токарной группы: а - универсальный токарно-винторезный станок; б - патронный токарно-револьверный полуавтомат; в - токарный гидрокопировальный автомат; г - вертикальный многшпиндельный полуавтомат; 1, 7 – передняя и задняя тумба; 2 – коробка подач; 3 – станина; 4, 6 - передняя и задняя бабка; 5 – резцедержатель; 8 – ходовой вал; 9 – суппорт; 10 – поперечный суппорт; 11 – револьверная головка; 12 - револьверный суппорт; 13 – траверса; 14 – верхний и нижний суппорт; 15 – шпиндель; 16 – карусель; 17 – направляющие; 18 – центральная колонна;

На универсальном токарно-винторезном станке (**рис. 15.9, а**) обрабатывают детали различных классов (круглые и некруглые стержни, кольца, диски,

корпусные детали ...). Станина 3 станка - массивная базовая чугунная деталь имеет две тумбы: переднюю 1 и заднюю 7. В передней тумбе установлен главный электродвигатель. Верхняя часть станины имеет две пары направляющих для базирования и перемещения подвижных элементов станка. Передняя бабка 4 закреплена на левой части станины. В корпусе передней бабки расположена коробка скоростей и шпиндель. На правом резьбовом конце шпинделя устанавливается технологическая оснастка для базирования и закрепления заготовок. Шпиндель получает вращение (главное движение  $D_p$ ) от главного электродвигателя через клиноременную передачу, систему зубчатых колес и муфт, размещенных на валах коробки скоростей, расположенной внутри передней бабки. Задняя бабка 6 установлена на правой части станины с возможностью перемещения по ее внутренним направляющим. Задняя бабка необходима для повышения жесткости закрепления длинных валов. Внутри задней бабки размещена выдвижная пиноль, в конусное отверстие которой вставляются различные центры. При обработке длинных валов ( $L/D > 4$ ) передний конец заготовки устанавливается в патрон, закрепленный на шпинделе, а задний конец поджимается центром, установленным в пиноли задней бабки. При обработке коротких заготовок, заготовок типа “некруглый стержень”, или корпусных заготовок в конусное отверстие пиноли устанавливается осевой инструмент, что позволяет производить осевую обработку центрального отверстия в заготовке. Движение подачи при этом осуществляется вручную вращением маховика задней бабки. На наружных направляющих станины размещается суппорт 9, состоящий из резцедержателя 5, поворотных, поперечных и продольных салазок. 15. В четырех позиционном резцедержателе 5 устанавливаются режущие инструменты - токарные резцы. Поворотные салазки установлены с возможностью поворота и фиксации вокруг вертикальной оси, что позволяет обрабатывать короткие (до 150 мм) конусные поверхности с большими углами конусности (до  $45^\circ$ ). При обработке длинных конусных поверхностей с малыми углами конусности (до

5°) смещают ось вращения заготовки, перемещая заднюю бабку перпендикулярно направляющим станины. Поперечные салазки позволяют придать режущему инструменту движение подачи ( $D_s$ ) под углом 90° к оси вращения заготовки (поперечная подача). Продольные салазки позволяют придать режущему инструменту движение подачи ( $D_s$ ) вдоль оси вращения заготовки (продольная подача). Движение подачи осуществляется вручную или автоматически. На передней стенке станины закреплена коробка подач, кинематически связанная со шпинделем. Коробка подач передаёт движение на ходовой вал 8 и ходовой винт. Ходовой винт служит для обеспечения автоматической подачи только при нарезании резьбы. Для обеспечения автоматической подачи при других работах служит ходовой вал.

Для обработки партии сложных деталей типа: ступенчатый валик, фланец, кольцо применяют токарно-револьверные станки (рис. 15.9, б). В токарно-револьверном станке несколько режущих инструментов устанавливают в револьверной головке 11, что позволяет сократить время на установку и наладку инструментов. Револьверные станки с многогранной револьверной головкой дополнительно оснащены одним или двумя (передним и задним) револьверными суппортами 12. Все инструменты, работающие с продольным движением подачи, закрепляются в револьверной головке. Все инструменты, работающие с поперечным движением подачи, закрепляются в суппортах.

Обработка ступенчатых валов ведется на многорезцовых токарных полуавтоматах, автоматах или на токарных гидрокопировальных автоматах (рис. 15.9, в). На станине 3 станка установлены: передняя бабка 4 с коробкой скоростей и шпинделем; задняя бабка, верхняя и нижняя траверсы 13. По траверсам перемещаются верхний и нижний суппорты 14. Верхний суппорт имеет только поперечное движение подачи, нижний – только продольное (в гидрокопировальных автоматах суппорт перемещается по копиру, что позволяет обрабатывать сложные ступенчатые или фасонные поверхности). Диски обрабатывают на вертикальных многошпиндельных полуавтоматах (рис. 15.9, г). На станине 3 размещены: центральная колонна 18 и карусель 3.

Карусель установлена с возможностью дискретного или непрерывного поворота вокруг оси колонны. При непрерывном вращении карусели колонна так же синхронно вращается. На карусели установлены шпиндели 15 с кулачковыми патронами. По вертикальным направляющим 17 колонны перемещаются суппорты 9. При дискретном вращении карусели, возможны два исполнения станка: с одинарной индексацией карусели и с двойной индексацией. На станках с одинарной индексацией проводится односторонняя обработка заготовки. На первой позиции проводится загрузка заготовки, далее после каждого поворота карусели обрабатывается группа поверхностей, далее, обработанная деталь возвращается на первую позицию, где снимается со станка. Следовательно, на одном станке одновременно обрабатывается семь заготовок. На станках с двойной индексацией, карусель поворачивается на двойной угловой шаг. Первая позиция загрузочная. Далее, на нечетных позициях ведется обработка заготовки с одной стороны. Полуобработанная заготовка возвращается на первую позицию, где вручную или с помощью автооператора, заготовка переносится на вторую загрузочную позицию и базируется по обработанным поверхностям. На четных позициях заготовка обрабатывается с другой стороны и снимается со станка. Следовательно, на станке ведется полная обработка заготовок с двух сторон.

### Строгание и долбление

Строгание и долбление – ЛОР открытых плоских и фасонных, наружных и внутренних поверхностей; главное движение – прямолинейное, возвратно поступательное, придается режущему инструменту; движение подачи – дискретное, прямолинейное или криволинейное, придается заготовке в конце обратного хода инструмента. При строгании (рис. 15.10, а) главное движение придается инструменту в горизонтальной плоскости. При долблении (рис. 15.10, б) – в вертикальной.

Процесс резания при строгании или долблении – прерывистый и удаление материала происходит только при прямом (рабочем) ходе инструмента. При обратном (холостом) ходе, резец не снимает стружку.

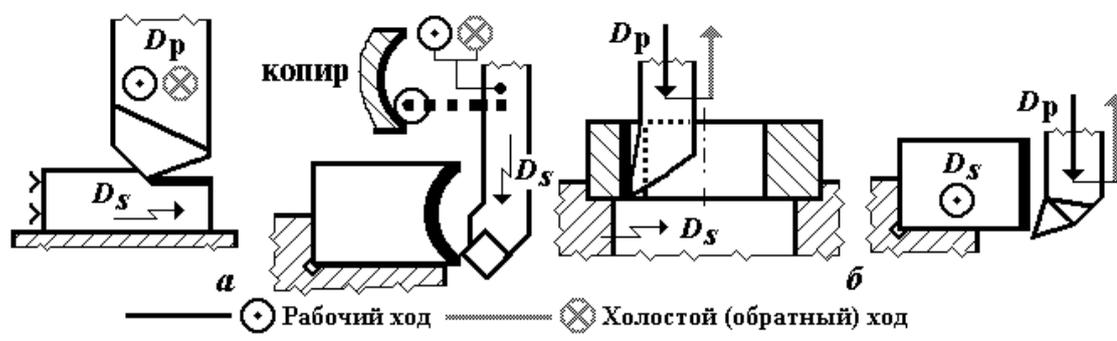


Рис. 15.10. Основные технологические схемы строгания наружных поверхностей: а – строгание; б – долбление.

Холостой ход обеспечивает охлаждение инструмента. Прерывистый процесс резания определяет высокие динамические нагрузки на технологическую систему СПИД, ударное врезание инструмента в материал заготовки.

Поэтому при строгании не применяют высоких скоростей резания и применяют массивные быстрорежущие инструменты. Наличие холостых ходов определяет низкую производительность обработки. При нормировании процесса задают: скорость движения резания ( $V_p$ ), скорость обратного (холостого) хода ( $V_{xx}$ ) и скорость движения подачи: минутную ( $S_{мин}$ ) и на 1 двойной ход ползуна станка ( $S_{2x}$ ).

Режущий строгальный и долбежный инструмент, изготавливается двух типов: резцы строгальные (проходные, прорезные и фасонные); долбяки (проходные, для шпоночных пазов и специальные).

Обрабатываемые заготовки небольших размеров и простых форм устанавливают на станке в тисках. Крупные заготовки и заготовки сложных форм устанавливают непосредственно на столе, имеющем Т-образные пазы, и закрепляются: прихватами, призматическими или клиновыми подкладками; упорами - прижимами. Заготовки с цилиндрическими базирующими элементами устанавливают на призмы.

Поперечно-строгальные станки (рис. 15.11, а) применяются в единичном и серийном производстве и во вспомогательных цехах машиностроительных заводов. На них обрабатываются заготовки с длиной обработки не более 1000 мм. На фундаментной плите 6 установлена станина 7. По вертикальным направляющим станины перемещается траверса 5 с горизонтальными направляющими, на которых, консольно, установлен стол 3. На столе устанавливается заготовка или рабочие приспособления. Вертикальные перемещения стола осуществляются домкратом 8. На верхнем торце станины выполнены горизонтальные направляющие, по которым перемещается ползун 4. На переднем торце ползуна выполнены вертикальные направляющие, по которым перемещается вертикальный суппорт 2 с качающейся плитой 1 и резцедержателем. Вертикальный суппорт можно поворачивать вокруг горизонтальной оси для строгания наклонных плоскостей.

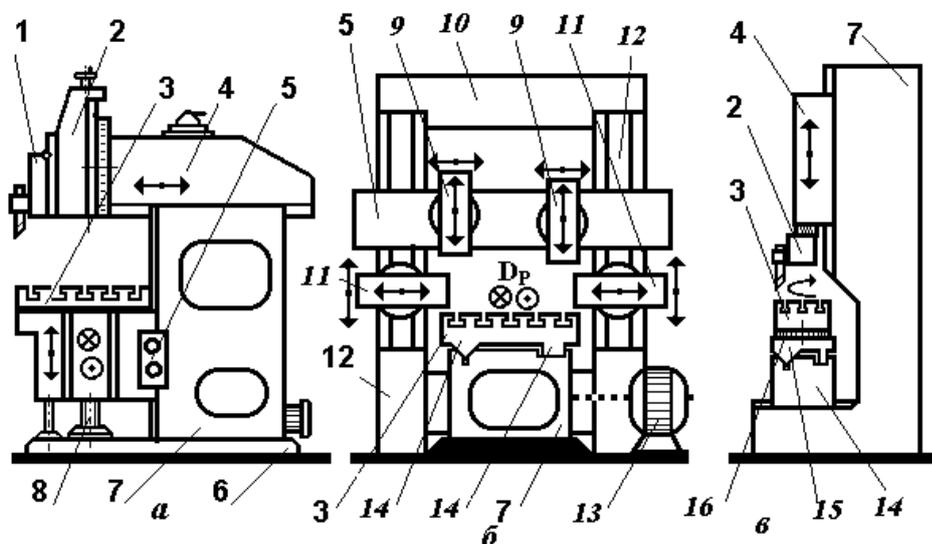


Рис. 15.11. Станки строгальной группы: а – поперечно-строгальный станок; б – продольно-строгальный станок; в – долбежный станок: 1 – качающаяся плита; 2 – суппорт; 3 – стол; 4 – ползун; 5 – траверса; 6 – фундаментная плита; 7 – станина; 8 – домкрат; 9 – вертикальные суппорты; 10 – поперечина; 11 – боковые суппорты; 12 – стойки; 13 – главный электродвигатель; 14 – направляющие; 14 – поперечные салазки; 15 –

продольные салазки; 16 – поворотные салазки; стрелками указаны перемещения элементов станка.

На продольно - строгальных станках (рис. 15.11, б) обрабатывают крупные, тяжелые заготовки. Ход стола у этих станков 1,5...12 м., ширина строгания 0,7...4м. Продольно-строгальные станки подразделяются на одно и двухстоечные. Вдоль станины 7 двухстоечного станка расположены направляющие 14 (левая – V-образная, правая - плоская). По направляющим перемещается стол 3, на котором устанавливают заготовки. Стол приводится в движение от собственного электродвигателя постоянного тока 13, что позволяет бесступенчато регулировать скорости прямого и обратного ходов. Портал станка состоит из: левой и правой стоек 12. Стойки соединены вверху поперечиной 10. По вертикальным направляющим стоек перемещается траверса 5 и каретки боковых суппортов 11. На траверсе размещены: левый и правый вертикальные суппорты 9. Каждый суппорт снабжен собственной коробкой подач. Все суппорты могут перемещаться в вертикальном и горизонтальном направлениях и могут быть повернуты в вертикальной плоскости на угол до 60°. На горизонтальных направляющих станины 7 долбежного станка (рис. 15.11, в) установлены поперечные 14, продольные 15 и поворотные 16 салазки с рабочим столом 3. По вертикальным направляющим станины перемещается ползун 4 с суппортом 2 и резцедержателем.

### Протягивание

Протягивание – ЛОР открытых, плоских и фасонных, внутренних и наружных поверхностей с линейной образующей; главное движение - прямолинейное или круговое, придается режущему инструменту; движение подачи отсутствует, возобновление процесса резания обеспечивается подъемом на зуб ( $S_z$ ). Подъем на зуб – превышение по высоте или по ширине размера режущей части последующих зубьев над предыдущими. По характеру движения режущего инструмента различают: протягивание (рис.

15.12, а) – инструмент вытягивается из отверстия и прошивание (рис. 15.12, б) – инструмент проталкивается в отверстие.

Протягивание – высокопроизводительный процесс обработки наружных и внутренних поверхностей, обеспечивающий высокую точность формы и размеров обработанной поверхности. При протягивании профиль обработанной поверхности копируется профилем режущих зубьев. Поэтому протяжки – узкоспециальный инструмент, применяемый для обработки поверхностей со строго заданными формой и размерами. По характеру обработанной поверхности различают внутренние и наружные протяжки. Внутренние протяжки предназначены для обработки круглых, квадратных, многогранных и шлицевых отверстий, а также шпоночных и других фигурных пазов. Наружные протяжки предназначены для обработки наружных поверхностей, пазов, уступов.

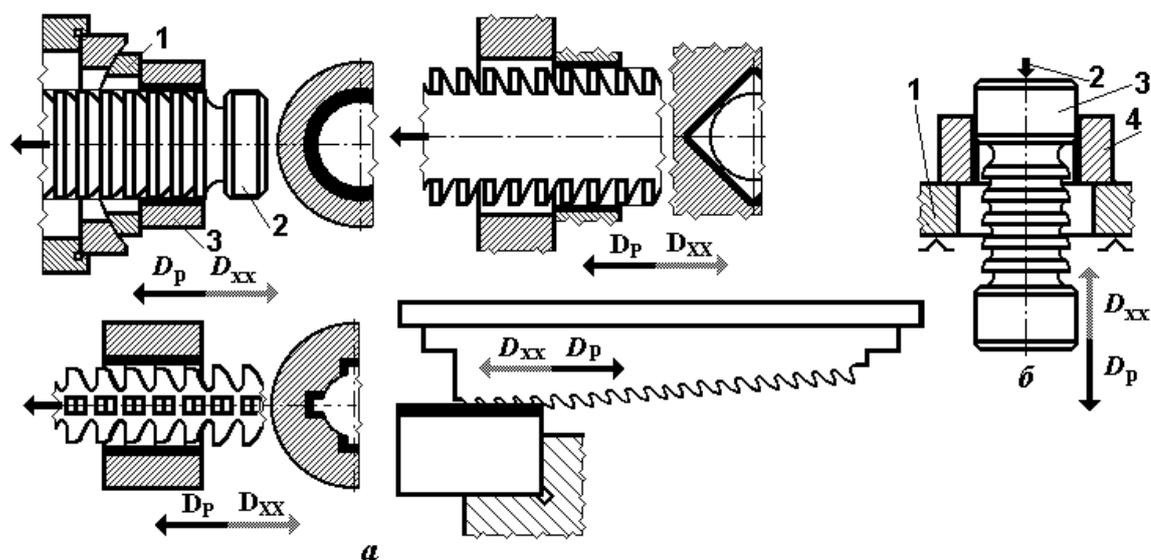


Рис. 15.12. Основные технологические схемы протягивания: а – протягивание: 1 – плавающая опора; 2 – протяжка; 3 – заготовка; б – прошивание: 1 – стол; 2 – шток поршня; 3 – прошивка; 4 – заготовка;  $D_p$  – движение резания;  $D_{xx}$  – обратный ход.

Цилиндрические отверстия обрабатывают протяжками или прошивками после сверления, растачивания, зенкерования, а так же отверстий, полученных на стадии заготовительных операций. При обработке отверстия

цилиндрической протяжкой 2 (рис. 15.12, а) заготовку 3 устанавливают на сферическую опору 1 (плавающая протяжка) или на плоскую опору. При установке на сферическую опору заготовка самоустанавливается по оси протяжки, но торец может получиться неперпендикулярным оси отверстия. Такую установку применяют, если торец заготовки обрабатывается после протягивания. При установке на плоскую опору, торец перпендикулярен оси отверстия, но возможна поломка протяжки из-за разницы припусков в диаметральной плоскости протяжки. При обработке многогранных или шлицевых отверстий применяют специальные многогранные и шлицевые протяжки.

При прошивании инструмент - прошивка 3 (рис. 15.12, б) проталкивается в отверстие заготовки 4 поршнем 2 прессы. Заготовка устанавливается на стол 1 прессы. Так как прошивка работает на сжатие, то длина ее ограничена ( $L/D \leq 15$ ). Поэтому прошивки, обычно, применяются для полустойковой правки цилиндрических отверстий.

Для выбора станка необходимо знать осевую силу резания ( $P_z$ ). Для круглых протяжек осевая сила резания равна:  $P_z = C_p S_z^x D Z K_1 K_2 K_3 K_4$ . Для шпоночных и шлицевых протяжек сила резания равна:

$P_z = C_p S_z^x n Z K_1 K_2 K_3 K_4$ , где:  $C_p$  – коэффициент, характеризующий материал заготовки и условия обработки;  $D$  – диаметр обработанного отверстия;  $n$  – число шлицев;  $Z$  – число одновременно работающих зубьев;  $K_1 \dots K_4$  – коэффициенты учитывающие, соответственно, влияние: переднего и заднего углов; износа инструмента.

Протягивание – процесс прерывистый. Необходимо возвратно – поступательное движение исполнительного механизма главного движения. Прямой ход – рабочее движение, обратный ход – холостой ход. Инерция масс исполнительного механизма главного движения не позволяет работать на высоких скоростях резания. Обычно принимают скорость резания в пределах от 8 до 15 м/мин.

Протяжные станки отличаются простотой конструкции и большой жесткостью, что объясняется тем, что в станках отсутствует цепь движения подачи. Основной характеристикой протяжного станка является тяговое усилие на штоке и ход штока рабочего цилиндра.

Горизонтально – протяжной станок (рис. 15.13, а) – предназначен для протягивания внутренних поверхностей. На станине 1 размещены: гидроцилиндр 3 и насосная станция 2. На переднем конце штока 4 установлен захват 5 с кареткой 7. Каретка перемещается по направляющим станины. Протяжка устанавливается в захвате и протаскивается сквозь отверстие в заготовке. Заготовка при этом опирается торцом на опорную поверхность кронштейна 6. Поступательное движение протяжке сообщается до тех пор, пока она не выйдет из отверстия в заготовке. Заготовка падает в поддон 8. Протяжка возвращается в исходное положение и процесс повторяется.

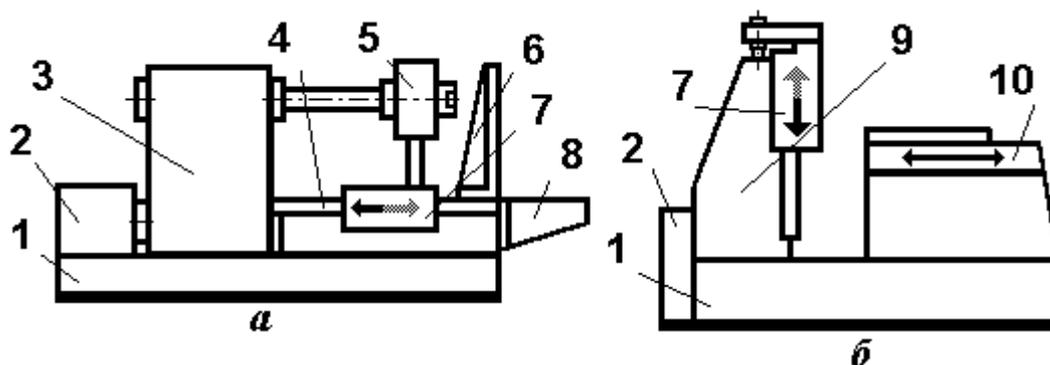


Рис. 15.13. Станки протяжной группы: а – горизонтально протяжной; б – вертикально протяжной: 1 – станина; 2 – насосная станция; 3 – гидроцилиндр; 4 – шток; 5 – захват; 6 – кронштейн; 7 – каретка; 8 – поддон; 9 – вертикальная колонна; 10 – стол; стрелками указано перемещение элементов станка.

Вертикально – протяжной станок (рис. 15.13, б) – предназначен для обработки наружных поверхностей. На станине 1 установлена вертикальная колонна 9 с рабочим гидроцилиндром, насосной станцией 2 и кареткой 7. На

левом конце станины установлен стол 10. Заготовку устанавливают в рабочем приспособлении.

### Сверление

Сверление – ЛОР цилиндрических отверстий с прямолинейной образующей; главное движение – вращательное, придается инструменту; движение подачи – прямолинейное, придается инструменту вдоль оси его вращения.

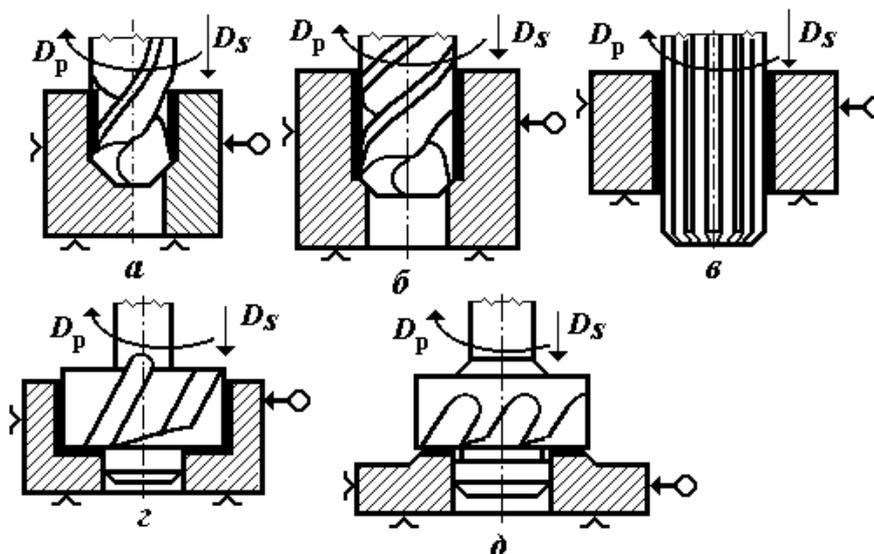


Рис. 15.14. Основные технологические схемы сверления: а – сверление и рассверливание; б – зенкерование; в – развертывание; г - зенкование; д – цекование.

В зависимости от вида обработанной и обрабатываемой поверхностей и в зависимости от качества обработанной поверхности различают: сверление и рассверливание (рис. 15.14, а), зенкерование (рис. 15.14, б), развертывание (рис. 15.14, в), зенкование (рис. 15.14, г), и цекование (рис. 15.14, д).

Сверлением получают сквозные и глухие отверстия. Рассверливанием увеличивают диаметр ранее просверленного отверстия. Зенкерованием также увеличивают диаметр отверстия, но, по сравнению с рассверливанием, зенкерование позволяет получить большую точность и производительность обработки. Зенкерованием можно обрабатывать отверстия, полученные в заготовке литьем или давлением. Развертывание – чистовая операция,

обеспечивающая высокую точность отверстия. Развертыванием обрабатывают цилиндрические и конические отверстия после зенкерования или растачивания. Зенкованием обрабатывают цилиндрические и конические углубления под головки болтов и винтов. Для обеспечения перпендикулярности и соосности обработанной поверхности основному отверстию, режущий инструмент (зенковку) снабжают направляющим цилиндром. Цекованием обрабатывают торцевые опорные плоскости для головок болтов, винтов и гаек. Перпендикулярность обработанной торцевой поверхности основному отверстию обеспечивает направляющий цилиндр режущего инструмента (цековки).

Процесс сверления протекает в более тяжелых условиях, чем точение. В процессе резания затруднен отвод стружки и подача охлаждающей жидкости в зону резания. Выделяемое при резании тепло, в основном, поглощается режущим инструментом и заготовкой. Особенно это заметно при сверлении отверстий в материалах с низким коэффициентом теплопередачи (пластмассы, бетон ...). При обработке этих материалов до 95% выделяемого тепла поглощается сверлом, и если не использовать охлаждение, то происходит оплавление режущих кромок сверла. Скорость резания по сечению сверла не постоянна, уменьшается от периферии сверла к его центру. Следовательно, по сравнению с точением, при сверлении увеличены: деформации срезаемого слоя и стружки; трение (пары: сверло – заготовка; стружка – сверло; стружка - заготовка).

За скорость резания, при сверлении, принимают окружную скорость наиболее удаленной точки режущего лезвия. При назначении скорости движения подачи различают подачу минутную ( $S_M$ ); подачу на оборот ( $S_O$ ) и подачу на зуб ( $S_Z$ ). Глубина резания: при сверлении отверстия в сплошном материале равна половине диаметра сверла; при рассверливании, зенкерования и развертывании – половине разницы между диаметрами обработанного отверстия и заготовки.  $V_p = \pi D n / 1000$ ;  $S_M = n S_O = n Z S_Z$ ;  $t_c = D/2$ ;

$t_p = (D - d)/2$ , где:  $D$ - наружный диаметр сверла (диаметр обрабатываемого отверстия), в мм;  $n$  - частота вращения шпинделя станка, в об/мин;  $d$  – диаметр отверстия в заготовке, в мм;  $t_c$  – глубина резания при сверлении, в мм;  $t_p$  - глубина резания при рассверливании, зенкеровании и развертывании, в мм.

В единичном и мелкосерийном производстве применяются вертикально – сверлильные станки (рис. 15.15, а). На фундаментной плите 9 станка смонтирована колонна 8. По вертикальным направляющим колонны перемещаются стол 2 и сверлильная головка 4. Установочные перемещения стола осуществляются вручную с помощью винтового домкрата 1. На верхней плоскости стола устанавливаются рабочие приспособления или заготовка. Установочные вертикальные перемещения сверлильной головки осуществляются вручную за счет системы противовесов 7, прикрепленных к сверлильной головке тросом, перекинутым через блок 6. Вращательное движение инструменту передается от электродвигателя 5, через коробку скоростей и шпиндель 3. Механизмы главного движения и движения подачи размещены внутри сверлильной головки.

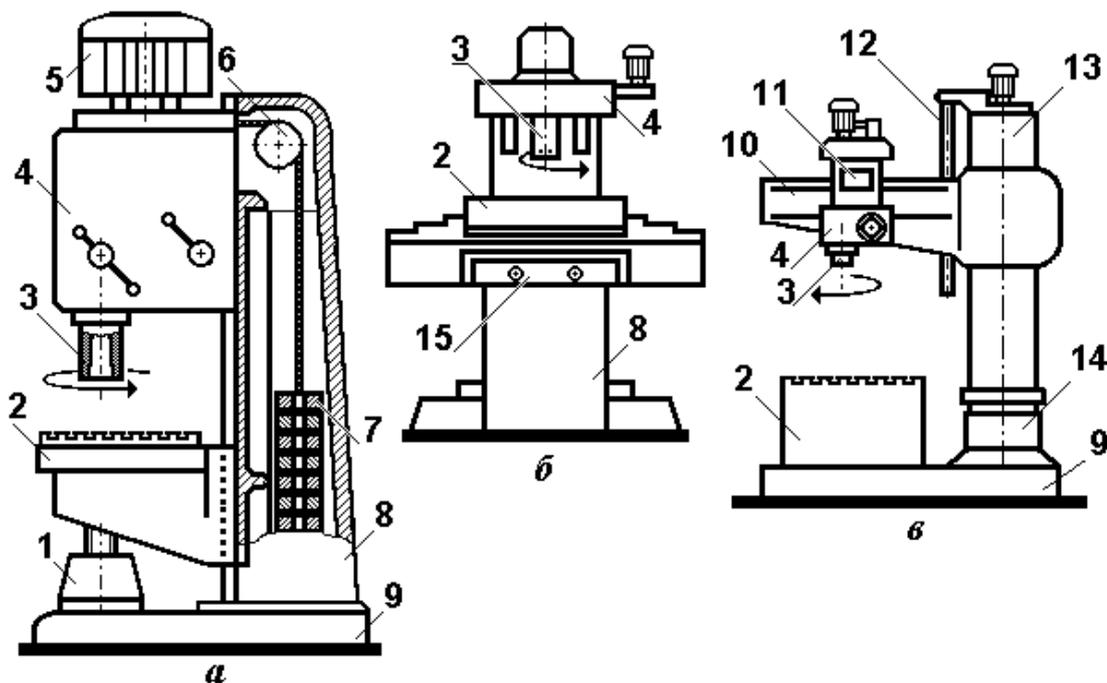


Рис. 15.15. Станки сверлильной группы: а – вертикально-сверлильный станок; б - вертикально-сверлильный станок с ЧПУ; в – радиально-

сверлильный станок: 1 – домкрат; 2 – стол; 3 – шпиндель; 4 – сверлильная головка; 5 – электродвигатель; 6 – блок; 7 – противовесы; 8 – вертикальная станина (колонна); 9 – фундаментная плита; 10 – траверса; 11 – коробка скоростей; 12 – винтовой механизм; 13 – гильза; 14 – тумба; 15 – салазки.

В индивидуальном и серийном производстве широко применяют вертикально-сверлильные станки с числовым программным управлением (ЧПУ) (рис. 15.15, б.). По вертикальным направляющим станины 8 перемещаются салазки 15. Стол 2 перемещается по горизонтальным направляющим салазок. Перемещения стола и салазок осуществляются по программе, что обеспечивает точное перемещение заготовки относительно режущего инструмента. По направляющим вертикальной части станины (стойки) перемещается сверлильная головка 4 со шпинделями 3. Внутри сверлильной головки размещены механизмы главного движения и движения подачи.

При последовательной обработке нескольких отверстий в массивных или крупногабаритных заготовках применение вертикально-сверлильных станков крайне неудобно т.к. практически невозможно точно совместить ось вращения режущего инструмента с осью обрабатываемого отверстия.

Поэтому, при обработке таких заготовок применяются радиально-сверлильные станки (рис. 15.15, в). При работе на радиально-сверлильных станках заготовка остается неподвижной, а шпиндель с инструментом перемещается относительно заготовки и может устанавливаться в требуемой точке горизонтальной плоскости. На фундаментной плите 9 закреплена тумба 14 с вертикальной колонной. На колонне установлена гильза 13. Гильза имеет возможность поворота относительно колонны в горизонтальной плоскости на  $360^\circ$ . Траверса 10 закреплена на гильзе с возможностью вертикального перемещения относительно колонны с помощью винтового механизма 12. На траверсе имеются горизонтальные направляющие, по которым перемещается сверлильная головка 4. Механизм сверлильной

головки состоит из шпинделя 3, коробки скоростей 11 и коробки подачи. Заготовка устанавливается неподвижно на стол 2. Угловые перемещения траверсы и радиальные перемещения сверлильной головки в горизонтальной плоскости позволяют точно установить режущий инструмент относительно оси обрабатываемого отверстия.

### Фрезерование

Фрезерование – ЛОР плоских и фасонных поверхностей с линейной образующей; главное движение – вращательное, придается инструменту; движение подачи – прямолинейное, поступательное, придается заготовке в направлении как вдоль, так и перпендикулярно оси вращения инструмента. На универсальных горизонтально – фрезерных станках (ГФС) (ось вращения инструмента - горизонтальна) и вертикально – фрезерных станках (ВФС) (ось вращения инструмента - вертикальна) обрабатывают: горизонтальные, вертикальные и наклонные плоскости; одновременно несколько плоскостей; уступы и пазы (прямолинейные или фасонные); фасонные поверхности (рис. 15.16).

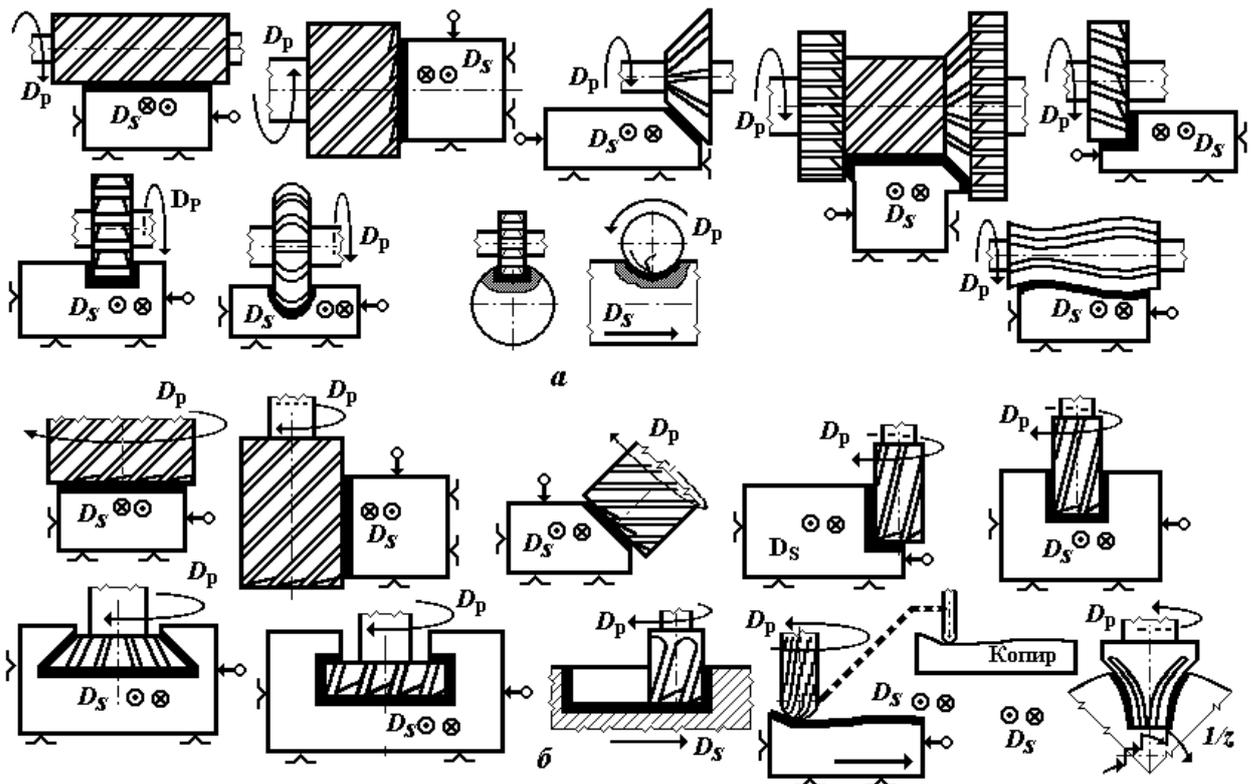


Рис. 15.16. Технологические схемы фрезерования: а – на горизонтально – фрезерных станках; б – на вертикально – фрезерных станках: 1/z – делительный поворот заготовки.

Особенностями процесса фрезерования является прерывистый характер процесса резания каждым зубом фрезы и переменность толщины срезаемого слоя. Каждый зуб фрезы участвует в резании только на определенной части оборота фрезы, остальную часть проходит по воздуху, вхолостую, что обеспечивает охлаждение зуба и дробление стружки.

В процессе работы фреза должна преодолеть суммарные силы резания, действующие на каждый зуб, находящийся в контакте с заготовкой. При фрезеровании цилиндрической прямозубой фрезой равнодействующую силу резания « $P$ » можно разложить на окружную составляющую  $P_z$ , касательную к траектории движения зуба и на радиальную составляющую  $P_y$ , направленную по радиусу. Силу « $P$ » можно  $P_z = C_p \times S_Z^{x_p} \times t^{y_p} \times B \times D_\phi^{q_p}$  так же разложить на вертикальную и горизонтальную составляющие. При фрезеровании цилиндрическими косозубыми фрезами в осевом направлении действует осевая сила, причем, чем больше угол наклона винтовых канавок фрезы, тем больше эта сила. Эта сила может сдвинуть фрезу вдоль оправки. Поэтому часто применяют набор из двух фрез с разнонаправленными зубьями или одну фрезу с разнонаправленными зубьями (шевронную фрезу). В этом случае осевые силы уравниваются друг друга. Окружная сила  $P_z$  производит основную работу резания, по ней определяют эффективную мощность  $N$  и рассчитывают детали и узлы механизма главного движения (коробки скоростей) на прочность. Радиальная сила ( $P_y = (0,6 \dots 0,8) P_z$ ) действует на подшипники шпинделя и изгибает оправку, на которой устанавливается фреза. Осевая сила ( $P_o = (0,35 \dots 0,55) P_z$ ) действует на подшипники шпинделя и механизм поперечной подачи станка. Горизонтальная  $P_r$  и вертикальная  $P_b$  силы действуют на механизмы продольной и вертикальной подачи станка.

К режимам резания при фрезеровании относят: скорость резания; подачу (минутную, на оборот и на зуб); глубину резания и ширину фрезерования « $B$ ». Скорость резания берется, как окружная скорость вращения фрезы.  $V = \pi D_{\phi} n / 1000$ , где:  $D_{\phi}$  – наружный диаметр фрезы в мм;  $n$  – частота вращения шпинделя в мм/об.

В зависимости от соотношения длины фрезы к ее диаметру ( $K=L/D_{\phi}$ ), различают: цилиндрические фрезы ( $K = 0,5 \dots 3$ ); концевые или пальцевые фрезы ( $K \geq 3$ ) и дисковые фрезы ( $K \leq 0,5$ ). В зависимости от расположения главной режущей кромки различают: фрезы с прямым зубом (главная режущая кромка параллельна оси вращения фрезы); косозубые фрезы (главная режущая кромка направлена под углом к оси вращения фрезы); шевронные фрезы (главные режущие кромки соседних зубьев расположены под углом друг к другу). В зависимости от конструктивного исполнения режущей части различают: цельные фрезы (фрезы целиком выполнены из быстрорежущей стали); фрезы с напаянными пластинками инструментального материала; фрезы с механическим креплением пластинок инструментального материала; фрезы сборные (инструментальный материал закреплен на отдельных резцах, вставленных в корпус фрезы). В зависимости от расположения зубьев различают: фрезы односторонние (зубья располагаются только на образующей); фрезы двухсторонние (зубья располагаются на образующей и одном из торцов); фрезы трехсторонние (зубья располагаются на образующей и обоих торцах). В зависимости от формы главной режущей кромки различают: фрезы с прямолинейной режущей кромкой; фрезы с ломанной режущей кромкой (одноугловые и двухугловые); фасонные фрезы (фрезы выпуклые полукруглые и фрезы вогнутые полукруглые); специальные фрезы. Цилиндрические фрезы обычно используются в наборе из двух и более фрез для обработки ступенчатых поверхностей заготовок. Дисковые фрезы используются для обработки различных пазов и для отрезания материала. Концевые фрезы используются для обработки плоскостей, уступов, прямоугольных и призматических пазов;

криволинейных поверхностей. К специальным фрезам относятся: концевые фрезы для получения Т-образных пазов; шпоночные фрезы для получения шпоночных пазов под призматическую или сегментную шпонку; модульные дисковые или концевые фрезы для нарезания зубчатых венцов по методу копирования; червячные фрезы для нарезания зубчатых венцов или шлиц методом обката; резьбовые фрезы.

Для установки, базирования и закрепления заготовок применяются универсальные приспособления (прихваты; угольники; призмы; машинные тиски). При обработке большой партии заготовок проектируются и изготавливаются специальные приспособления. Для периодического, точного поворота заготовки на заданный угол (деление заготовки) применяют механические или оптические делительные головки.

В условиях единичного и мелкосерийного производства широко используются универсальные консольно-фрезерные станки. К ним относятся станки: ГФС без поворотного стола; ГФС с поворотным столом; ВФС. На **рис. 15.17, а** показаны основные узлы ГФС с поворотным столом.

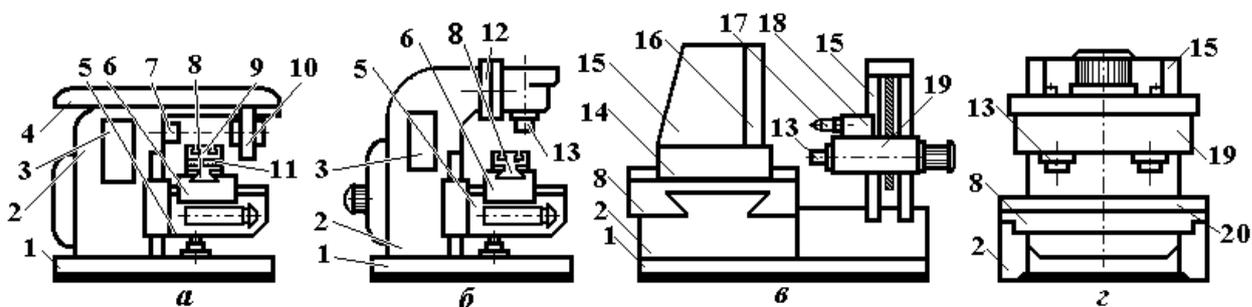


Рис. 15.17. Станки фрезерной группы: а – горизонтально-фрезерный; б – вертикально-фрезерный; в – копировально-фрезерный; г – карусельно-фрезерный; 1 – фундаментная плита; 2 – станина; 3 – коробка скоростей; 4 – хобот; 5 – консоль; 6 – продольные салазки; 7 – шпиндельный узел; 8 – поперечные салазки; 9 – стол; 10 – серьга; 11 – поворотные салазки; 12 – поворотная планшайба; 13 – шпиндель; 14, 16 – стол; 15 – стойка; 17 – щуп; 18 – следящий привод; 19 – фрезерная головка (бабка); 20 – карусель.

На фундаментной плите 1 установлена чугунная станина 2. Внутри станины расположены: отсек для электрооборудования; коробка скоростей 3 и шпиндельный узел 7. По верхним направляющим станины перемещается хобот 4. Хобот может устанавливаться относительно станины с различными размерами вылета. Серьга 10 перемещается по направляющим хобота и закрепляется гайкой. Хобот совместно с серьгой обеспечивает жесткость фрезерной оправки с серьгой. С помощью винтового домкрата, по вертикальным направляющим станины перемещается консоль 5. Консоль – базовый узел, обеспечивающий продольную, поперечную и вертикальную подачи стола 9. По горизонтальным направляющим консоли перемещаются продольные салазки 6. По верхним направляющим вертикальных салазков перемещаются поперечные салазки 8. На продольных салазках установлены поворотные салазки 11 и стол 9. Вертикальное, продольное и поперечное движения подачи стола могут осуществляться вручную или с использованием коробки подач, размещенной в консоли. Вращательное движение выходного вала коробки подач преобразуется в поступательное перемещение стола с помощью механизмов «ходовой винт - гайка». На верхней части стола выполнены поперечные Т-образные пазы для установки заготовки или рабочих приспособлений.

На **рис. 15.17, б** показаны основные узлы ВФС. Эти станки имеют много общих унифицированных узлов и деталей с ГФС. от ГФС они отличаются вертикальным расположением шпинделя, который можно поворачивать под углом до  $45^\circ$  в обе стороны. На фундаментной плите 1 установлена чугунная станина 2. Внутри станины расположены: отсек для электрооборудования; коробка скоростей. В верхней части станины установлена поворотная планшайба 12 с фрезерной головкой и шпинделем 13. С помощью винтового домкрата, по вертикальным направляющим станины перемещается консоль 5 с продольными 6, поперечными 8 салазками и столом.

Обработку сложных фасонных поверхностей производят концевыми фрезами на копировально-фрезерных станках. Плоские фасонные поверхности

замкнутого контура с прямолинейной образующей получают контурным фрезерованием. При этом заготовке или фрезе одновременно сообщают движение в двух направлениях (продольное и поперечное движение подачи). Одно из движений является задающим (постоянным), другое – следящим, зависящим от формы копира. Профиль обработанной поверхности зависит от соотношения этих движений. Скорость перемещения фрезы относительно заготовки (результатирующая подача) должна совпадать со скоростью перемещения следящего элемента (щупа) по копиру. Объемные фасонные поверхности получают объемным копирным фрезерованием. Поверхности фрезеруют отдельными вертикальными или горизонтальными фасонными строчками. Ширина строчки соответствует диаметру концевой фрезы. После фрезерования одной строчки, фрезу перемещают на ширину строчки. Следующую строчку фрезеруют на обратной подаче. В современных копировальных станках применяются механические, электромеханические или гидравлические следящие приводы. При использовании механического следящего привода щуп жестко связан с фрезой, сила резания воспринимается копиром, что является причиной его быстрого износа. Применение электромеханических или гидравлических усилителей позволяют уменьшить давление на щуп. Малые давления щупа на копир позволяют фрезеровать крутые профили, обеспечивая высокую точность обработки.

На **рис. 15.17**, *в* показан общий вид копировально-фрезерного станка. На фундаментной плите *1* установлена станина *2*. По горизонтальным направляющим станины перемещаются салазки *8*. По поперечным направляющим салазок перемещается стол *14*. На столе установлена стойка *15* со своим столом *16*, в пазах которого устанавливаются приспособление с обрабатываемой заготовкой и копир. На правой части станины установлена вертикальная стойка *15* с винтовым механизмом подачи. По направляющим стойки перемещаются фрезерная бабка *19* со шпинделем *13* и следящий привод *18* со щупом *17*.

В крупносерийном и массовом производстве для высокопроизводительного непрерывного фрезерования партии деталей применяют фрезерные станки непрерывного действия. Для обработки заготовок небольшого размера (некруглые валы, рычаги, кронштейны ...) - карусельно – фрезерные станки; более крупные заготовки обрабатывают на барабанно-фрезерных станках. Основные узлы карусельно – фрезерного станка показаны на **рис. 15.17, з**. На станине 2 смонтирована стойка 15, по вертикальным направляющим которой перемещается фрезерная головка 19 с двумя шпинделями 13. Оба шпинделя имеют общий привод, но могут настраиваться на различные числа оборотов. Обычно левый шпиндель настроен на черновое фрезерование поверхности, правый – на чистовое. На круглом столе (карусели) 20 с вертикальной осью вращения в приспособлениях устанавливают заготовки. Стол установлен в салазках 8, которые могут перемещаться по направляющим станины. При работе станка, стол вращается непрерывно. Особенностью барабанно-фрезерных станков является наличие горизонтального барабана. На гранях барабана установлены приспособления, в которых базируются и зажимаются заготовки. Медленным вращением барабана заготовкам придают круговую подачу. Станки оснащены несколькими фрезерными головками.

### Резьбонарезание

Нарезание резьбы одна из распространенных операций в машиностроении. Наружные и внутренние резьбы наиболее просто выполнять на токарно-винторезном станке фасонными (резьбовыми) резцами. В крупносерийном производстве применяются специальные болторезные станки и нарезные головки, часто применяют накатку резьб роликами. Точные и мелкие резьбы нарезают профильными шлифовальными кругами. Резьбы с большими шагами нарезают резьбофрезерованием. Часто наружные резьбы нарезают плашками, а внутренние – метчиками.

Резьбовые резцы имеют профиль, соответствующий профилю нарезаемой резьбы. Скорость движения продольной подачи должна быть равна шагу

резьбы. Нарезание резьбы производится за несколько рабочих ходов. Чаще всего, резец устанавливают перпендикулярно оси центров станка и оба его лезвия режут одновременно и снимают симметричные стружки. Для уменьшения числа черновых ходов, резец устанавливают под углом  $60^\circ$  к оси центров. В этом случае работает только одно лезвие, можно снимать более толстые стружки. Для повышения производительности нарезания наружных резьб применяют охватывающие головки, «вихревое резание».

Наружные резьбы часто нарезают плашками. Плашка представляет собой гайку, в которой с помощью отверстий образованы режущие зубья. В сущности, плашка представляет собой протяжку с режущими зубьями, расположенными по винтовой поверхности. Внутренние резьбы часто нарезают метчиком. Он представляет собой винт, снабженный одной или несколькими продольными канавками, образующими режущие кромки и передние поверхности на его зубьях. В сущности, метчик, как и плашка, представляет собой протяжку с режущими зубьями, расположенными по винтовой поверхности.

### ***Обработка заготовок зубчатых колес на зуборезных станках***

Нарезание зубчатого венца по своей кинематике является наиболее сложной операцией, в процессе резания необходимо удалить большой объем металла из впадины между зубьями. Зубчатый венец имеет сложную геометрию и высокие сложные нормы точности.

Различают два метода формирования рабочего профиля зубьев: копированием и обкаткой. При обработке по методу копирования профиль зуба инструмента должен соответствовать профилю впадины между зубьями нарезаемого венца. Методом копирования нарезают зубчатые венцы модульными дисковыми или пальцевыми фрезами; круговыми протяжками. При обработке по методу обкатки имитируют зацепление зубчатой пары. Причем, одним из элементов пары является режущий инструмент, другим – обрабатываемое зубчатое колесо. Поэтому профили зуба инструмента

должен соответствовать профилю зуба пары имитируемого зацепления. Для имитации зацепления зубчатой пары, режущему инструменту и (или) заготовке, помимо основных движений резания и подачи, необходимо придавать дополнительные (обкатные) движения. Метод обкатки обеспечивает непрерывное формообразование зубчатого венца (высокая производительность обработки). Применение жестких, точных станков обеспечивает высокую точность зубонарезания. По методу обкатки зубчатые колеса нарезают: червячными фрезами, долбяками, резцовыми головками, шевингованием.

Обработка зубчатых колес модульными фрезами основана на профилировании зубьев фасонным инструментом, модульной дисковой или пальцевой фрезой. Нарезание колес внешнего зацепления режущим инструментом (дисковой фрезой) 3 (рис. 15.18, а) производится на горизонтальных или универсально-фрезерных станках. Заготовка 1 устанавливается в центрах 2 универсальной делительной головки. В процессе фрезерования впадины между зубьями колеса фрезе сообщают вращательное движение резания, заготовке – движение продольной подачи. После прорезания одной впадины, заготовка поворачивается на угол равный шагу между зубьями ( $1/z$ ) - «делительный поворот». Теоретически, для каждого модуля и числа зубьев требуется отдельная модульная фреза. На практике ограничиваются комплектом модульных фрез, каждая из которых может быть использована для нарезания колес данного модуля в определенном интервале зубьев. Поэтому нарезаемый зубчатый венец имеет большую погрешность профиля. Деление заготовки производится механической делительной головкой, поэтому нарезаемый зубчатый венец имеет большую погрешность по шагу. Метод малопроизводителен, и имеет низкую точность. Метод используется при нарезании зубчатых венцов в ремонтных мастерских, в единичном производстве или при нарезании крупномодульных колес.

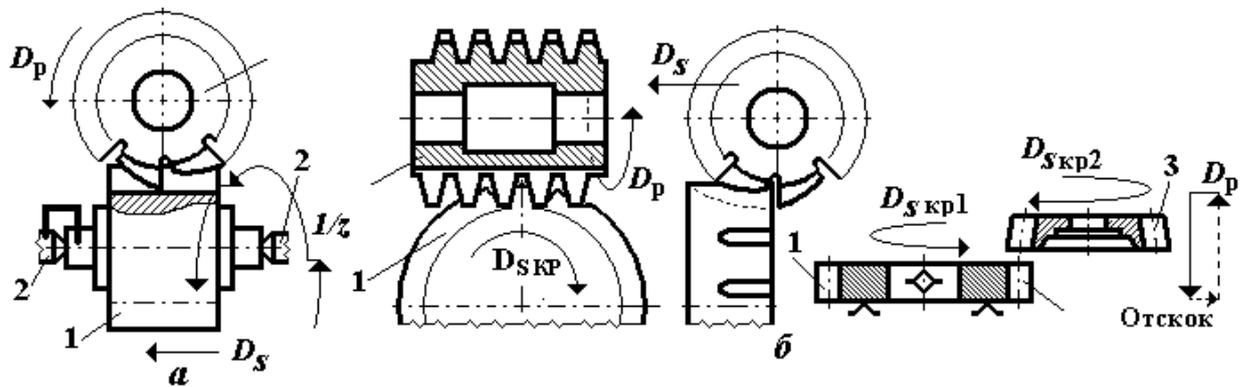


Рис. 15.18. Обработка цилиндрических зубчатых колес: а – методом копирования; б – методом обкатки  $D_p$  – главное движение;  $D_s$  – движение подачи;  $D_{S_{кр}}$ ,  $D_{S_{кр1}}$ ,  $D_{S_{кр2}}$  – обкатные движения;  $1/z$  – делительный поворот.

Обработка зубчатых колес червячными фрезами основана на имитации зацепления «рейка - колесо» (рис. 15.18, б). Режущий инструмент (червячная фреза) 3 представляет собой рейку с зубьями расположенными по винтовой линии (при вращении инструмента имитируется осевое перемещение рейки). Для кинематического обеспечения имитации реечного зацепления заготовке 1 придается обкатное движение  $D_{s,кр}$ . Применение прецизионных фрез и жесткого высокоточного оборудования с ЧПУ позволяет получить высокую степень точности.

Обработка зубчатых колес долблением основана на имитации зацепления «шестерня - колесо» (рис. 15.18, б). Режущий инструмент (долбляк) 3 представляет собой зубчатое колесо, зубья которого имеют эвольвентным профиль. Для кинематического обеспечения имитации зацепления: заготовке 1 придается обкатное движение  $D_{s,кр1}$ , долбяку придается обкатное движение  $D_{s,кр2}$ . Для того чтобы исключить трение задних поверхностей зуба долбяка об обработанную поверхность, при обратном ходе долбяк отводят от заготовки на  $0,1 \dots 0,2$  мм (отскок). Зубодолбление – наиболее универсальный метод нарезания цилиндрических колес. Он позволяет нарезать прямо- и косозубые колеса, колеса внешнего и внутреннего зацепления, колеса с буртиками, многовенцовые колеса, шевронные колеса. По

производительности, зубодолбление уступает зубофрезерованию червячными фрезами.

Обработка зубчатых колес шевингованием основана на имитации зацепления «шестерня - колесо» на скрещивающихся осях. Швер представляет собой зубчатое колесо с канавками вдоль профиля зубьев (угол наклона зубьев 5 или 15°), изготовленное из быстрорежущей стали. Главная и вспомогательная режущие кромки образуют угол резания  $\delta = 90^\circ$ . Поэтому зуб шевра скоблит металл заготовки (бреющее резание или шевингование), снимая тонкие (игольчатые) стружки. При шевинговании снижаются погрешности: профиля, шага зацепления, циклическая погрешность (волнистость), колебание межцентрового расстояния на оборот колеса, улучшается пятно контакта по высоте зуба (по этим показателям обеспечивается пятая, шестая степени точности).

В основу зубострогания методом обката положено зацепление двух конических зубчатых колес (рис. 15.19, а), одно из которых плоское.

Нарезаемое коническое колесо 1 находится в зацеплении с производящим плоским коническим колесом 2, зубья которого имеют форму кольцевой рейки. Роль производящего колеса имитируют два строгальных резца 4, образующих впадину между зубьями. Строгальные резцы перемещаются по направляющим люльки 3, вращающейся вокруг оси производящего колеса ( $D_{скр2}$ ). Резцы попеременно совершают возвратно – поступательные движения по направлению к вершине конусов производящего колеса и заготовки. Для кинематического обеспечения имитации зубчатого зацепления, заготовке придается возвратно - качательное движение ( $D_{скр1}$ ). В результате сложения главного и обкатного движений на заготовке образуются две неполные впадины и один полностью обработанный зуб. После нарезания одного зуба заготовка отводится от резцов. Направления вращения люльки с резцами и заготовки изменяются, затем они возвращаются в исходное положение (холостой ход). Во время отвода заготовки от резцов, шпиндель бабки изделия поворачивается вместе с заготовкой на угол, равный шагу между

зубьями. Цикл нарезания повторяется. Способ позволяет нарезать прямые зубья и используется в мелкосерийном и серийном производстве.

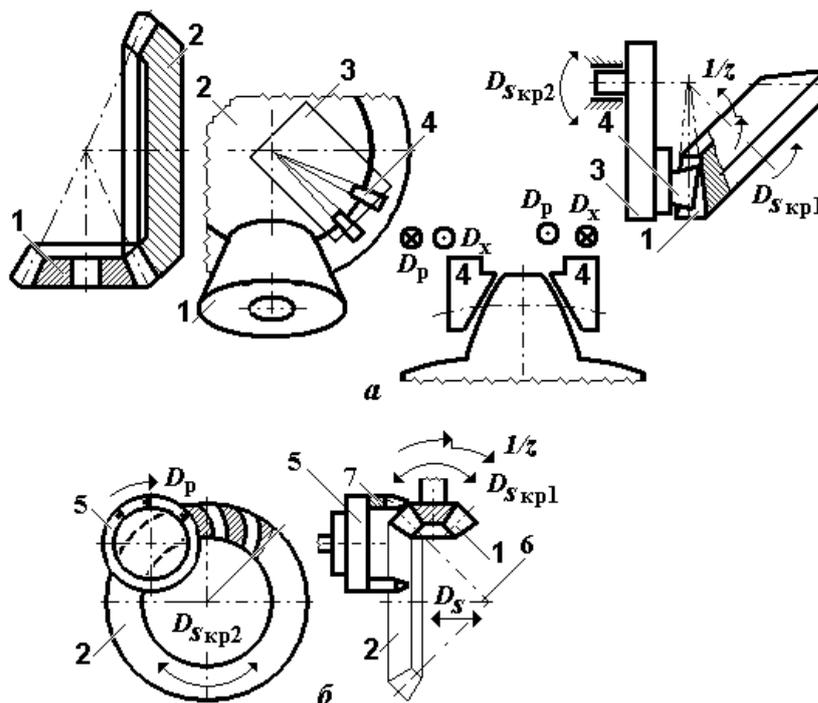


Рис. 15.19. Обработка конических зубчатых колес: а – зубостроганием; б – круговой резцовой головкой; 1 – нарезаемое колесо; 2 – производящее колесо; 3 – люлька; 4 – строгальные резцы; 5 – резцовая головка; 6 – ось производящего колеса;  $D_p$  – главное движение;  $D_x$  – движение холостого хода;  $D_{skp1}$ ,  $D_{skp2}$  – обкатные движения;  $1/z$  – делительный поворот.

Конические колеса с круговыми зубьями нарезают по методу обкатки резцовыми головками. Нарезаемое колесо 1 (рис. 15.19, б) в процессе обработки находится в зацеплении с плоским коническим колесом 2 (производящее колесо) с круговыми зубьями (круговая рейка). Роль зубьев производящего колеса выполняют резцы 7 резцовой головки 5 вращающейся вокруг оси 6 производящего колеса (обкатное движение –  $D_{skp2}$ ). При повороте заготовки на один зуб резцовая головка синхронно поворачивается на угол, соответствующий одному зубу. Резцовая головка размещена на вращающейся люльке станка. Люлька вращается до тех пор, пока не будет закончена обкатка профиля одной впадины. После этого, заготовка отводится от резцовой головки, и люлька начинает вращение в обратную сторону. Заготовка продолжает свое вращение в том же направлении. Когда люлька

займет исходное положение, заготовка должна будет находиться в угловом положении, соответствующем следующей впадины. Заготовка подводится к резцовой головке, и цикл резания повторяется.

Конические колеса с прямым зубом нарезаются: фрезерованием двумя спаренными дисковыми фрезами с прямолинейными кромками; строганием одним резцом с прямолинейными кромками при непрерывном делении заготовки; строганием по копиру одним или двумя резцами; круговым протягиванием. Конические колеса с круговым зубом нарезаются: фрезерованием конической фрезой; круговым протягиванием торцовой резцовой головкой, резцовой головкой врезанием.

### ***15.7. Технологичность деталей машин***

Под технологичностью любого объекта понимается соответствие свойств этого объекта конкретным условиям его производства, эксплуатации и ремонта. Следовательно, технологичность любой конструкции, это совокупность свойств обеспечивающих оптимальность затрат труда, средств, материалов и времени при технической подготовке ее производства, изготовлении, эксплуатации и ремонта. При конструировании деталей машин необходимо ориентироваться на предполагаемые способы получения ее заготовки, обработки ее поверхностей. Предпочтение необходимо отдавать тем конструкциям, которые обеспечат: наибольший коэффициент использования материала ( $K_m = Q_{и}/Q_з$ , где:  $Q_{и}$  - масса изделия;  $Q_з$  – общая масса заготовок); наименьшую себестоимость изготовления заготовок и обработки поверхностей деталей при заданной производительности и точности обработки; возможность замены ручного труда и автоматизации производства.

Деталь, обрабатываемая точением, должна удовлетворять следующим технологическим требованиям (рис. 15.20).

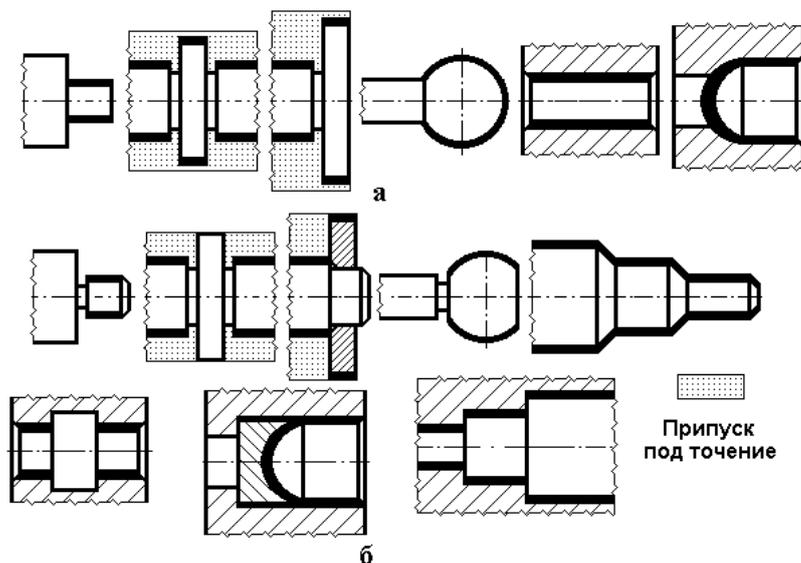


Рис. 15.20.  
Технологические требования к деталям, обрабатываемым точением:  
а – нетехнологичные решения; б – технологичные решения.

Содержать наибольшее число поверхностей, имеющих форму тел вращения. Масса детали должна быть уравновешена относительно ее оси вращения. Желательно, чтобы обрабатываемые поверхности не имели разрывов (шпоночных пазов, лысок). Вращение неуравновешенной детали, точение прерывистых поверхностей приводят к возбуждению колебаний в технологической системе СПИД, что отрицательно скажется на стойкости режущего инструмента и снизит точность обработки. При конструировании детали необходимо использовать нормальный ряд диаметров и длин, что позволит применить стандартные режущие инструменты. Желательно избегать применения нежестких элементов в конструкции детали (длинные и тонкие шейки, тонкостенные втулки). Точение нежестких заготовок не обеспечивает необходимой точности обработки и требует применения специальных приспособлений (люнетов, много лепестковых цанг). Желательна унификация элементов детали (одинаковые размеры фасок, радиусов закруглений, канавок), что позволяет выполнять одинаковые элементы одним режущим инструментом. Желательно, чтобы обработанная поверхность в начале имела фаску, для постепенного врезания режущего

инструмента, и заканчивалась кольцевой канавкой, для свободного выхода режущего инструмента. Неответственные поверхности, несопрягаемые с поверхностями других деталей, можно не обрабатывать, что снижает трудоемкость обработки детали в целом. Обработка деталей с большими перепадами диаметров приводит к неоправданно большим объемам срезаемой стружки или к применению сложных, дорогостоящих заготовок. Желательно расчленить конструкцию детали: отдельно выполнять вал с шейкой, отдельно – кольцо. Затем, кольцо напрессовать на шейку, и при необходимости, произвести совместную чистовую обработку. Желательно заменять сложные фасонные поверхности более простыми. Между фасонной и цилиндрической поверхностями необходимо предусматривать переходную канавку. Если деталь заканчивается сферической поверхностью, желательно торец выполнять плоским. Точные внутренние отверстия во втулках надо выполнять с внутренней выточкой, что позволит расточить отверстие с одной установки и одним расточным резцом. Обработка точных глухих отверстий затруднительна, желательно заменять их на сквозные. Затруднительна обработка фасонного дна отверстий, желательно применение вставного дна, что резко упростит обработку. Ступенчатые поверхности детали желательно выполнять с постепенным увеличением (у валов) или уменьшением (у отверстий) диаметров по длине детали. Длины ступеней должны быть одинаковыми или кратными длине самой короткой ступени, что упрощает наладку станка при обработке на многорезцовых автоматах или полуавтоматах. В торцах валов, обрабатываемых в центрах, необходимо предусматривать центровые технологические отверстия. Желательно избегать обработки ребристых поверхностей. Участки, имеющие один размер, но разные допуски, необходимо разграничивать кольцевыми канавками. Острые грани обработанных поверхностей должны быть притуплены или скруглены. Поверхности шеек валов, сочленяемых с отверстиями сопрягаемой детали, должны иметь заходные конусы (фаски).

Деталь, обрабатываемая строганием или долблением, должна удовлетворять следующим технологическим требованиям. Обрабатываемые поверхности заготовки, целесообразно оформлять в виде плоскостей или сочетаний плоскостей. Желательно избегать сложных фасонных поверхностей, требующих изготовления специальных копиров. Обрабатываемые поверхности следует располагать в одной плоскости, что позволит обрабатывать их за 1 проход. Перед обработкой поверхности необходимо прострогать фаски под углом  $45^\circ$  со стороны входа и выхода инструмента, что обеспечит плавное врезание резца в заготовку и предотвратит скалывание края обработанной поверхности при выходе резца.

Обрабатываемые поверхности должны обеспечить свободный выход резца в конце рабочего хода. При наличии в направлении главного движения уступов, необходимо предусматривать разделительную канавку для выхода инструмента. Ширина канавки: для поперечно-строгальных станков, 10...15мм; для продольно-строгальных станков, 30...40 мм. При строгании поверхностей расположенных под углом друг к другу, необходимо предусматривать разделительную канавку для выхода инструмента и правильной дальнейшей сборки сопрягаемых деталей в узле. Строгание узких длинных поверхностей необходимо проводить в продольном направлении, так как строгание в поперечном направлении с большим числом двойных ходов в минуту приведет к значительным вибрациям технологической системы СПИД. Нецелесообразно строгать ребристые, прерывистые поверхности, так как это вызовет значительные вибрации технологической системы СПИД. При необходимости обработки таких поверхностей их строгают по длине ребра. При строгании деталей малой жесткости (например: коробчатые конструкции с тонкими стенками) необходимо, для повышения их прочности, предусматривать ребра жесткости. Следует избегать строгания поверхностей, расположенных в углубления. Пазы, обрабатываемые строганием на проход, должны быть открытыми. Ширина обрабатываемого паза должна обеспечивать

размещение строгального резца. Желательно пазы выполнять сборными. Желательно, чтобы шпоночные пазы, обрабатываемые долблением, были открытыми. При долблении несквозных шпоночных пазов необходимо предусматривать кольцевые канавки для выхода инструмента.

Нецелесообразно обрабатывать долблением длинные поверхности, так как потребуются резцы с большим вылетом, что приведет к значительным деформациям и разрушению резца.

Деталь, обрабатываемая сверлением, должна удовлетворять следующим технологическим требованиям. Поверхность, на которой надо просверлить отверстие должна быть перпендикулярной к оси отверстия. В противном случае возможна поломка сверла. С этой целью, у литых деталей предусматриваются специальные плоскости перпендикулярные оси отверстия. У заготовок, полученных методами ОМД, фрезеруют аналогичные уступы. При конструктивной невозможности выполнения этого требования требуется применение специальных, направляющих кондукторных втулок. Высокоточные отверстия желательно выполнять сквозными, а не глухими. Если требуется глухое точное отверстие, то лучше сверлить сквозное, и заглушить его пробкой. Глубокие сквозные отверстия желательно заменить на два неглубоких, расположенных оппозитно, что позволит сверлить их одновременно с двух сторон. Гладкие глубокие отверстия желательно заменять на ступенчатые с постепенным уменьшением диаметра. Желательно не использовать отверстия с пересекающимися осями или с совпадением части их образующей, так как возможна поломка сверл. На заготовках формы тел вращения желательно предусматривать токарную обработку торцов вместо цекования каждой торцевой поверхности бобышек.

Деталь, обрабатываемая фрезерованием, должна удовлетворять следующим технологическим требованиям. Фрезеруемые поверхности, лежащие в одной плоскости, должны располагаться на одной высоте, что позволяет обрабатывать их одной фрезой за один проход. При размещении поверхностей на разных уровнях их придется фрезеровать в несколько

проходов, опуская или поднимая стол станка. При наличии нескольких рядом расположенных бобышек, желательно объединить их в одну плоскость, что позволит уменьшить вибрации в технологической системе СПИД. Пазы и прорези целесообразно обрабатывать дисковыми фрезами, так как обработка ими производительнее, чем концевыми. Радиус паза необходимо выбирать равным радиусу стандартной фрезы. Для повышения производительности обработки, желательно фрезеровать несколько одинаковых заготовок одновременно. Поэтому вариант заготовок с односторонним выступом предпочтительнее варианта заготовок с двусторонними выступами. Разрезные втулки желательно выполнять с плоскостями разъема, не проходящими через центр отверстия. Ширина прорези должна быть равной ширине стандартной фрезы. Желательно предусматривать равномерную ширину фрезерования по всей длине обрабатываемой поверхности. Неравномерная ширина приведет к неравномерности сил резания, что скажется на размерной точности обработки и приведет к увеличению волнистости обработанной поверхности. При фрезеровании квадратов необходимо предусматривать канавку на выход фрезы. При отсутствии канавки возможно фрезерование только концевой фрезой, что менее производительно и может привести к поломке фрезы. Диаметр прилегающей шейки вала должен быть меньше стороны квадрата. Наружные торцы корпусных деталей легче фрезеровать, чем внутренние.

Зубчатые колеса, должны удовлетворять следующим технологическим требованиям. Несимметричное расположение элементов зубчатого колеса и резкие переходы приводят к повышенным деформациям зуба при термической обработке. Термическая обработка колес с симметричными элементами значительно уменьшает деформацию зубьев. Нарезание колес с выступающими ступицами в пакете приведет к увеличению рабочего хода инструмента. Колеса без выступающих ступиц позволяют обрабатывать их пакетом. Зубчатые колеса с близко расположенным высоким буртиком можно обрабатывать только зубодолблением. Если буртик расположить ниже

окружности впадин зубчатого венца, то его можно обрабатывать червячными фрезами, круговыми протяжками. Многовенцовые зубчатые колеса с близкорасположенными венцами, затруднительно обрабатывать современными высокопроизводительными методами. Лучше расположить венцы на расстоянии, достаточном для выхода червячной фрезы или круговой протяжки или спроектировать сборное колесо.

### ***15.8. Абразивная обработка деталей машин, шлифование***

Абразивная обработка (АО) - процесс обработки заготовок резанием абразивным инструментом. Абразивные зерна расположены в режущем инструменте беспорядочно и удерживаются связующим материалом. При придании инструменту движения резания, в зоне его контакта с обрабатываемой поверхностью часть зерен срезает материал заготовки. Обработанная поверхность представляет собой совокупность микроследов воздействия абразивных зерен. Поэтому, иногда, АО определяют, как управляемый износ заготовки. В зависимости от качества обработанной поверхности различают: шлифование и отделочную обработку. Шлифование это чистовая операция, позволяющая получить обработанную поверхность с размерной точностью по 5...7 качеству и шероховатостью  $R_z$  0,3...2,4 мкм.

Скорость резания при АО лежит в пределах 30...100 м/с, поэтому АО – высокопроизводительный процесс. АО позволяет производить чистовую обработку заготовок из различных материалов, имеющих различную твердость (для заготовок из закаленных сталей – это основной способ обработки).

Абразивный инструмент, в отличие от другого многозубого лезвийного инструмента, имеет множество режущих лезвий, расположенных хаотично. Единичное зерно шлифовального круга может: располагаться на некотором расстоянии от обрабатываемой поверхности; скользить по обработанной поверхности (скользящие зерна); проникать в обработанную поверхность на

небольшую глубину и только пластически деформировать материал заготовки (деформирующие зерна); проникать в обработанную поверхность на глубину достаточную для снятия стружки (режущие зерна). Поэтому, по сравнению с лезвийной обработкой: скользящие зерна создают дополнительное сопротивление резанию (дополнительное трение); деформирующие зерна создают дополнительное сопротивление резанию на упругую и пластическую деформацию поверхностного слоя; режущие зерна так же расположены хаотично (неоптимальные углы резания, например передний угол от  $-90^\circ$  до  $+30^\circ$ ), что приводит к увеличению сил сопротивления резанию. Сила резания, при работе единичного зерна, значительно больше. Но, абразивное зерно работает с малыми глубинами и шириной резания, снимает тонкие стружки, поэтому суммарная сила резания меньше. Температура в зоне резания значительно больше, поэтому возможны структурные превращения металла в зоне резания (прижоги). Стружка сгорает на воздухе в виде снопа искр, что требует дополнительных мер пожарной и санитарной безопасности.

Силу резания, как и при лезвийной обработке, можно разложить на три составляющие ( $P_z; P_y; P_x$ ). Силы и мощность резания рассчитывают по следующим формулам:

$$P_z = C_p \times V_{заг}^a \times S_{прод}^b \times t; N_k = \frac{P_z \times V_k}{1000} \times \eta_k; N_{заг} = \frac{P_z \times V_{заг}}{60000} \times \eta_{заг},$$

где: коэффициент  $C_p$  и показатели

степени  $a, b, c$  зависят от условия шлифования;  $S_{прод}$  - продольная подача на оборот круга;  $V_k$  - скорость круга в м/с;  $V_{заг}$  - скорость заготовки;  $t$  - глубина резания, в мм;  $\eta_k$  и  $\eta_{заг}$  - к.п.д. кинематических цепей приводящих в движение абразивный инструмент и заготовку.

В процессе шлифования режущие свойства круга изменяются. Абразивные зерна затупляются, частично раскалываются, выкрашиваются, поры между зернами забиваются отходами шлифования. Поверхность круга теряет свою первоначальную форму. Возрастает сила и температура резания. Точность обработки снижается, увеличивается вероятность прижогов. Однако, при

выламывании затупившихся зерен, на поверхности круга обнажаются новые, незатупившиеся зерна, т.е. круг частично самозатачивается. В этом смысле очень важна роль связки (вещества закрепляющие зерна). При слабом закреплении зерен, они быстрее выламываются, круг лучше самозатачивается, что удобно при черновом шлифовании, но рабочая поверхность круга быстро теряет свою форму. При чрезмерном закреплении зерен, круг быстро теряет свои режущие свойства, но рабочая поверхность хорошо сохраняется, что удобно при чистовом шлифовании. Для восстановления геометрии круга и его режущих свойств, проводят правку круга. Алмазным или абразивным инструментом снимают часть рабочей поверхности круга. Толщина удаляемого слоя обычно не превышает 0,01...0,03 мм. Различают: геометрическую и физическую стойкость шлифовального круга. Геометрическая стойкость – время (количество обработанных заготовок) непрерывной работы, после которой необходима правка с целью восстановления геометрических параметров рабочей поверхности. Геометрическую стойкость обычно назначают для чистового шлифования, для шлифования фасонных или конических поверхностей. Физическая стойкость шлифовального круга – время (количество обработанных заготовок) непрерывной работы, после которой необходима правка с целью восстановления режущих свойств рабочей поверхности. Физическую стойкость обычно назначают для чернового шлифования. В зависимости от вида обрабатываемой поверхности различают шлифование: круглое наружное и внутреннее; фасонное; плоское.

При шлифовании главное движение  $D_p$  придают абразивному инструменту (шлифовальному кругу). Скорость главного движения определяется по формуле:  $V_k = \pi D_k n_k / 60000$ , м/с, где:  $D_k$  – диаметр шлифовального круга в мм;  $n_k$  – частота вращения шлифовального круга в об/мин. Для обеспечения цилиндричности обработанной поверхности при круглом шлифовании заготовке придают движение круговой подачи ( $D_d$ ), скорость которого в м/мин определяется по формуле:  $V_d = \pi D_d n_d / 1000$ , м/с, где:  $D_d$  – диаметр

обрабатываемой поверхности в мм;  $n_k$  – частота вращения заготовки в об/мин.

В зависимости от направления движения подачи, придаваемой шлифовальному кругу, различают три основных схемы шлифования: с продольной подачей ( $D_{\text{спрод}}$ ), с поперечной подачей ( $D_{\text{споп}}$ ), с тангенциальной подачей ( $D_{\text{СТ}}$ ). В зависимости от способа базирования заготовки различают: шлифование в центрах или в патроне; бесцентровое шлифование; планетарное шлифование.

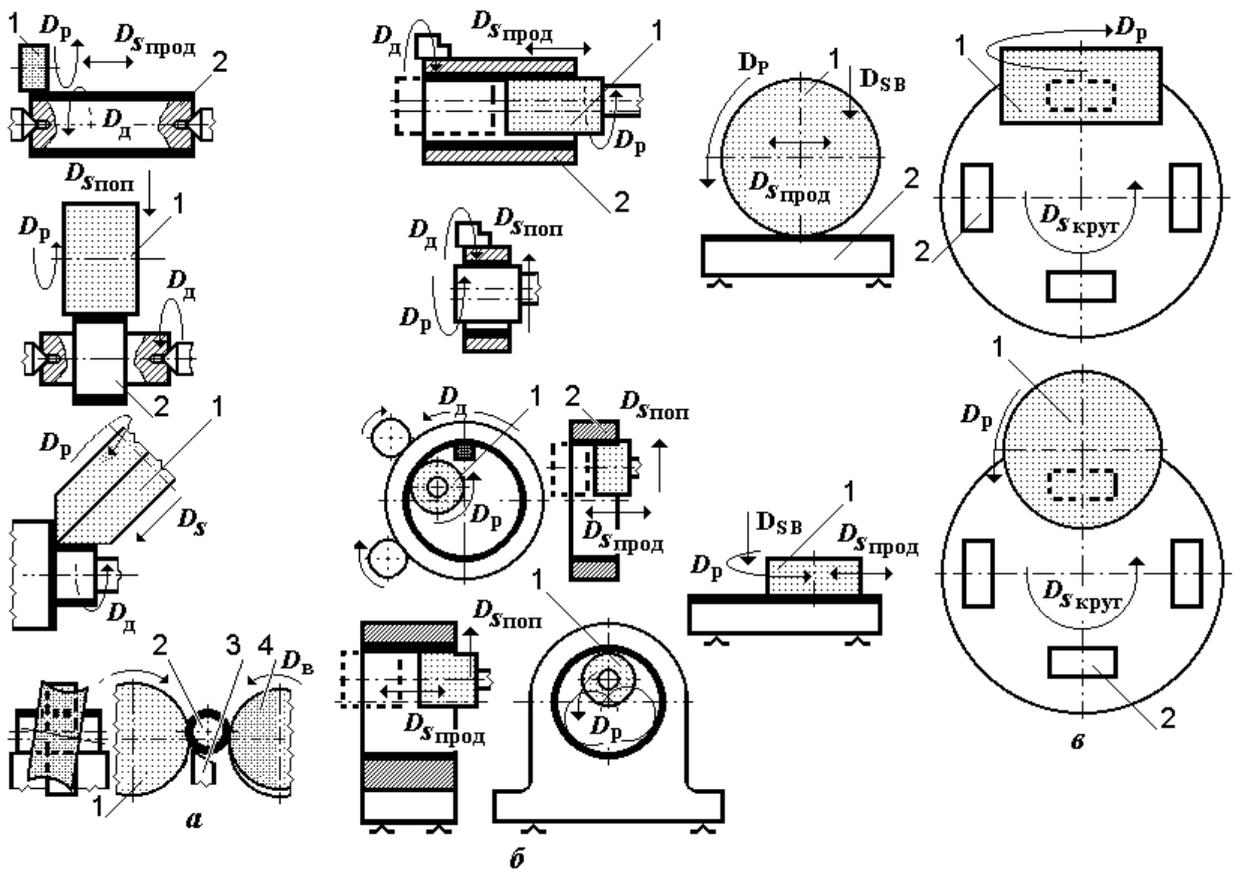
Круглым наружным шлифованием (рис. 15.21, а) обрабатывают наружную цилиндрическую поверхность валов, колец и втулок. При шлифовании в центрах обрабатывают шейки заготовок 2 ступенчатых и гладких круглых стержней (валов). При наружном бесцентровом шлифовании заготовку 2 не закрепляют в центрах или в патроне. Заготовка опирается на нож 3 и базируется по обработанной поверхности, что существенно повышает точность обработки. Заготовка получает вращение от ведущего круга 4.

Скорость движения ведущего круга в 60...100 раз меньше скорости движения шлифующего круга 1. При вращении заготовки от ведущего круга ее скорость (круговая подача) определяется по формуле:  $V_3 = \pi D_{\text{в.к}} n_{\text{в.к}} \eta \cos \alpha / 1000$ , где:  $V_3$  – скорость движения заготовки в м/мин;  $D_{\text{в}}$  – диаметр ведущего круга в мм;  $n_{\text{в}}$  – частота вращения ведущего круга в об/мин;  $\eta$  – коэффициент, учитывающий проскальзывание ведущего круга и заготовки;  $\alpha$  – угол наклона оси ведущего круга или ножа (направляющей линейки) к оси заготовки, обычно  $\alpha = 2...6^\circ$ . Скорость продольного перемещения заготовки в мм/мин, равна:

$$S_3 = \pi D_{\text{в}} n_{\text{в}} \eta \sin \alpha.$$

При внутреннем шлифовании (рис. 15.21, б) обрабатывают внутренние цилиндрические сквозные и глухие поверхности валов, колец, втулок, корпусных деталей. При шлифовании в патроне движение круговой подачи осуществляется за счет вращения заготовки со скоростью:  $V_3 = \pi D_3 n_3 / 1000$ , где:  $V_3$  – скорость движения заготовки в м/мин;  $D_3$  – диаметр обрабатываемого отверстия в мм;  $n_3$  – частота вращения заготовки в об/мин.

При внутреннем бесцентровом шлифовании круговая подача осуществляется за счет вращения заготовки со скоростью:  $V_3 = \pi D_B n_B \eta / 1000$ , где:  $V_3$  - скорость движения заготовки в м/мин;  $D_B$  - диаметр ведущего круга в мм;  $n_B$  - частота вращения ведущего круга в об/мин;  $\eta$  - коэффициент, учитывающий проскальзывание ведущего круга и заготовки. Заготовку устанавливают: на двух вращающихся роликах и неподвижной опоре. При внутреннем планетарном шлифовании заготовка неподвижна. Для осуществления движения круговой подачи шпинделю шлифовальной бабки придают дополнительное вращение вокруг оси обрабатываемого отверстия.



15.21. Технологические схемы шлифования: а, б – круглое наружное и внутреннее; в – плоское;  $D_p$  – главное движение;  $D_s$  – движение подачи;  $D_B$  – движение ведущего круга;  $D_д$  – движение круговой подачи;  $D_{спрод}$  – движение продольной подачи;  $D_{споп}$  – движение поперечной подачи;  $D_{св}$  – движение вертикальной подачи;  $D_{скруг}$  – движение круговой подачи; 1 – шлифующий круг; 2 – заготовка; 3 – нож; 4 – ведущий круг.

Плоским шлифованием (рис. 15.21, в) обрабатывают наружные плоские поверхности заготовок. Шлифование выполняется периферией или торцом круга. При шлифовании торцом круга колебания инструментального шпинделя меньше влияют на рельеф обработанной поверхности. Поэтому, шлифование торцом обеспечивает большую точность и меньшую шероховатость обработанной поверхности. При плоском шлифовании главное движение придается режущему инструменту – шлифовальному кругу. Движения подачи придается заготовке и кругу. Заготовку устанавливают на магнитный стол станка или в приспособлениях (например: в тисках, в синусных тисках, на синусной линейке), устанавливаемых на магнитном столе. Плоское шлифование характеризуется наличием: прямолинейной продольной подачи; (при установке заготовок на вращающийся стол – круговой подачей); поперечной подачей и вертикальной подачей.

В условиях единичного и серийного производства широко используются универсальные круглошлифовальные и плоскошлифовальные и бесцентрово-шлифовальные станки.

Круглошлифовальный станок (рис. 15.22, а) состоит из станины 9, передней 5 и задней 8 бабок, шлифовальной бабки 7. На верхних направляющих станины установлен стол 2. На верхней части стола установлен поворотный суппорт. На поворотном суппорте установлены: передняя бабка с коробкой скоростей 4; и задняя бабка. На задней части станины размещена шлифовальная бабка со шлифовальным кругом 6. Стол станка перемещается в продольном направлении штоком 1 гидроцилиндра 10.

Внутришлифовальный станок имеет аналогичную компоновку. Однако у него нет задней бабки, шлифовальная бабка выполнена консольной. Т.к. круги для внутришлифовальных работ имеют малый диаметр, то механизм главного движения должен обеспечить высокие обороты шлифовального круга (до 10000 об/мин). Производительность внутришлифовальных станков значительно ниже, т.к. консольное расположение шлифовальной бабки и

консольное закрепление шлифовального круга не обеспечивают необходимой жесткости системы СПИД. Вдобавок, требуется частая правка круга.

Плоскошлифовальный станок показан на рис. 15.22, б. На поперечных направляющих станины 9 размещена вертикальная колонна 12. По вертикальным направляющим 11 колонны перемещается шлифовальная бабка 13 с абразивным кругом 6. Круг частично закрыт защитным кожухом. По горизонтальным направляющим станины перемещается стол 17. Продольные движения стола осуществляются штоком 1 гидроцилиндра 10. На направляющих стола могут устанавливаться: заготовка; машинные тиски, синусные тиски или магнитная плита. На магнитной плите могут устанавливаться: заготовка; синусные тиски или плита.

Бесцентрово-шлифовальный станок показан на рис. 15.22, в. На станине 9 размещена: шлифовальная бабка 19 с абразивным кругом 6. На верхних направляющих станины установлен стол 17 с вертикальной колонной 12. На колонне размещены: поворотный суппорт 16 и бабка 15 ведущего круга 14. Каждый из кругов периодически правят с помощью механизмов для правки 13. Заготовку устанавливают на нож 18 между шлифуемым и ведущим кругами. Круги выбирают таким образом, чтобы трение между заготовкой и ведущим кругом было больше трения между заготовкой и шлифуемым кругом. Если необходимо продольное перемещение заготовки, то ведущий круг поворачивают на угол  $1 \dots 7^\circ$  относительно оси заготовки.

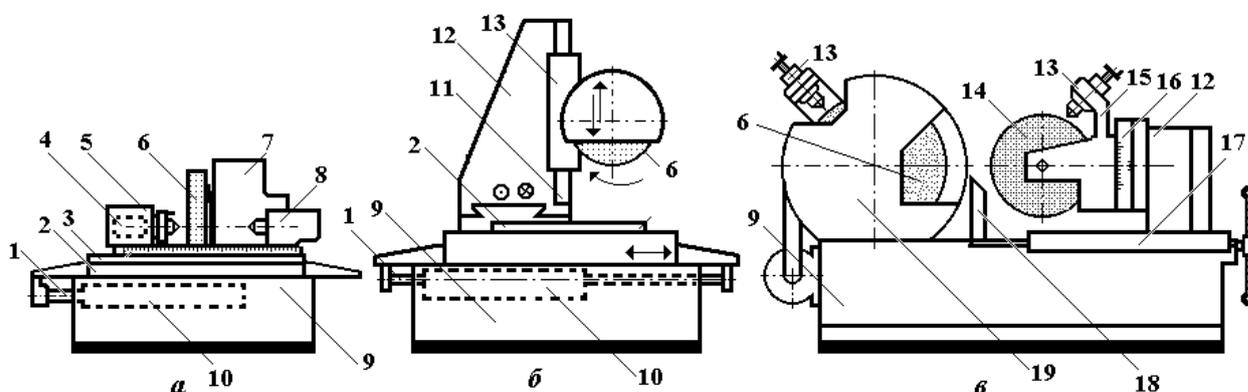


Рис. 15.22. Станки шлифовальной группы: а - круглошлифовальный станок; б – плоскошлифовальный станок; в - бесцентрово-шлифовальный станок; 1 – шток; 2 – стол; 3 – верхняя, поворотная часть стола; 4 – коробка скоростей; 5 – передняя бабка; 6 – абразивный круг; 7, 19 – шлифовальная бабка; 8 – задняя бабка; 9 – станина; 10 – гидроцилиндр; 11 – направляющие; 12 – колонна; 13 – механизмы правки; 14 – ведущий круг; 15 – бабка ведущего круга; 16 – поворотный суппорт; 17 – стол ведущего круга; 18 – нож.

### ***15.9. Отделочная обработка деталей машин***

Отделочная обработка (финишные операции) позволяют получить обработанную поверхность с размерной точностью по 4...5 качеству и шероховатостью  $R_z$  менее 0,3 мкм. В зависимости от вида и объекта приложения, различают отделочные операции: прецизионную обработку; тонкое шлифование, хонингование, супер- и микрофиниширование, доводку (притирку), полирование, виброабразивную и магнитно-абразивную обработку.

Прецизионная обработка (тонкое точение и растачивание, алмазное точение, тонкое фрезерование) позволяет получить: шероховатость поверхности –  $R_a$  0,02...0,63 мкм; точность по 5...9 качеству и характеризуется высокими скоростями резания (1,5...15 м/с), малыми подачами (0,01...0,15 мм/об) малой глубиной резания (0,05...0,3 мм) при высокой виброустойчивости технологической системы СПИД.

Тонкое шлифование производят мягкими мелкозернистыми шлифовальными кругами на больших скоростях резания (от 35 м/с). Процесс характеризуется снятием малых припусков (0,04...0,08 мм на сторону); малыми подачами (0,005 ...0,1 мм/об), частой правкой круга. Перед окончанием обработки шлифовальный круг работает без подачи (выхаживание). При этом сьем металла происходит за счет упругих сил в технологической системе СПИД, с постепенным уменьшением силы резания. Процесс осуществляется на

станках высокой и особо высокой точности, обеспечивающих плавность хода всех механизмов, высокой жесткости и виброустойчивости технологической системы СПИД.

Хонингование – отделочный метод обработки внутренних поверхностей абразивными брусками (рис. 15.23, а). Хонингование применяется для повышения точности формы, размера и снижения шероховатости отверстий, а так же создания специфического микропрофиля обработанной поверхности в условиях серийного и массового производства после операций растачивания, развертывания, протягивания и шлифования. Обработку производят с помощью абразивных или алмазных брусков, закрепленных в хонинговальной головке (хоне). Хону, как правило, сообщают три движения: вращение  $D_1$ ; возвратно-поступательное перемещение  $D_2$  и радиальное движение подачи. При вибрационном хонинговании, хону или заготовке придают дополнительное круговое или возвратно-поступательное движение с малой амплитудой (1...4 мкм) и частотой до 20 двойных ходов в минуту. Скорость главного движения  $D_1$  для обработки стали составляет 1...2 м/с, для обработки чугуна – 2...3 м/с. Соотношение скоростей движений  $D_1$  и  $D_2$  составляет 1,5...10. По характеру крепления брусков в хоне, различают: хоны с подпружиненными брусками и с жестким креплением брусков. Хоны с подпружиненными брусками не исправляют такие погрешности формы как «не прямолинейность оси отверстия». При жестком креплении брусков происходит исправление всех погрешностей формы, но точность обработки ниже.

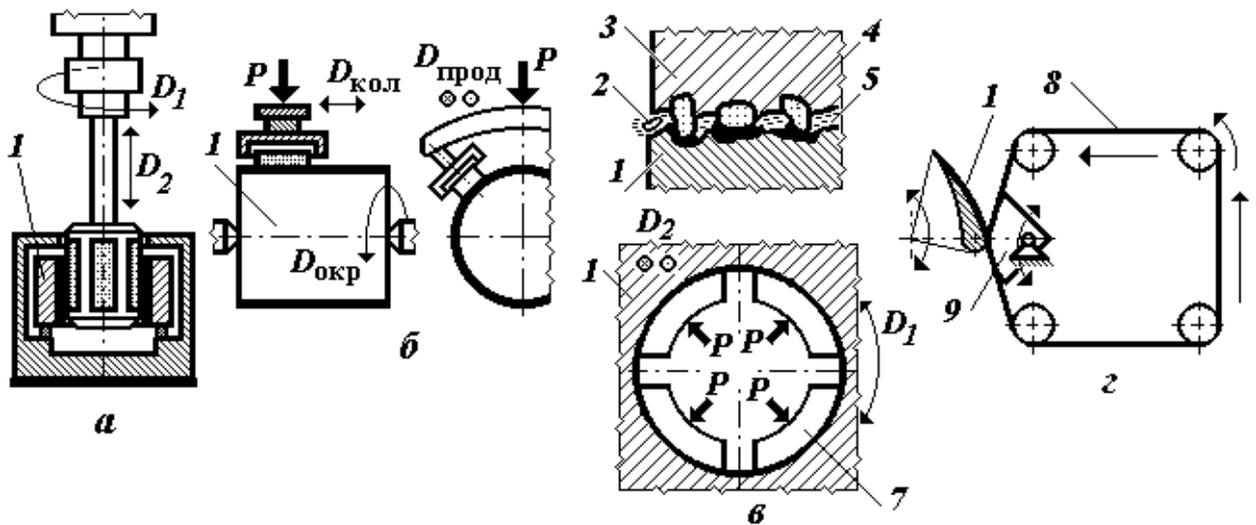


Рис. 15.23. Технологические схемы финишной обработки:

а – хонингование; б – суперфиниширование; в – притирка; г – полирование лентами; 1 – заготовка; 2 – стружка; 3 – притир; 4 – абразивное зерно;  $D_1$  – главное движение;  $D_2$  – возвратно-поступательное движение;  $D_{окр}$  – вращение заготовки;  $D_{кол}$  – возвратно-поступательное движение бруска;  $D_{спрод}$  – движение продольной подачи;  $P$  - сила прижима.

Суперфиниширование – отделочный метод обработки наружных поверхностей мелкозернистыми абразивными брусками, совершающими колебательные движения с амплитудой 2...5 мм и частотой до 2000 двойных ходов в минуту (рис. 15.23, б). Суперфиниширование применяют для отделочной обработки трущихся поверхностей, когда необходимо повысить их эксплуатационные свойства. Это достигается благодаря обеспечению: малой шероховатости ( $R_a$  0,05...0,6 мкм); уменьшению погрешностей формы до 0,3 мкм; нанесению на поверхность оптимального микрогеометрического рисунка; сглаживанию вершечек микронеровностей (увеличение площади фактической опорной поверхности). К преимуществам суперфиниширования можно отнести: простоту применяемого оборудования; возможность использования универсальных токарных или шлифовальных станков и головок – вибраторов, высокую производительность и простую автоматизацию процесса. Сущность процесса состоит в микрорезании

обрабатываемой поверхности одновременно большим количеством мельчайших абразивных зерен (до 10000 зерен/мм<sup>2</sup>). При этом снимаются тончайшие стружки (до 0,01 мм), одновременно, скорость съема металла достигает 1...2 мкм/с. Большинство зерен не режет, а пластически деформирует металл, при этом сглаживаются микронеровности и она получают зеркальный блеск. Основными рабочими движениями являются: вращение заготовки ( $D_{\text{окр}}$ ); возвратно – поступательное движение бруска ( $D_{\text{кол}}$ ) и движение продольной подачи ( $D_{\text{прод}}$ ). Иногда на брусок накладывают дополнительные ультразвуковые колебания, что позволяет увеличить скорость съема металла и бруски, самозатачиваются. Цикл обработки поверхности суперфинишированием складывается из времен: удаления исходной шероховатости  $T_1$ ; резания  $T_2$ ; перехода от резания к трению  $T_3$ ; полирования  $T_4$ . Как правило:  $T_1 = 0,15 \dots 0,2 T_{\text{ц}}$ ;  $T_2 = 0,4 \dots 0,5 T_{\text{ц}}$ ;  $T_3 = 0,2 \dots 0,25 T_{\text{ц}}$ ;  $T_4 = 0,2 \dots 0,25 T_{\text{ц}}$ .

Развитием суперфиниширования является микрофиниширование, характеризующееся: большими давлениями на брусок и жесткой фиксацией брусков, что значительно уменьшает погрешности предшествующей обработки.

Доводка (притирка) – отделочная операция, при которой съем металла с обрабатываемой поверхности производится абразивными зернами, свободно распределенными в пасте или суспензии, нанесенной на поверхность притира (рис. 15.23, в). Операция выполняется на малых скоростях и при переменном направлении рабочего движения притира. Эта наиболее трудоемкая отделочная операция позволяет получить шероховатость обработанной поверхности  $R_z 0,01 \dots 0,05$  мкм, отклонения формы – 0,05...0,3 мкм.

Различают доводку: ручную, полумеханическую и механическую. Ручная доводка применяется в единичном и мелкосерийном производстве, а также при обработке деталей сложной формы. Точность и качество обработки зависят от квалификации рабочего. Высококвалифицированный специалист обеспечивает точность формы в пределах от 0,5 до 2 мкм. Машинно-ручная

доводка используется в мелкосерийном производстве. Ее выполняют при помощи электрических или пневматических доводочных приспособлений. Главное движение выполняет приспособление, а движение подачи – от руки. Механическая притирка применяется в крупносерийном и массовом производстве на специальных притирочных станках.

Сущность доводки – притирки заключается в том, что абразивные зерна 4, находятся в составе связующей жидкости 5, между обрабатываемой поверхностью заготовки 1 и притиром 3. Абразивные зерна вдавливаются в поверхность притира, т.к. он выполнен из более мягкого материала, чем заготовка, и шаржируются в нем. При взаимном перемещении притира и заготовки, абразивные зерна снимают тончайшие стружки 2. Химическое воздействие кислой среды пасты сочетается с механическим воздействием абразива. Под воздействием кислоты, обработанная поверхность покрывается окисной пленкой. Вначале микронеровности соприкасаются с притиром по малой контактной площади. Срезаются окисные пленки с выступов микронеровностей. Этот этап характеризуется большими удельными давлениями и пластическим деформированием выступов микронеровностей. С увеличением контактной площади, давление уменьшается, снижается толщина снимаемого слоя. При этом снимаются только окисные пленки.

Притирка внутренней цилиндрической поверхности заготовки 1 осуществляется притиром 7 в виде разжимной втулки с прорезями. Притиру сообщают возвратно-вращательное движение  $D_1$  и возвратно-поступательное движение  $D_2$ . Возможно равномерное дополнительное вращение заготовки.

Притирка осуществляется вручную или на металлорежущих станках. Аналогичная схема и движения применяется при притирке наружных внутренних цилиндрических поверхностей. В качестве притира используется кольцо с прорезями.

Полирование – это заключительная операция механической обработки заготовки, выполняемая с целью уменьшения шероховатости поверхности и придания ей зеркального блеска. Полирование обеспечивает шероховатость

поверхности  $R_a$  0,16...0,02 мкм;  $R_z$  0,1...0,05 мкм. Эта отделочная операция осуществляется механическими, химическими, электромеханическими и другими методами. Различают: полирование кругами; полирование лентами; абразивно-жидкостную обработку; виброабразивную обработку и магнитно-абразивную обработку.

При полировании лентами (рис. 15.23, з) используется гибкий абразивный инструмент – абразивная лента 8. Абразивная лента представляет собой гибкую плоскостную основу (матерчатые ленты) с нанесенным на ее рабочую поверхность абразивным зерном. Абразивные зерна могут работать в условиях жесткого закрепления (абразивная лента) или в режиме податливости (лента с нанесенной на ней абразивной пастой). К преимуществам полирования лентами относятся: постоянство скорости резания; эластичность и упругость ленты; возможность обработки больших поверхностей; отсутствие необходимости в балансировке и правке инструмента; безопасность работы.

Абразивно-жидкостная обработка применяется для полирования сложных фасонных поверхностей. Сущность абразивно-жидкостной обработки заключается в подаче на обрабатываемую поверхность суспензии под давлением и с большой скоростью. Абразивные зерна, срезая выступы микронеровностей, создают эффект полирования. При подаче суспензии с воздухом повышается производительность обработки, но увеличивается ее шероховатость.

Для повышения производительности и качества отделочных операций часто используется вибрационная обработка в абразивной среде. Главное движение резания осуществляют абразивные зерна, совершающие колебания под воздействием внешней возмущающей силы (вибраций). Перед обработкой, заготовки загружаются в контейнер, заполненный абразивной средой. Контейнеру сообщают колебательные движения в двух плоскостях. Частота колебаний – от 50 до 180 КГц. Абразивная среда и заготовки при этом перемещаются, совершая: колебания в двух плоскостях и медленное

вращение всей массы. В контейнере детали расположены хаотично и занимают случайное положение, что обеспечивает равномерную обработку всех поверхностей. Большое количество микроударов поддерживает заготовки во взвешенном состоянии, что исключает образование грубых забоин и повреждений. Обработка может протекать всухую или с подачей жидкого раствора. Жидкий раствор обеспечивает удаление продуктов износа, равномерное распределение заготовок по объему контейнера и химико-механический процесс съема металла.

Магнитно-абразивному полированию подвергаются плоские, цилиндрические или фасонные поверхности заготовок из магнитных и не магнитных материалов. За 10...40с достигается шероховатость обработанной поверхности  $R_a$  0,032...0,2 мкм, исправляются погрешности геометрической формы. Сущность магнитно-абразивной обработки заключается в следующем. Заготовкам, помещенным в магнитное силовое поле, сообщают вращательное движение вокруг оси и осциллирующее движение вдоль оси. Возбуждаемый в сердечниках электромагнита поток пронизывает заготовки в диаметральной направлении. В контейнер с заготовками подается порошок, обладающий абразивными и магнитными свойствами и охлаждающая жидкость. Магнитное поле выполняет роль связки формирующей из отдельных абразивных зерен эластичный абразивный инструмент. Магнитное поле также обеспечивает силовое воздействие, с помощью которого абразиву сообщаются нормальные и тангенциальные силы резания. ОЖ – носитель поверхностно-активных веществ. В зоне обработки возникает процесс электролиза. Анодное растворение поверхностного слоя заготовок интенсифицирует процесс обработки. Анодное растворение поверхностных слоев абразива обеспечивает их самозатачиваемость.

### ***Контрольные вопросы***

1. Что такое главное движение резания?
2. Что такое передняя поверхность режущего инструмента?

3. Как влияет угол  $\gamma$  на процесс резания?
4. Что такое «главная составляющая силы резания»?
5. Что это за материалы: сталь У11А; ТТ8К6, ВШ-75, композит 05?
6. Как рассчитать передаточное отношение винтовой передачи?
7. Что такое автоматизация производства?
8. Какие поверхности обрабатывают точением?
9. На каких токарных станках обрабатывают партии несложных валиков?
10. Чем отличается строгание от долбления?
11. Какие поверхности обрабатывают на строгальных станках?
12. Чем отличается протягивание от прошивания?
13. В каких случаях используют: рассверливание, зенкерование, цекование, развертывание?
14. В чем различие методов обката и копирования при обработке зубчатых венцов?
15. Какими способами можно шлифовать отверстия в корпусных деталях?
16. Что такое хонингование?
17. Какие отделочные методы обработки наружных поверхностей Вы знаете?

## **ГЛАВА 16. ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗАГОТОВОК БЕЗ СНЯТИЯ СТРУЖКИ**

В связи с ужесточением требований к эксплуатационным характеристикам деталей машин в качестве финишных операций все чаще применяют поверхностное пластическое деформирование (ППД). ППД – метод обработки заготовок без снятия стружки, при котором пластически деформируется только поверхностный слой. Обработка ППД основана на способности металлической поверхности воспринимать остаточные пластические деформации без нарушения целостности металла. В ходе обработки квази шаровидная форма кристаллов поверхностных слоев заготовки изменяется. Кристаллы сплющиваются в направлении деформации, образуется упорядоченная структура волокнистого характера. ППД сопровождается упрочнением поверхностного слоя. Обработанные ППД детали становятся менее чувствительными к усталостному разрушению.

### ***16.1. Классификация методов поверхностного пластического деформирования (ППД)***

Все методы ППД можно разделить на две основные группы: статические и ударные. Особенностью статических методов является воздействие на обрабатываемую поверхность постоянной силой « $P$ » причем очаг деформации, возникающий от действия силы, последовательно перемещается по поверхности, подлежащей обработке. Инерционные силы не оказывают влияния на процессы деформации. К данным методам относятся: выглаживание (рис. 16.1, а), накатывание (рис. 16.1, б), а также однократное деформирование обрабатываемой поверхности без перемещения очага деформирования (рис. 16.1, в). Для ударных методов (рис. 16.1, г) характерно многократное воздействие инструментом или рабочими телами на обрабатываемую поверхность, при этом сила воздействия « $P$ » изменяется в течение каждого цикла от минимума до максимума. Если осуществляется

локальное ударное воздействие, то для обработки всей поверхности заготовки очаг деформации должен равномерно перемещаться по ней.

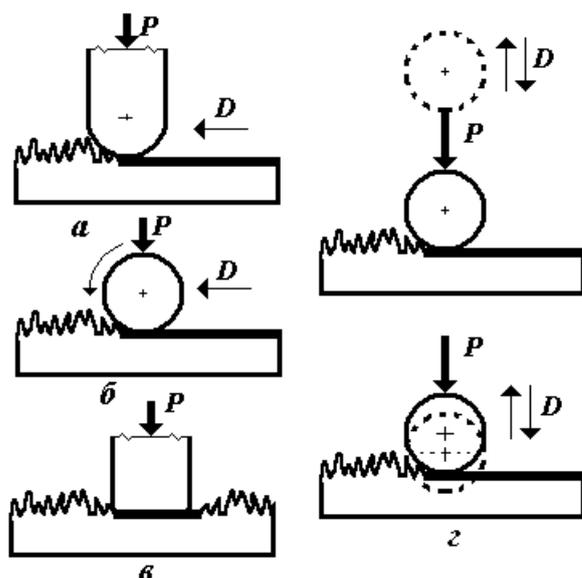


Рис. 16.1. Основные группы методов ППД: а, б, в – статические; г – ударные; D – перемещение инструмента или заготовки; P - сила воздействия.

В качестве инструментов для ППД могут быть использованы шарики и ролики с конструктивно определенными осями вращения и без них, выглаживатели, протяжки с деформирующими элементами (дорны), специальные бойки и чеканы. Рабочими телами при ППД являются стандартная дробь, специальные шарики, изготовленные из металлов и других конструкционных материалов. В качестве рабочих сред при поверхностном деформировании используются жидкости, газы или их суспензии с частицами абразива.

Основные принципиальные схемы обработки поверхностным пластическим деформированием приведены на [рис. 16.2](#).

Упрочняющее раскатывание (для внутренних поверхностей) и раскатывание (для наружных поверхностей) характеризуются качением инструмента по обрабатываемой поверхности. Выглаживание характеризуется скольжением инструмента по поверхности локально контактирующей с ним. Вибрационное накатывание и выглаживание характеризуются вибрационным перемещением инструмента. Поверхностное дорнование характеризуется поступательным скольжением инструмента по охватывающей обрабатываемой поверхности. Дробеструйная и дробеметная обработка характеризуются ударами рабочих тел (дробин) по

деформируемому металлу. В зависимости от источника кинематической энергии (струя газа, жидкость, газ с жидкостью, вращение ротора дробемета) различают обработку: пневмодробеструйную; гидродробеструйную; гидропневмодробеструйную; дробеметную.

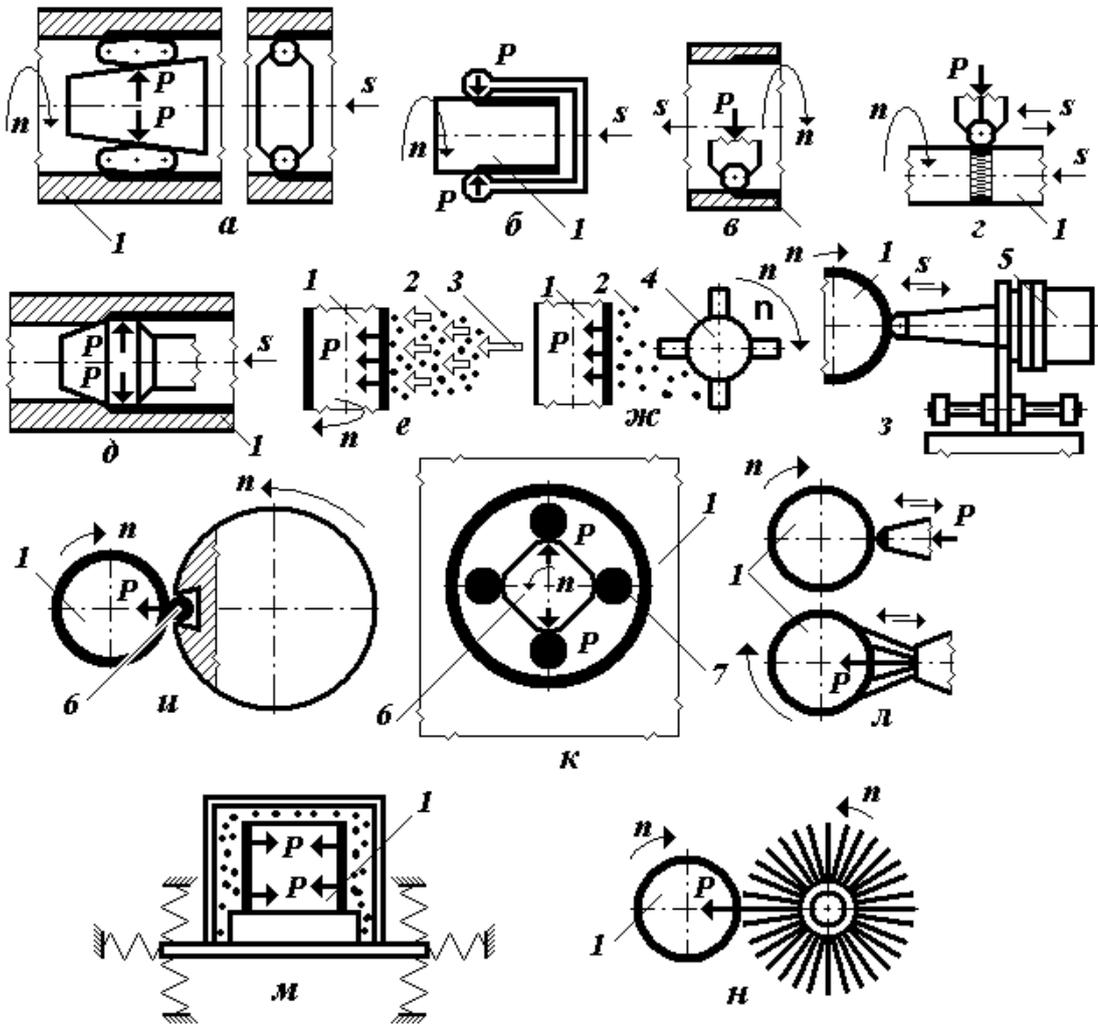


Рис. 16.2. Эскизы основных способов ППД:

а, б – упрочняющее раскатывание и обкатывание; в – выглаживание; г – вибрационное накатывание и выглаживание; д – поверхностное дорнование; е – дробеструйная обработка; ж – дробеметная обработка; з – ультразвуковая обработка; и – центробежная обработка; к – ударное раскатывание; л – упрочняющая чеканка; м – вибрационная ударная обработка; н – обработка механической щеткой; 1 – заготовка; 2 – дробь; 3 – струя газа и (или) жидкости; 4 – дробемет; 5 – УЗГ; 6 – опора; 7 – ролики; n – вращение

заготовки и (или) инструмента;  $s$  – перемещение заготовки и (или) инструмента;  $P$  – усилие деформирования.

Ультразвуковая обработка характеризуется добавлением ударов ультразвуковых колебаний к постоянной силе. Ударное раскатывание характеризуется ударным взаимодействием роликов с обрабатываемой поверхностью во время прохождения выступающих элементов опоры. Центробежная обработка характеризуется ударным взаимодействием роликов с обрабатываемой поверхностью под действием центробежной силы. Упрочняющая чеканка характеризуется ударным приложением деформирующей силы при возвратно – поступательном перемещении инструмента. Вибрационная ударная обработка характеризуется ударами рабочих тел об обрабатываемую поверхность заготовки в замкнутом пространстве при вибрационном перемещении заготовки. Обработка механической щеткой характеризуется ударами концами проволоки вращающейся механической щетки.

Если сравнить статические и ударные методы, близкие по прикладываемым усилиям и кратности их приложения, то можно выявить следующие закономерности. Меньшую шероховатость поверхности с большой относительной опорной длиной профиля обеспечивают статические методы ППД. Для достижения большей степени упрочнения, которая характеризуется повышением микротвердости, значений сжимающих остаточных напряжений и толщины упрочненного слоя, как правило, лучше применять ударные методы. Однако виброударная обработка поверхности может уступать по степени упрочнения накатыванию.

Обработка ППД тонкого поверхностного слоя имеет ряд преимуществ перед обработкой деталей резанием: Сохраняется целостность волокон металла. В поверхностном слое образуется мелкозернистая структура или даже текстура с анизотропными свойствами. Отсутствует шаржирование обрабатываемой поверхности абразивными частицами. Отсутствуют

дефекты, связанные с сильным нагревом заготовок в процессе обработки. Достигается минимальная шероховатость поверхности с большой относительной опорной длиной профиля. Стабильные режимы обработки, обеспечивающие стабильное качество поверхности. Возможность образования регулярных микрорельефов с заданной площадью смазочных канавок, что улучшает условия эксплуатации пар трения. В поверхностном слое создаются благоприятные сжимающие остаточные напряжения. Происходит плавное увеличение микротвердости поверхностного слоя заготовок. При правильном выборе метода и режимов обработки обеспечивается повышение износостойкости, сопротивления усталости, контактной выносливости и других эксплуатационных свойств обработанных деталей на 20...300%.

При выборе методов ППД необходимо учитывать следующие особенности: Геометрическая точность поверхностей деталей, обрабатываемых ППД не повышается. Сохраняется точность, достигнутая на предыдущей операции. При обработке тонкостенных и неравножестких деталей может происходить деформация поверхности из-за создания в поверхностном слое остаточных напряжений. При большом пластическом течении металла на кромках обрабатываемых поверхностей могут образовываться наплывы металла. Применение методов ППД, как правило, позволяет механизировать и автоматизировать процессы обработки, тем самым повышая производительность труда.

### ***16.2. Физические явления при ППД***

При обработке ППД в поверхностном слое заготовки происходят сложные взаимосвязанные явления: упругие и пластические деформации, процессы трения, температурные явления, а также диффузия и адгезия. Данные явления охватывают не только зону контакта инструмента с заготовкой, но и зоны находящиеся в непосредственной близости от нее. К основным параметрам ППД относятся упругая и пластическая деформация,

площадь контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, сила деформирования, напряжения, возникающие в материале под воздействием этой силы, а также кратность приложения силы.

При силовом воздействии образуется отпечаток от инструмента (рис. 16.3, а), причем по мере увеличения силы вначале происходит упругая деформация, а затем пластическая (рис. 16.3, б), линия  $OAB$ . При снижении силы возврат металла происходит по линии  $BC$ . Размер отпечатка « $d$ », соответствующий участку  $OC$ , отражает величину остаточной пластической деформации. При деформации металлов происходит межзеренное и внутризеренное сдвиговое перемещение, которое осуществляется за счет движения дислокаций по плоскостям скольжения. С увеличением деформации дислокации размножаются, взаимодействуют между собой и другими дефектами кристаллической решетки. При этом движение дислокаций затрудняется, а напряжение пластического течения  $\sigma_s$  и твердость ( $\sigma_s \approx 0,32HB$ ) металла повышаются. Явление увеличения сопротивления пластической деформации называется упрочнением или наклепом.

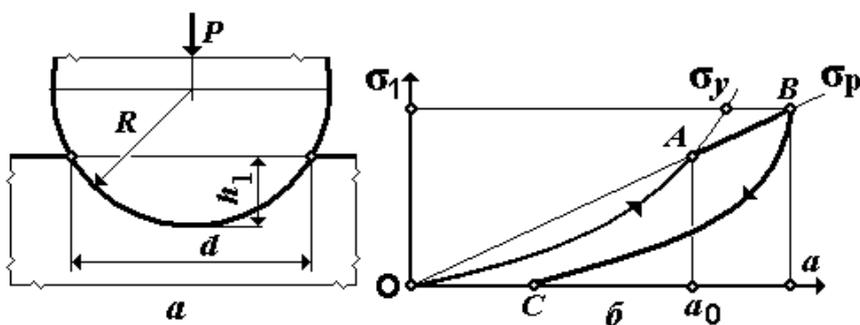


Рис. 16.3. Течение металла при сдавливании сферического индентора:  
а – отпечаток; б –

зависимость упругой ( $a_0$ ) и пластической ( $A_{\max}$ ) деформации от напряжения сдавливания  $\sigma_1$ ;  $\sigma_y$  - упругая деформация;  $P$  – статическая или ударная сила нагружения;  $OAB$  – линия упругой и пластической деформации;  $BC$  – линия обратного процесса;  $R$  – радиус индентора;  $d$  – размер отпечатка;  $h_1$  – глубина отпечатка;  $a$  – величина деформации.

Для описания явлений в очаге деформации и на поверхности контакта инструмента с деталью применяются основные положения теории пластичности и феноменологической теории разрушения. При этом любой процесс деформирования может быть описан интегралом под кривой упрочнения для определенного материала, полученной при испытании образцов по необходимой программе. За критерий оптимальности целесообразно принять энергоёмкость процесса обработки, влияющую на основные технико-экономические показатели. В качестве системы ограничений служат модели связей параметров качества с характеристиками метода обработки (МО). Энергоёмкость в свою очередь, целесообразно выразить через мощность процесса деформирования ( $N_{gi}$ ), которая при произвольном числе  $M$  этапов деформации определяется следующим

$$\text{образом: } N_{gi} = \sum_{j=1}^M \left[ \iiint_{(V)} \sigma_g(\varepsilon_g) \xi_g dV + N_{трг} \right].$$

Данный критерий характеризует не только усилие деформирования, но и скорость осуществления воздействия, чего не учитывает такой критерий, как работа деформации. Мощность, затрачиваемая на преодоление трения на контактных поверхностях инструмента с заборной конической частью и

детали, определяется по выражению:  $N_{gi} = \int_0^1 \int_0^{2\pi} V_{ск} \mu \sigma_s R dl d\varphi$ , где  $l$  – длина

контакта инструмента с деталью;  $h$  – глубина распространения деформации;

$V_{ск}$  – скорость скольжения;  $\mu$  – коэффициент трения по Зибелю (Прандтлю);

$\sigma_s$  – предел текучести обрабатываемого материала;  $R$  – радиус инструмента.

Для создания конкретных моделей взаимосвязей параметров качества с технологическими факторами, входящих в систему ограничений

используется феноменологическая теория разрушения В.Л. Колмогорова,

включающая в себя расчет интенсивности скоростей деформации сдвига,

накопленной деформации сдвига, среднего (гидростатического) давления,

интенсивности касательных напряжений, показателя напряженного

состояния и степени использования запаса пластичности (СИЗП).

Предварительный анализ очага деформации, возникающего при обработке детали деформирующим элементом с конической заборной частью позволяет подобрать для описания траектории движения частицы металла в очаге функцию, удовлетворяющую кинематическим условиям:  $V_{xI} = K_I xy$ , где  $V_{xI}$  - проекция скорости на ось  $X$  в  $I$  зоне;  $K_I$  - коэффициент пропорциональности. Используя данную функцию и условие постоянства объема, путем математических преобразований получаем компонент скорости перемещения частицы среды в первой зоне:  $V_{x1} = \frac{2U_1V}{l_1^2 h_0} xy$   $V_{y1} = \frac{U_1V}{l_1^2 h_0}$ , где  $U_1$  - перемещение в точке начала контакта деформирующего элемента с деталью;  $V$  - скорость перемещения инструмента;  $h_0$  - глубина очага деформации;  $l$  - длина первой зоны очага деформации. Компоненты скорости перемещения во второй зоне находятся из условия непрерывности нормальной составляющей скорости:

$$V_{x2} = \frac{2VtgCx}{h_0^2} \left( x - \frac{U_1 h_0}{l_1 tg \alpha} - l_1 \right) y; \quad V_{y2} = \frac{Vtg \alpha_{y2}}{h_0^2}. \text{ При рассмотрении третьей зоны}$$

очага деформации после некоторых преобразований и подстановок получаем:

$$V_{x3} = \frac{2Vtg \alpha}{h_0^2 l_3} \left( l_2 - \frac{U_1 h_0}{l_1 tg \alpha} \right) (l_1 + l_2 + l_3); \quad V_{y3} = \frac{Vtg \alpha}{h_0^2 l_3} \left( l_2 - \frac{U_1 h_0}{l_1 tg \alpha} \right) y^2.$$

После этого, можно определить: Компоненты тензора скоростей

$$\text{деформации: } \varepsilon_{xj} = \frac{\partial V_{xj}}{\partial x}; \varepsilon_{yj} = \frac{\partial V_{yj}}{\partial y}; \eta_{xyj} = \frac{\partial V_{xj}}{\partial y} + \frac{\partial V_{yj}}{\partial x}$$

$$\text{Интенсивность скоростей деформации: } \varepsilon_y = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{4\xi^2 x_j + \eta^2 xy_j}$$

Степень деформации:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{i(j-1)} + \frac{1}{V} \int_{L_{j-1}}^{L_j} \xi_{ij} dx$$

Интенсивность напряжений находим по кривой упрочнения:  $\sigma_j = \sigma_0 + A\varepsilon_{in}$ .

Среднее напряжение в первой и третьей внеконтактных зонах определяется, исходя из того, что на поверхности детали  $\sigma_y = 0$ :  $\sigma = 2\sigma_j \xi_y / 3\xi_i$ . Для нахождения среднего напряжения во второй контактной зоне воспользуемся уравнением равновесия и условием, что компоненты не являются функцией  $X$ :

$$\sigma = \frac{2B\xi_i x^n}{3\xi_i} + \frac{Vtg \alpha x^2}{h_0^2} + \frac{2Vtg \alpha x}{h_0^2} \left( \frac{U_1 h_0}{l_1 tg \alpha} + l_1 \right) + f_{3(y)}$$

Функцию  $f_{3(y)}$  можно определить, учитывая следующее условия:  $x=l_i$ ;

$\sigma = \sigma_A$ , где  $\sigma_A$  - среднее напряжение в точке начала контакта инструмента с

деталью. При этом:  $B = A \left( \frac{1}{V\sqrt{3}} \sqrt{4\xi^2 x_j + \eta^2 xy_j} \right)^n$ . Затем определяется показатель

напряженного состояния «К» и предельная накопленная деформация  $\varepsilon_p$ .

Степень использования запаса пластичности целесообразно определять по

формуле: 
$$\psi = \frac{1}{V} \int_0^{L_3} \frac{\xi dx}{\varepsilon_{p(k)}}$$
.

Для более глубокого понимания процессов, происходящих при ППД применяются расчетно-экспериментальные методы механики сплошных сред. Результаты исследования методом координатных сеток процесса обкатывания роликом наружной цилиндрической поверхности показаны на **рис. 16.4**. Они показывают изменения вдоль очага деформации скорости относительных удлинений  $\varepsilon_x^1$ ,  $\varepsilon_y^1$  и сдвигов  $\gamma_{xy}^1$ , интенсивности скоростей деформации сдвига «Г1», накопленной деформации сдвига «Г», степени использования запаса пластичности  $\psi$ , а также параметров и показателя напряженного состояния. Моделирование различных методов ППД позволяет получить ряд важных обобщенных выводов: Накопленная деформация сдвига и глубина упрочнения поверхностного слоя зависят от размеров очага деформации и кривизны деформирующего инструмента, характеризуемой его профильным радиусом. Степень упрочнения обрабатываемого металла и контактные напряжения зависят от накопленной деформации сдвига и параметров кривой упрочнения. Контактные напряжения, достигнув определенного значения, стабилизируются в соответствии с кривой упрочнения металла. Для получения оптимальных параметров качества допустимые пределы степени деформации сдвига поверхностного слоя лежат в пределах 0,5...0,8. В результате трения инструмента об поверхность обрабатываемой заготовки при ППД наблюдается повышение температуры очага деформации, при этом нагревается инструмент, заготовка и

окружающая среда. Данный процесс характеризуется локальным нагревом и быстрым отводом теплоты внутрь заготовки. Время нагрева зависит от скорости, приложенного усилия и размеров инструмента.

В зависимости от режимов обработки температура очага деформации может достигать при обкатывании  $300...400^{\circ}\text{C}$ , при выглаживании –  $600...700^{\circ}\text{C}$ , при ударных методах –  $800...1000^{\circ}\text{C}$ . При таких температурах в обрабатываемых металлах могут происходить физические явления, которые приводят к снижению степени упрочнения, переходу сжимающих напряжений в растягивающие и образованию усталостных трещин.

Вследствие этого, при выборе усилий и скоростей обработки необходимо учитывать допустимые температуры для конкретных конструкционных материалов. При необоснованном увеличении усилия обработки в поверхностном слое детали образуются микро- и макротрещины, происходит отслаивание частичек металла с поверхности, что отрицательно сказывается на прочности и износостойкости.

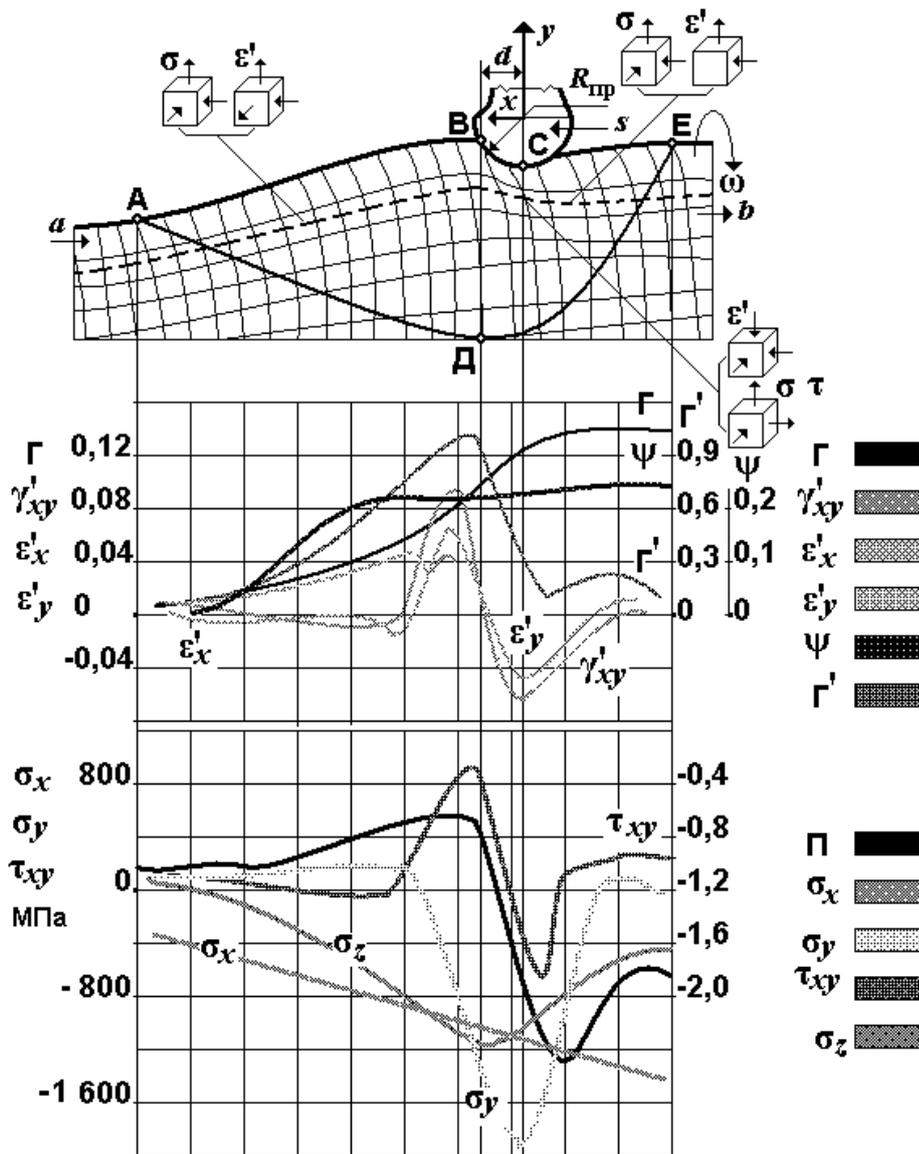


Рис. 16.4. Результаты исследования методом координатных сеток процесса обкатывания вала роликом:  $\epsilon'_{x1}$ ,  $\epsilon'_{y1}$ ,  $\gamma'_{xy1}$  - скорости относительных удлинений и сдвигов;  $\Gamma$  - интенсивность скоростей деформации сдвига;  $\psi$  - степени использования запаса пластичности.

### Контрольные вопросы

1. В чем особенность статических методов ППД?
2. В чем преимущества ППД перед обработкой резанием?
3. Перечислите и охарактеризуйте основные разновидности ППД?
4. Какие физические явления происходят в поверхностных слоях при обработке ППД?

## **ГЛАВА 17. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗАГОТОВКИ**

Электрофизические (ЭФ) и электрохимические (ЭХ) методы используются для формообразования поверхностей заготовок из труднообрабатываемых материалов (весьма вязких, твердых и очень твердых, керамических, металлокерамических). ЭФ и ЭХ методы позволяют обрабатывать сложные фасонные внешние и внутренние поверхности; обрабатывать отверстия малых диаметров и т.д. При ЭФ и ЭХ механические нагрузки на обрабатываемую поверхность настолько малы, что практически не влияют на точность обработки. Эти методы, в ряде случаев, дают незначительный дефектный слой, не образуют наклепа обработанной поверхности, устраняют прижоги после шлифования, повышают эксплуатационные характеристики поверхностного слоя (износостойкость, коррозионную стойкость, прочность). Простота кинематических цепей станков для ЭФ и ЭХ позволяет обеспечивать точное регулирование процессов формообразования и автоматизацию обработки.

Все ЭФ и ЭХ методы условно можно разделить на: электроэрозионную обработку (электроискровая, электроимпульсная, электроконтактная); электрохимическую (электрохимическая, анодно-механическая); химическую (химическая, химико-механическая); импульсно-механическую (ультразвуковая, электрогидравлическая); лучевую (светолучевая, электронно-лучевая); плазменную и взрывную.

### ***17.1. Электроэрозионная обработка***

Электроэрозионная обработка основана на разрушении (эрозии) электродов при пропускании между ними импульсов электрического тока.

Электрический разряд между электродами происходит в газовой среде или при заполнении межэлектродного промежутка диэлектрической жидкостью (керосин, минеральное масло). Эрозия электродов в жидкой среде происходит значительно интенсивнее. При замыкании электрической цепи

ионизируется межэлектродное пространство. При достижении пороговой разности потенциалов образуется канал проводимости, по которому проходит искровой или дуговой разряд. За время  $10^{-5} \dots 10^{-8}$  с плотность тока возрастает до  $8 \dots 10$  кА/мм<sup>2</sup>. В результате, температура на поверхности заготовки – электрода возрастает до  $10000 \dots 12000^\circ\text{C}$ . При таких температурах мгновенно оплавляется и испаряется элементарный объем материала заготовки. Следующий импульс тока пробивает межэлектродный промежуток там, где расстояние между электродами окажется минимальным. Эрозия металла происходит до тех пор, пока расстояние между электродами не окажется больше критического ( $0,01 \dots 0,05$  мм). При сближении электродов, процесс эрозии повторяется. Кроме теплового воздействия, на заготовку действуют электростатические, электродинамические силы и кавитационные явления.

Электроискровая обработка (ЭО) основана на использовании импульсного искрового разряда между анодом (заготовкой) и катодом (инструментом). Принципиальная схема установки ЭО показана на [рис. 17.1](#).

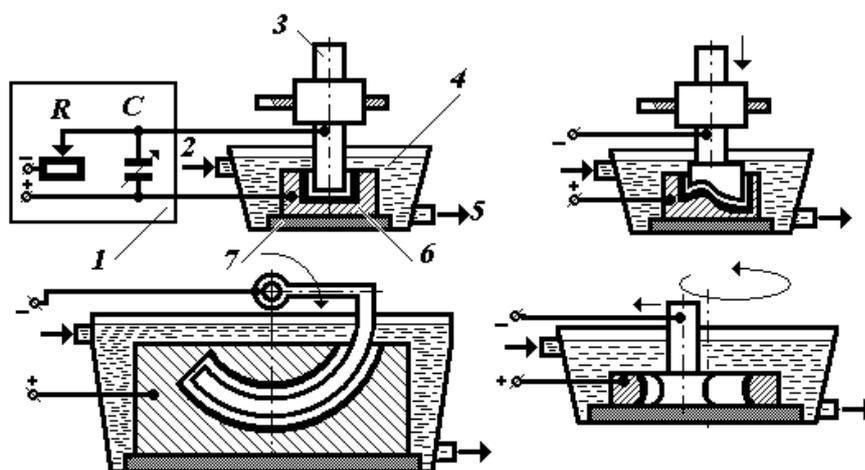


Рис. 17.1. Схема электроискровой обработки: 1 – R-C генератор; 2 – подача электролита; 3 - инструмент – электрод; 4 – диэлектрическая жидкость; 5 – слив электролита; 6– заготовка; 7– изолятор.

В ванне с диэлектрической жидкостью 4 размещены: подставка – изолятор 7 и заготовка 6. Между заготовкой и инструментом 3 пропускается

импульсный ток с амплитудой 100...200 в. импульс продолжительностью 20...200 мкс генерируется  $RC$  генератором 1. В зависимости от энергии импульса, различают обработку на: особо мягких, мягких, средних и жестких режимах. Мягкие режимы позволяют вести обработку с размерной точностью до 2 мкм и шероховатостью обработанной поверхности до  $R_z$  0,32 мкм. Обработка на средних и жестких режимах позволяет получать: фасонные открытые полости (полость штампа); цилиндрические отверстия с радиусной осью; прошивать сквозные отверстия любой поперечной формы диаметром 1-50 мм; разрезать заготовку и т.д. обработка на особо мягких режимах, позволяет: шлифовать внутреннюю поверхность особо точных отверстий малого диаметра (фильер) и окончательно отделявать заготовку. ЭО применяется для изготовления: штампов; пресс-форм; фильер; режущего инструмента; деталей топливной аппаратуры двигателей; сеток; сит; для повышения износостойкости, жаростойкости и коррозионной стойкости поверхности деталей машин; стойкости режущего инструмента; создания шероховатости под последующее гальваническое покрытие; легирования поверхностных слоев; увеличения размеров изношенных деталей. Сущность процесса заключена в образовании мелкодисперсной закалочной структуры и в легировании поверхностных слоев материала анода при искровом разряде в воздушной среде. Электроискровому упрочнению подвергают кулачки, фиксаторы, направляющие, прижимы, толкатели, стержни выпускных клапанов, клинья, пазы, шлицы, отверстия. Электроискровое упрочнение требует предварительной подготовки заготовок: удаление загрязнений, заусенцев и пятен коррозии; обеспечение шероховатости обрабатываемой поверхности не более  $R_z$ 80.

Электроимпульсная обработка основана на повышенной эрозии анода при подаче импульсов малой и средней продолжительности. При импульсах большой продолжительности (дуговой разряд) значительно быстрее разрушается катод.

Униполярные импульсы создаются электромашинным 7 (рис. 17.2) или электронным генератором. Продолжительность импульса составляет 500...10000 мкс. Заготовку 5 размещают на изоляторе 6 в ванне с диэлектрической жидкостью 3. При данной обработке инструмент 2 изнашивается значительно медленнее, чем при электроискровой. Значительная мощность импульса обеспечивает высокую производительность, но малую точность обработки. Поэтому метод целесообразно применять для черновой обработки обширных полостей, фасонных наружных поверхностей и отверстий.

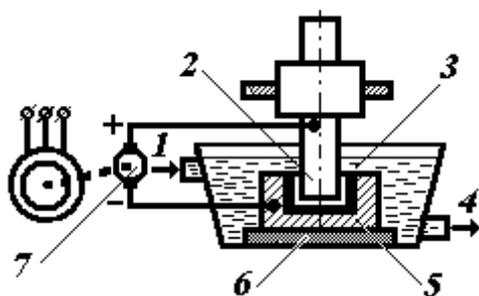


Рис. 17.2. Схема электроимпульсной обработки: 1 – подача электролита; 2 – инструмент; 3 - диэлектрическая жидкость; 4 - слив электролита; 5 - заготовка; 6 – изолятор; 7 – электромашинный генератор.

Высокочастотная электроискровая обработка основана на использовании высокочастотных (100...150 кГц) импульсов при малых энергиях разряда. Производительность метода в 30...50 раз выше по сравнению с электроискровой обработкой, при одновременном повышении точностных параметров обработанной поверхности. Схема установки показана на рис. 17.3. Заготовка 7 и инструмент 8 установлены в ванне с диэлектрической жидкостью 2. Постоянное напряжение от выпрямителя 5 разрывается прерывателем тока 4 и подается на первичную обмотку импульсного трансформатора 3. Включение заготовки и инструмента во вторичную цепь трансформатора позволяет избежать возникновения дугового разряда.

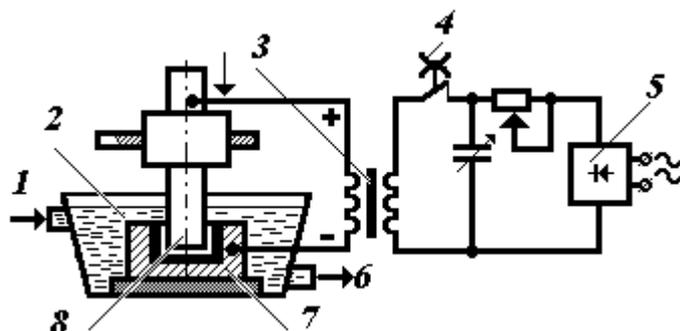


Рис. 17.3. Схема высокочастотной электроимпульсной обработки:

1 - подача электролита; 2 - диэлектрическая жидкость; 3 – трансформатор; 4 – прерыватель тока; 5 – выпрямитель; 6 - слив электролита; 7 - заготовка; 8 – инструмент.

Электроконтактная обработка основана на локальном нагреве заготовки *1* (рис. 17.4) в месте ее контакта с инструментом – электродом *2* и удалении размягченного или расплавленного материала из зоны обработки механическим путем. Источником образования теплоты в зоне обработки является импульсный дуговой разряд. Питание электрической цепи производится трансформатором *3* через контактор. Электроконтактную обработку применяют при сверлении, точении, резании заготовок.

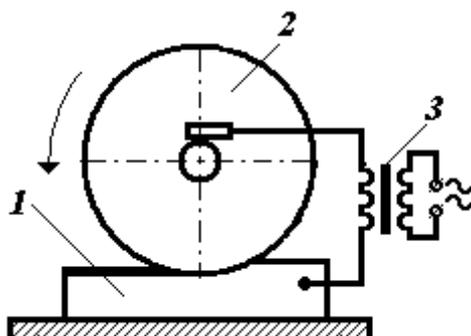


Рис. 17.4. Схема электроконтактной обработки: 1 - заготовка; 2 – инструмент; 3 – трансформатор.

## 17.2. Электрохимическая обработка (рис. 17.5)

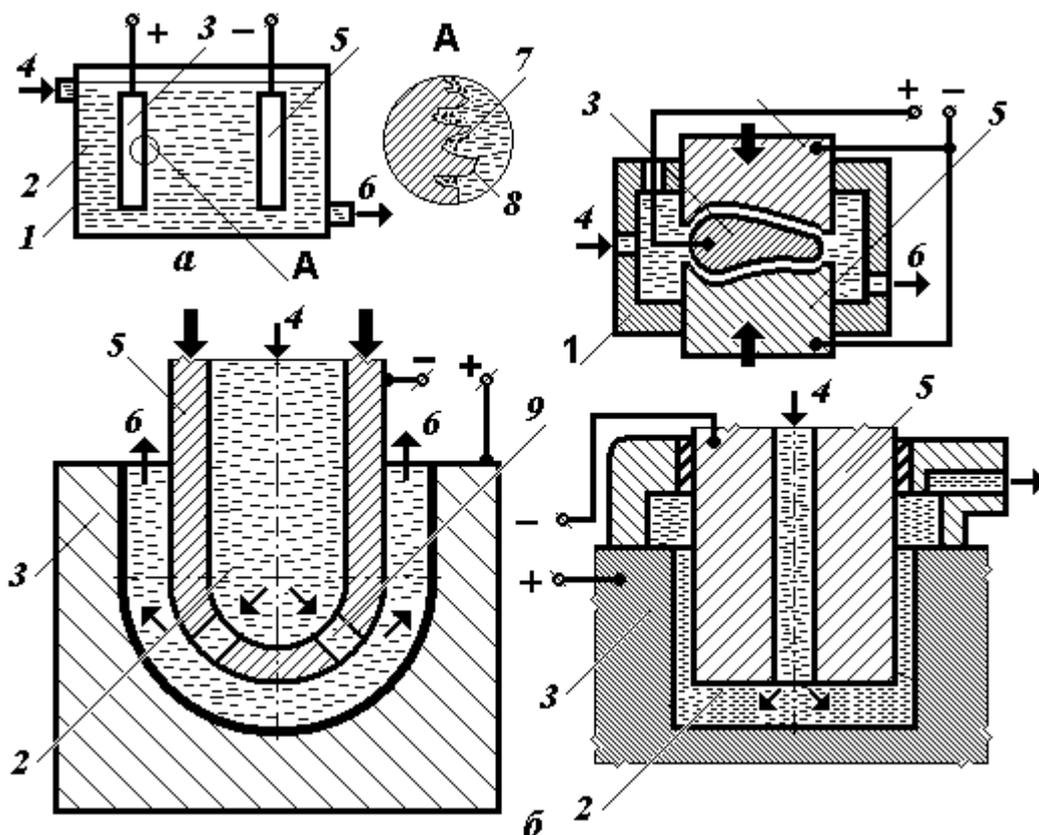


Рис. 17.5. Схемы электрохимической обработки: а – полирование; б – размерная обработка: 1 – ванна; 2 – электролит; 3 – заготовка; 4 – подача электролита; 5 – катод; 6 – слив электролита; 7 – продукты растворения; 8 – микронеровности; 9 – отверстие.

Электрохимическая обработка основана на анодном растворении выступов и впадин микронеровностей при электролизе. При прохождении постоянного электрического тока через электролит 2 (рис. 17.5, а), на поверхности анода – заготовки 3 происходят химические реакции, и поверхностные слои металла превращаются в химические соединения. Продукты электролиза переходят в раствор или удаляются механическим способом.

При электрохимическом полировании (рис. 17.5, а) заготовку помещают в ванну 1 с электролитом. В зависимости от обрабатываемого материала, электролитом служат растворы кислот или щелочей. Заготовку подключают к аноду. Катодом 5 служит пластина из свинца, меди или стали. При замыкании электрической цепи начинается растворение материала анода.

Растворение идет по выступам микронеровностей 8 (наибольшая плотность тока – на вершинах выступов). Продукты растворения 7 (окислы или соли, имеющие пониженную проводимость) заполняют впадины и препятствуют растворению металла. Избирательная скорость растворения по выступам и впадинам сглаживает микронеровности. Обработанная поверхность получает металлический блеск.

Электрохимическое полирование уменьшает глубину микротрещин, не деформирует заготовку, исключает термические изменения структуры. Способ позволяет обрабатывать нежесткие заготовки одновременно по всей поверхности. Наибольшее применение способ получил для финишной обработки режущих инструментов.

Особенностью электрохимической размерной обработки (рис. 17.5, б) является электролиз в струе электролита прокачиваемого под давлением через межэлектродный промежуток, образуемый заготовкой – анодом 3 и инструментом – катодом 5. Одновременно, струя электролита удаляет продукты электролиза из рабочей зоны. Способ позволяет одновременно обрабатывать всю поверхность заготовки, находящуюся под воздействием катода (необрабатываемые участки поверхности изолируются). Способ позволяет обрабатывать нежесткие заготовки, сложно – фасонные заготовки; фасонные полости или фасонные глухие (сквозные) отверстия в труднообрабатываемых материалах. При обработке полостей или отверстий электролит подается по сквозному или глухому центральному каналу катода через отверстия 9.

Особенность электроабразивной обработки состоит в том, что катодом является абразивный инструмент 2 (рис. 17.6, а) выполненный на электропроводящей связке (например, бакелитовая с графитным наполнителем). Между заготовкой – анодом 1 и инструментом имеется межэлектродный зазор за счет абразивных зерен 3, выступающих из связки. В этот зазор подается электролит 4. До 90% припуска 5 удаляется за счет анодного растворения, 10...20% припуска удаляется механической

обработкой. При использовании алмазного абразивного инструмента (электроалмазная обработка) анодным растворением удаляется до 75% припуска. Способ применяется для отделочной обработки нежестких заготовок и заготовок из труднообрабатываемых материалов.

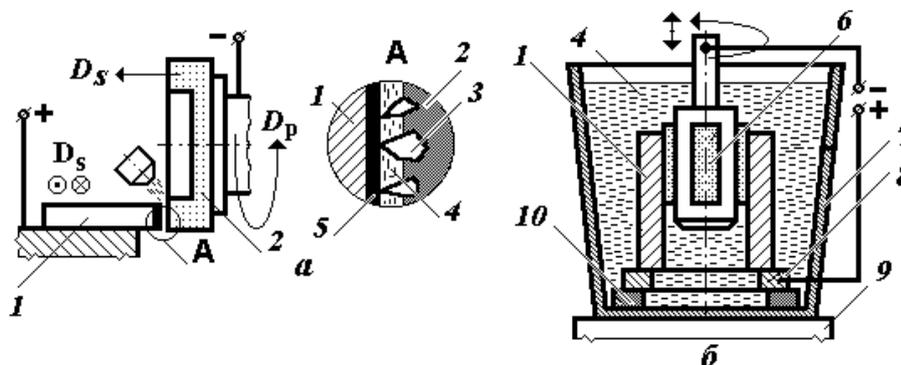


Рис. 17.6. Схемы электроабразивной обработки: а – шлифование; б – хонингование: 1 – заготовка; 2 – инструмент; 3 - абразивные зёрна; 4 – электролит; 5 – припуск; 6 – хонинговальная головка; 7 – ванна; 8 – токосъёмное кольцо; 9 – стол; 10 – изолятор.

При электрохонинговании (рис. 17.6, б) заготовку 1 устанавливают на токосъёмное кольцо 8 и изолятор 10 и помещают в ванну 7 с электролитом. Ванну устанавливают на стол 9 хонинговального станка. Кинематика процесса аналогична кинематике обычного хонингования. Однако хонинговальная головка 6 оснащена не абразивными брусками, а брусками из липы, ольхи или пластмассы. Предварительное хонингование ведут в растворе электролита  $NaNO_3$  с добавлением абразивного порошка зернистостью не более M28. Окончательное хонингование ведут в том же электролите, но добавкой окиси хрома. Способ обеспечивает более низкую шероховатость поверхности –  $R_a 0.04 \dots 0,16$  мкм (зеркальный блеск) и повышение производительности обработки в 4-5 раз.

Анодно-механическая обработка (АМО) основана на комбинированном механическом, электроэрозионном и электрохимическом воздействии на материал заготовки (рис. 17.7).

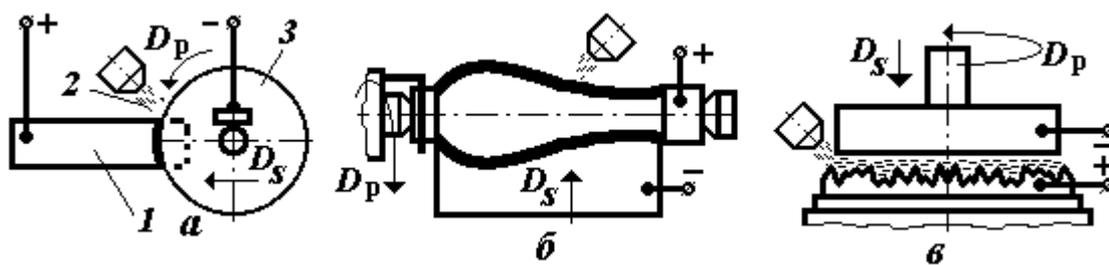


Рис. 17.7. Схемы анодно-механической обработки: а – разрезание; б – точение; в – обработка плоскости: 1 – заготовка; 2 - сопло для подачи электролита; 3 – инструмент.

Заготовку – анод 1 и режущий инструмент – катод 3 включают в общую электрическую цепь постоянного тока. В зазор между ними подают электролит 3 (обычно, жидкое стекло – водный раствор силиката натрия). Вследствие анодного растворения на заготовке образуется защитная пленка, которая разрушается режущим инструментом. При снятии пленки между выступающими частями электродов происходят электрические разряды, что приводит к электрической эрозии. Применение комбинации из трех процессов позволяет за счет регулирования энергии отдельных составляющих проводить обработку в широких пределах. При черновой обработке операцию выполняют при больших плотностях тока. Основное значение имеет тепловое электроэрозионное воздействие, приводящее к интенсивному снятию материала заготовки в результате плавления и взрывообразного испарения металла в среде электролита. Анодное растворение необходимо только для образования защитной пленки, обеспечивающей концентрацию дуговых разрядов на вершинах микронеровностей. Механическое воздействие обеспечивает вынос продуктов разрушения из зоны обработки. Чистовую обработку осуществляют при малых плотностях тока. Основное значение имеет механизм анодного растворения и механического разрушения пленки. Эти процессы текут по вершинам микронеровностей, что позволяет существенно уменьшить шероховатость поверхности и повысить точность обработки.

АМО подвергаются все токопроводящие материалы, высокопрочные и труднообрабатываемые сплавы; твердые сплавы; вязкие материалы. АМО позволяет разрезать заготовки, прорезать пазы и щели, точить заготовки, обрабатывать плоские поверхности, полировать поверхности, затачивать режущий инструмент.

### ***17.3. Импульсно-механическая обработка***

Ультразвуковая обработка (УЗО) основана на явлении магнитострикции, т.е. способности сердечника из ферромагнитных материалов изменять свои поперечное сечение и длину под воздействием переменного магнитного поля. Этим эффектом обладают: никель, железокобальтовые и железоалюминиевые сплавы, феррит.

Принципиальная схема УЗО показана на **рис. 17.8, а**. Заготовку 2 помещают в ванну 3 заполненную абразивной суспензией 1. К заготовке подводят инструмент – пуансон 4, закрепленный на торце концентратора 11.

Концентратор закреплен в магнитострикционном сердечнике 6, установленном в кожухе 5. Через кожух пропускают охлаждающую жидкость. Колебания сердечника возбуждаются с помощью генератора ультразвуковой частоты 8 (частота 16...30 кГц; амплитуда колебаний 5...10 мкм) и источника постоянного тока 9. Абразивную суспензию прокачивают насосом 12 через систему: ванна – резервуар 13. Концентратор 11 увеличивает амплитуда колебаний до 40...60 мкм. Колебательные движения инструмента передаются абразивным зернам суспензии. В результате соударений об обрабатываемую поверхность, абразивные зерна скалывают микро частички материала заготовки. Большое число соударений (до 30000 в секунду) и кавитация обуславливают интенсивное разрушение поверхностного слоя заготовки.

УЗО применяется для обработки (**рис. 17.8, б**): сквозных и глухих отверстий различного поперечного сечения; фасонных полостей; разрезания заготовок и т.п. При помощи УЗО обрабатывают хрупкие твердые материалы: стекло,

керамику, твердые сплавы, кремний, кварц, алмазы; цементированные, азотированные и закаленные стали.

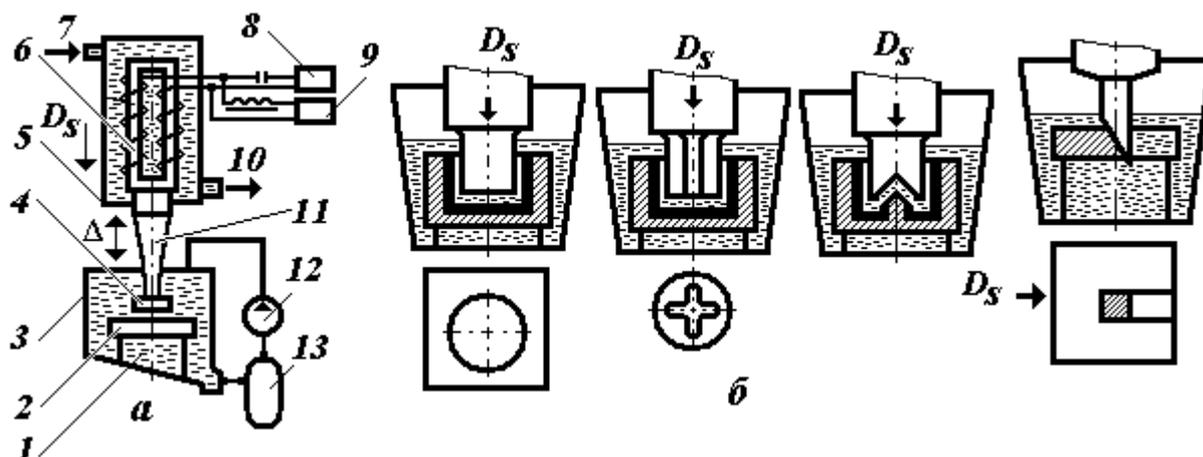


Рис. 17.8. Схемы ультразвуковой обработки: а – схема установки; б – примеры обработки: 1 – суспензия; 2 – заготовка; 3 – ванна; 4 – пуансон; 5 – кожух; 6 – сердечник; 7 – подача охлаждающей жидкости; 8 - генератор; 9 – источник постоянного тока; 10 – слив охлаждающей жидкости; 11 – концентратор; 12 – насос; 13 – резервуар.

#### 17.4. Лучевая обработка

Лазерная обработка относится к светолучевым методам упрочнения или снятия поверхностных слоев заготовки. Метод основан на воздействии светового луча высококонцентрированной энергии на поверхность заготовки. Источником светового излучения является оптический квантовый генератор (ОКГ) – лазер. Лазерную обработку применяют для прошивания сквозных и глухих отверстий, разрезания заготовок, фасонной резки листового металла, прорезания пазов, термической обработки поверхности заготовки.

Лазерная закалка применяется в тех случаях, когда закалка другими способами затруднительна. Поверхностное упрочнение лазером характеризуется следующими особенностями: Упрочнение локальных по глубине и площади участков. Локальное упрочнение полостей недоступных обычным методам закалки. Отсутствие коробления заготовки. Получение, при необходимости, заданной микрошероховатости обработанной поверхности. Возможность легирования поверхностного слоя. Простота

автоматизации процесса. Упрочнению подвергаются углеродистые, малоуглеродистые, легированные и высоколегированные стали: У8А; У10А; 45; ХВГ; 9ХС; Х12; ШХ15; Р18; Р6М5К5Ф3 ...

Лазерная закалка основана на местном нагреве поверхности до температур лежащих в зоне «фазовые превращения - плавление» и высокоскоростном охлаждении поверхности за счет отвода тепла к сердцевине заготовки. В результате образуется мелкозернистый мартенсит и остаточный аустенит. Глубина упрочнения – до 0,2 мм. Средняя производительность упрочнения: в атмосфере аргона – до 500 мм<sup>2</sup>/мин (закалка в атмосфере аргона предохраняет зону обработки от обезуглероживания); на воздухе – до 800 мм<sup>2</sup>/ мин. Глубина упрочненного слоя  $Z$ :  $Z = \sqrt{a \times \tau}$ , где:  $a$  – коэффициент температуропроводности;

$\tau$  - длительность импульса лазерного воздействия.

Ответственные детали, работающие в условиях повышенных давлений с малой площадью контакта (клапаны, седла клапанов, распределители) изготавливаются из высокохромистых аустенитных сталей (1Х17Н2, Х18Н10Т) с наплавкой стеллита. Структура стеллита представляет собой твердый раствор на основе кобальта на фоне эвтектики. Его химический состав: углерод – 1,6...2,3%; кремний – 1,5...2,5%; хром – 26...32%; кобальт – 59...65%; вольфрам – 4...5%; остальное – железо. Различие в коэффициентах линейного расширения исключают обычные виды термообработки. Локальность нагрева поверхности заготовки лазером позволяет упрочнять стеллит. Упрочненная зона образуется последовательными пятнами фокусированного лазерного облучения с перекрытием 0,75 диаметра пятна, шириной 0,6 мм.

Оптимальные режимы упрочнения стеллита: напряжение накачки 980в; энергия импульса 8Дж; длительность импульса 4 мс; количество импульсов в фокальном пятне 1...8; фокусное расстояние оптической системы 37мм; диаметр зоны проплавления 0.4...0,6мм. Лазерное упрочнение приводит к повышению твердости *HRC* 49...50.

### *17.5. Плазменная обработка*

Сущность (ПЛО) заключается в том, что плазму (направленный поток ионизированных частиц газа, имеющих температуру до 20000°С) направляют на обрабатываемую поверхность. Поток плазмы можно разрезать и сваривать различные сплавы, наплавлять на заготовку различные покрытия. Высокая температура и скорость плазменной струи обеспечивают получение тепловой энергии высокой концентрации. Поэтому, ПЛО обеспечивает высокую производительность резания при относительно высокой шероховатости обработанной поверхности. Для обработки заготовок применяются головки как с выделенной, так и с совпадающей дугой. Горелки с выделенной дугой более удобны для металлорежущих станков, но эффективность их меньше.

ПЛО применяется для обработки любых материалов: прошивки отверстий; резания заготовок; раскроя листового материала; совмещенного с резанием точения, строгания, шлифования (плазменно-механическая обработка). Наиболее часто ПЛО применяется для резания листового материала. Горелки с выделенной дугой используют для резания тонколистовых металлов и неэлектропроводных материалов. Горелки с совпадающей дугой применяют для резания толстолистовых металлов (листы из алюминиевых сплавов – толщиной до 125 мм; стальные листы – до 100 мм).

Плазменно-механическая обработка (ПМО) заключается в использовании плазменной дуги для создания очага высокой концентрации тепла, локализованного в зоне резания непосредственно перед режущей кромкой. Высокая эффективность ПМО достигается при строгом согласовании воздействия плазменной струи и режущего инструмента. Эти воздействия осуществляются последовательно с задержкой по времени в несколько долей секунды. Плазменная струя воздействует на обрабатываемую поверхность, при этом режимы дуги и резания подбирают таким образом, чтобы глубина зоны интенсивного нагрева соответствовала толщине срезаемого слоя, а

температура материала, формирующего поверхностный слой заготовки, оставалась существенно ниже температуры начала структурных превращений. Плазменную горелку (плазматрон) располагают таким образом, чтобы анодное пятно контакта дуги постоянно находилось в центральной точке нагрева.

При ПМО получается сливная стружка кинжальной формы. Эта стружка опасна для станочника, и поднимаясь вверх, может замкнуть сопло плазматрона. Поэтому у режущего инструмента необходимо предусматривать стружколомные канавки. Выделяемые при ПМО вредные пары требуют снабжения каждой установки системы местной вентиляции. ПМО применяется для резания труднообрабатываемых материалов: высокохромистых сталей; никелевых и кобальтовых сплавов; жаропрочных сталей; заклеенных сталей.

### ***Контрольные вопросы***

1. На каких физико-химических процессах основаны электроэрозионная и электрохимическая обработки заготовок?
2. В чем особенность электроабразивной обработки?
3. Как работает установка для УЗО?
4. В каких случаях используется ПЛО?

## ***ГЛАВА 18. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ И ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ***

Технологический процесс изготовления изделий из композиционных и порошковых материалов имеет ряд организационных и технологических особенностей.

### ***18.1. Изготовление изделий из композиционных материалов***

На первой стадии создания изделия из композиционного материала (КМ) разрабатывается конструкции самого изделия, определяются необходимые его эксплуатационные свойства. На второй стадии производится выбор компонентов КМ, их концентрации, формы и ориентации наполнителя (армирующего волокна). На третьей стадии определяются оптимальные технологические процессы производства, позволяющие получить изделие заданной формы и свойств.

На практике не существует универсального технологического процесса, пригодного для получения любого изделия из КМ. Неудачный выбор компонентов, ошибки в выборе технологического метода и режимов обработки приводят к получению изделий со свойствами, не отвечающими условиям его эксплуатации. Поэтому, получение изделий из КМ это единый взаимосвязанный процесс, в котором получение самого КМ и изделия из него часто происходят одновременно.

#### ***Волокна для армирования композиционного материала***

Для армирования КМ с металлической матрицей используются высокопрочные волокна углерода, бора, карбида кремния и вольфрама, оксидов алюминия и циркония, проволоку из стали, вольфрамовых или молибденовых сплавов, нитевидные кристаллы.

Волокна углерода или бора используют для армирования КМ с алюминиевой или магниевой матрицей (температура длительной эксплуатации 300...400°C). Применение волокон бора с покрытием из

карбида кремния позволяет поднять температуру эксплуатации изделия до 600°С.

Волокна из карбида кремния и вольфрама используют для армирования жаропрочных КМ с матрицей из никелевохромистых сплавов (1100...1300 °С). Применение волокон из оксидов алюминия или циркония позволяет поднять температуру длительной эксплуатации изделия до 1400...1600 °С.

Проволоку из стали, вольфрамовых и молибденовых сплавов используют для армирования высокопрочных КМ.

Армирование нитевидными кристаллами (усами) для получения высокопрочных и жаропрочных КМ.

Физико-механические свойства армирующих волокон проведены в **табл. 18.1.**

Таблица 18.1.

Волокно	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности на растяжение, МПа	Модуль упругости, в МПа	Диаметр волокна, мкм
Углерода	1400-2000	до 3500	до 700000	5-12
Бора	2400-3000	до 3800	до 400000	10-12
Карбида кремния	3200-3500	1770-2500	до 480000	10-15
Усы из карбида кремния	3300	21000	490000	3-5

#### Получение полуфабрикатов и изделий

На начальном этапе необходимы вспомогательные операции очистки, мойки, сушки волокон, объединение их в жгуты или каркасы, получение элементарных соединений «матрица - волокно», сборка слоев.

Из разориентированных волокон (кристаллов) изготавливают полуфабрикаты в виде войлок или матов, используя жидкостные, вакуумные воздушные или гравитационные способы войлокования. На **рис. 18.1** показан жидкостный способ. Суспензия 1 из питающего бака поступает на сетку 2 транспортера 7. Сетка покрыта фильтровальной бумагой. Слой суспензии

проходит над камерами 6 для отсоса жидкости. Прижимными валками 3 войлок 5 уплотняется и поступает в печь 4, где просушивается или спекается.

Для получения армирующих ориентированных элементов используется текстильная технология – волокна соединяют в пряжу (нить из коротких волокон соединенных путем кручения). Пряжа используется непосредственно или сшивается в ткань (ленту).

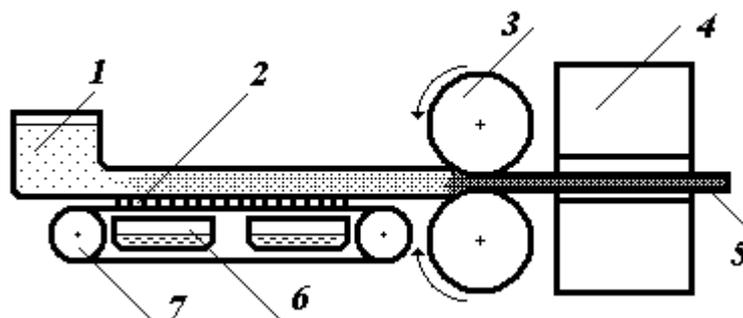


Рис. 18.1. Схема жидкостного войлокования коротких волокон:

1 – суспензия; 2 – сетка с фильтрованной бумагой; 3- прижимные валки; 4 – печь; 5 – войлок; 6 – камеры для отсоса жидкости; 7 – транспортер.

Жесткие волокна (вольфрама, молибдена, ниобия и их сплавов) ориентируют в виде пакетов, лент, рулонов (рис. 18.2). Пакеты получают за счет послойной укладки рифленой фольги 1 из материала матрицы, армирующих волокон 4 и волокон 3 из материала матрицы или другого материала. Вся система объединяется полосами 2 из материала матрицы. Ленты получают за счет поочередной укладки армирующих волокон и волокон из материала матрицы. Для закрепления волокон на них наносится тонкий слой материала матрицы. При необходимости, ленты сматываются в рулоны.

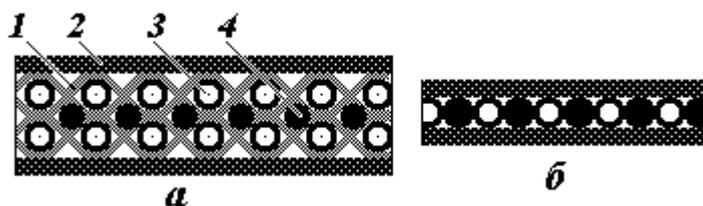


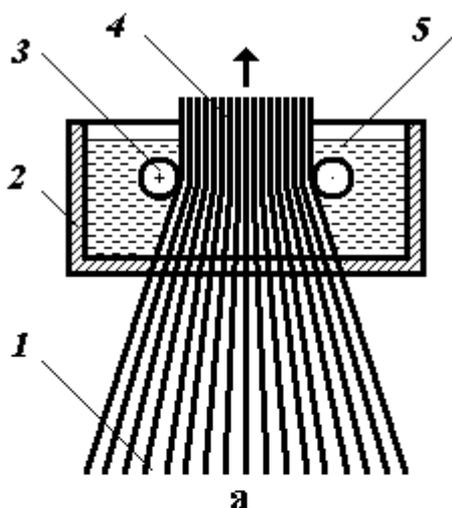
Рис. 18.2. Армированные пакеты (а) и ленты (б): 1 - рифленая фольга; 2 – полосы матрицы; 3, 4 – волокна.

Полуфабрикаты обычно выпускаются в виде листов, труб, профилей. Основой производства полуфабрикатов и изделий служат так называемые препреги – однослойные ленты с одним рядом армирующих волокон или тканей пропитанных или покрытых (с одной или с двух сторон) материалом матрицы.

Все технологические способы получения препрегов, полуфабрикатов и изделий из МКМ делятся на четыре группы: парогазофазные, жидкофазные, твердожидкофазные и твердофазные.

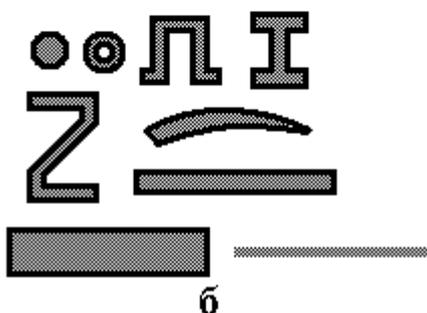
Парогазофазные способы заключаются в нанесении на волокна жгута, ленты или ткани специальных покрытий (барьерных, технологических). Этот способ обладает низкой производительностью и не применяется для полного компактирования МКМ. Жидкофазные способы являются универсальными как для получения самих МКМ, так и для получения полуфабрикатов и изделий из них. К этим способам относятся протяжка волокон, жгутов или тканей через расплав материала матрицы, пропитка препрегов материалом матрицы, плазменное или газотермическое распыление материала матрицы для получения ленточных препрегов.

При изготовлении МКМ наибольшее применение получила пропитка,



которая в зависимости от смачиваемости армирующих компонентов и расплава матрицы может быть самопроизвольной или под давлением.

Наиболее перспективным и производительным способом самопроизвольной пропитки при минимальных трудозатратах и капиталовложений является способ вертикальной непрерывной пропитки. При этом способе армирующий каркас



непрерывно протягивается через расплав материала матрицы и на выходе через фильеру получают полуфабрикаты с высоким объемным содержанием армирующих волокон (рис. 18.3).

Рис. 18.3. Схема процесса вертикальной непрерывной пропитки (а) и полуфабрикаты (б): 1 - разделительные волокна; 2 – ванна с расплавом; 3 – ограничители; 4 – композиционный пучок.

Пропитку под давлением (принудительную) применяют при недостаточной смачиваемости волокон материалом матрицы или для ускорения процесса пропитки для компонентов с удовлетворительной или хорошей смачиваемостью.

При вакуумной пропитке каркас помещается в форму, расположенную вертикально и соединенную сверху с тиглем, заполненным расплавом материала матрицы, а снизу – вакуумным насосом (рис. 18.4). Заполнение пор расплавленным металлом осуществляется за счет разности между атмосферным давлением вместе с дополнительным давлением массы расплава в тигле и давлением в вакуумированных порах.

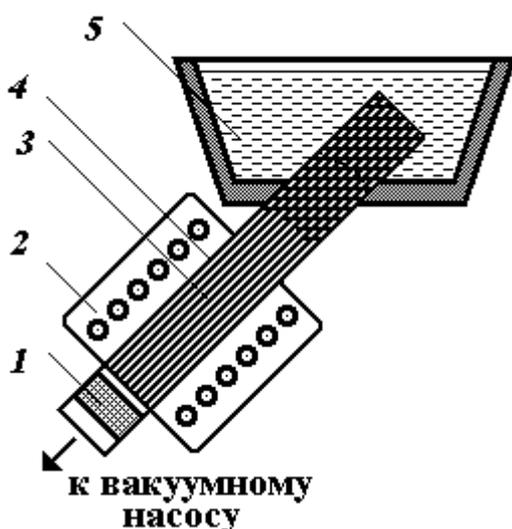


Рис. 18.4. Схема вакуумной пропитки: 1 – пористая пробка; 2 – печь сопротивления; 3 – волокна; 4 – форма; 5 – тигель с расплавленной матрицей.

Разновидностью пропитки под давлением является создание избыточного давления сжатым газом на зеркало расплава, залитого в каркас.

При твердожидкофазном способе получения полуфабрикатов и изделий путем прессования, волочения и прокатки лент, тканей или препрегов необходимо нанесение на них такого количества матричного металла, которого хватило бы в жидкой фазе для равномерной пропитки каркаса. Прессование в интервале температур кристаллизации материала матрицы проводится при относительно невысоких давлениях и уменьшает вероятность разрушения волокон.

Твердофазные способы применяют для соединения (компактирования) изделий из полуфабрикатов при возможности их совместного деформирования без разрушения арматуры. Особые требования при этом предъявляют к чистоте поверхности контактирующих компонентов, отсутствию оксидных пленок на их поверхности и т.д.

Если компоненты арматуры обладают высокой пластичностью, то уплотнять их можно ковкой, прокаткой и другими видами обработки давлением.

Из приведенных технологий получения изделий из МКМ в промышленности чаще всего применяют способы пропитки, непрерывного литья и прокатки.

## ***18.2. Изготовление деталей из композиционных материалов***

### ***с неметаллической матрицей***

К основным способам изготовления деталей из полимерных композиционных материалов относятся контактная и автоклавная формовки, стирометод, вихревое напыление, центробежная формовка и намотка.

Контактной формовкой изготавливают крупногабаритные детали с наполнителями из стеклотканей, стекломатов и т.д. Перед формовкой на рабочие поверхности формы наносят разделительный слой, предотвращающий прилипание связующего к поверхности формы. Затем наносят связующее, укладывают предварительно раскроенную ткань и тщательно прикатывают полученную композицию резиновым роликом для

плотного прилегания ткани и поверхности формы, удаления пузырьков воздуха и равномерной пропитке ткани связующим. Операцию повторяют столько раз, сколько требуется для получения заданной толщины.

Отверждение происходит или при нормальной температуре или при 60...120°C. После отверждения готовую деталь извлекают из формы и при необходимости подвергают дальнейшей обработке (окраске, обрезке кромок, штамповке и т.д.).

Простота оснастки и возможность получения деталей любых размеров и форм являются положительными особенностями контактной формовки, но этот метод малопроизводителен и поэтому применяется в единичном производстве.

Для серийного производства применяют автоклавную формовку. Форму с полуфабрикатом накрывают резиновым чехлом, помещают в автоклав и с помощью воды или пара создают давление, при этом происходит уплотнение и пропитка слоев полуфабриката.

Стирометодом изготавливают крупногабаритные детали из композиционных пластиков с замкнутым полым профилем. На тонкостенный шланг из поливинилхлорида наматывают волокно. Заготовку укладывают в разогретую до 100...120°C пресс-форму. В шланг под давлением подается воздух, при этом заготовка растягивается и приобретает конфигурацию внутренней полости пресс-формы. Связующее засасывается в пространство между шлангом и пресс-формой за счет создания вакуума.

Вихревым напылением изготавливают крупногабаритные детали из стеклопластиков (кузова автомобилей, корпуса лодок, емкости и др.). На стекловолокно, уложенное на форму, специальным пульверизатором наносят смолу с отвердителем (связующим) и затем уплотняют резиновым роликом.

Центробежной формовкой получают крупногабаритные детали, имеющие форму тел вращения. Стекловолокно и связующее подаются во вращающуюся форму. Затем внутрь заготовки помещают резиновый чехол, который под действием давления растягивается и уплотняет заготовку. В

таком состоянии происходит отверждение заготовки при определенной температуре.

Намоткой получают трубы и сложные по форме оболочки из пластиков. На металлическую оправку, покрытую целлофановой пленкой, наматывают волокно или ткань, смоченную связующим. Отформованную заготовку покрывают целлофановой пленкой, снимают с оправки и переносят в камеру для отверждения.

Технологический процесс изготовления деталей из резиновых композиционных включает в себя цепочку из операций приготовления резиновой шихты (противостаритель, каучук, вулканизатор), формования и вулканизации.

Переработка резиновой шихты в детали (формование) может производиться методами прессования, литьем под давлением, непрерывным выдавливанием и каландрованием. За исключением каландрования все остальные операции подобны технологическим процессам формообразования деталей из пластмасс.

Прессованием получают фасонные детали (манжеты, уплотнительные кольца, клиновые ремни и т.д.). Прессуют в металлических формах. При горячем прессовании (140...155°C) одновременно происходят формообразование и вулканизация. Холодным прессованием получают детали из эбонитовых смесей (каучук, сера, отходы эбонитового производства), затем вулканизируют.

Литьем под давлением получают детали сложной формы. Резиновая смесь поступает под давлением при 80...120°C в литейную форму, затем проводят вулканизацию.

Для получения методом непрерывного выдавливания профилированных резиновых деталей (трубы, прутки, профили) применяют машины червячного типа. Таким способом покрывают резиной металлическую проволоку.

Каландрование применяют для получения заготовок из резиновых смесей в виде листов и прорезиненных лент на многовалковых установках-каландрах (рис. 18.5).

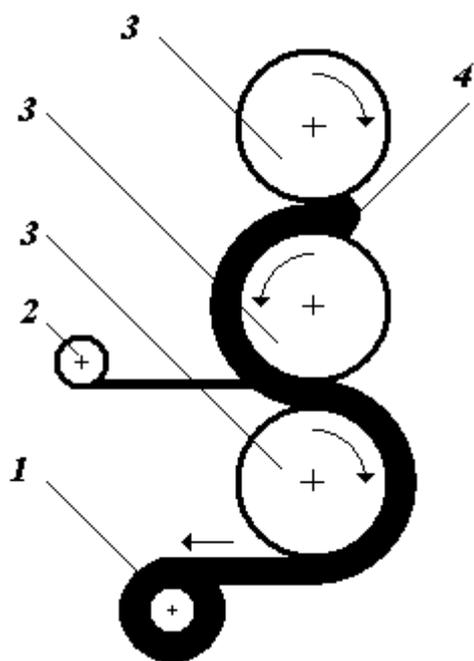


Рис. 18.5. Схема каландрования: 1 – барабан с прорезиненной лентой (тканью); 2 – барабан с тканью – основой; 3 – валки каландров; 4 – пластифицированная резиновая смесь.

Полученные листы резины пересыпают тальком, сматывают в рулоны и используют затем в качестве полуфабриката для других процессов формообразования резиновых деталей. В процессе получения прорезиненной ткани 1 в зазор между вращающимися валками каландров 3 одновременно пропускают пластифицированную резиновую смесь 4 и ткань 2, при этом происходит втирание резиновой смеси в ткань. Изменяя зазор между валками каландра можно регулировать толщину резиновой пленки на ткани. Полученный материал наматывают на барабан и затем подвергают вулканизации.

Вулканизация завершает технологический процесс получения деталей. Вулканизацию проводят в специальных камерах при температурах 120...150°C в атмосфере насыщенного водяного пара при небольших давлениях. При вулканизации происходит химическая реакция между серой и каучуком, в результате которой механическая прочность заготовок увеличивается и повышается стойкость к воздействию органических растворителей.

### ***18.3. Изготовление изделий из порошковых материалов***

Процесс изготовления изделий из порошковых композиционных материалов включает в себя операции изготовления порошков, формования, спекания и окончательной обработки с целью повышения физико-механических свойств, получения окончательных размеров и формы, нанесения декоративных и защитных покрытий.

#### ***Изготовление порошков***

Все методы изготовления порошков можно разделить на два способа: физико-механический и химико-металлургический.

При физико-механическом способе превращение исходного материала в порошок происходит за счет механического измельчения материала в твердом или жидком состоянии без изменения его химического состава. К физико-механическим способам относятся дробление, размол, распыление, грануляция обработка резанием.

При химико-металлургическом способе изменяется химический состав или агрегатное состояние исходного материала. К химико-металлургическим способам относятся: восстановление окислов, электролиз, термическая диссоциация карбонильных соединений.

Механическое размельчение (дробление, размол, истирание) наиболее целесообразно применять к хрупким материалам, металлам и их сплавам (кремний, сурьма, хром, марганец, ферросплавы, сплавы алюминия с магнием).

Для грубого размельчения (размер частиц 1...10мм) используют дробилки (валковые, конусные, бегунки). Для тонкого измельчения используют шаровые вращающиеся, вибрационные, планетарные и другие мельницы. Рассмотрим работу шаровой мельницы (рис. 18.6). В мельницу загружают размольные тела *1* (стальные или твердосплавные шары) и измельчаемый материал. В зависимости от частоты вращения барабана *2* и массы размольного тела возможны четыре режима. При небольших частотах

вращения шары скользят по внутренней поверхности барабана (рис. 18.6, а) и истирают измельчаемый материал. При увеличении частоты вращения (рис. 18.6, б) шары поднимаются и скатываются по наклонной поверхности, что приводит к более интенсивному истиранию измельчаемого материала. При дальнейшем увеличении частоты вращения (рис. 18.6, в) шары поднимаются на определенную высоту и падают на измельчаемый материал. К истирающему воздействию добавляется дробящее. При критической частоте (рис. 18.6, г) вращения шары вращаются вместе с барабаном и измельчение прекращается. Несмотря на простоту конструкции мельницы, можно получить частицы измельчаемого материала от единиц до десятков микрометров, форма частиц порошка – осколочная (рис. 18.6, д).

Распыление и грануляция применяются для изготовления порошков металлов с температурой плавления до 1600°С (алюминий, железо, сталь, цинк, медь, свинец, никель и их сплавы). Сущность измельчения состоит в дроблении струи расплава (рис. 18.7) высокоэнергонасыщенным газом. В зависимости от свойств расплава и требований к качеству порошка применяют распыление воздухом, азотом, аргоном, гелием. Размеры частиц порошка от 1 до 0,01 мм, форма частиц – сферическая или каплевидная.

Химико-металлургический метод (восстановление металлов из окислов или солей) основан на реакции восстановления. В общем виде ее можно записать:  $MeA + X \leftrightarrow Me + A - Q$ , где: Me – металл; A – неметаллическая составляющая (кислород, хлор, фтор, солевой остаток); X – восстановитель; Q – тепловой эффект реакции.

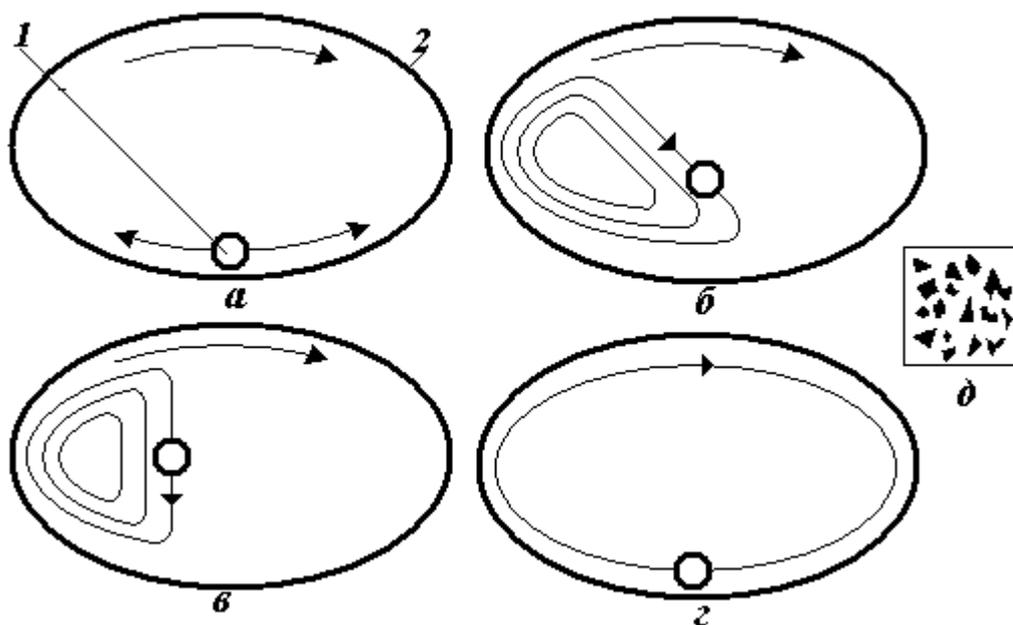


Рис. 18.6. Схемы движения размольных тел в шаровой мельнице: а – режим скольжения; б – режим перекатывания; в – режим свободного скольжения и удара; г – режим критической скорости; д – форма частиц порошка; 1 – размольное тело; 2 – барабан.

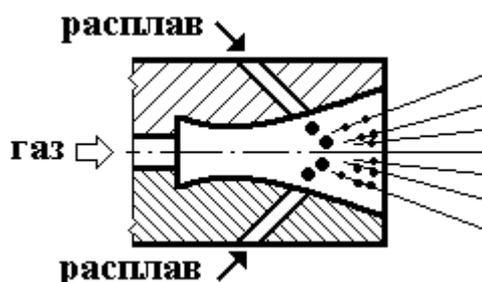


Рис. 18.7. Схема форсунки для распыления.

Восстановителем может быть вещество, которое при выбранной температуре имеет большее химическое сродство к неметаллической составляющей, чем металл. В качестве восстановителя используется водород, окись углерода, аммиак, природный газ, кокс и т.д.

Сырьем для восстановления медных, никелевых и кобальтовых порошков служат: окись меди ( $Cu_2O$ ;  $CuO$ ), закись никеля ( $NiO$ ), окись кобальта ( $Co_2O_3$ ;  $Co_3O_4$ ). Восстановление проводят в муфельных печах водородом, диссоциированным аммиаком, природным газом. Температура восстановления: для меди –  $400...500^{\circ}C$ ; для никеля –  $700...750^{\circ}C$ ; для

кобальта – 520...570°C. После восстановления получают губку, которая хорошо растирается в порошок.

Сырьем для восстановления вольфрама служит продукт разложения вольфрамовой кислоты  $H_2WO_4$  - вольфрамовый ангидрид или паравольфрамат аммония  $5Na_2O \cdot 12WO_3 \cdot 11H_2O$ . Восстановление проводят в электропечах или водородом (850...900°C), или углеродом (1350...1550°C). Аналогично получают порошки молибдена, титана, циркония, ниобия, стали.

### Формование металлических порошков

Целью формования является придание заготовкам из порошка формы, размеров, плотности и механической прочности, необходимых для последующего изготовления изделия. Формование включает в себя отжиг, классификацию, приготовление смеси, дозирование и собственно формование.

Отжиг необходим для повышения пластичности и прессуемости порошка, за счет восстановления остаточных окислов и снятия наклепа. Нагрев осуществляют в защитной (инертной, восстановительной) атмосфере или в вакууме при температуре 0,4...0,6 температуры плавления.

Классификация – сортировка по размеру осуществляется в ситах (крупные порошки, размером до 50 мкм) или методами воздушной сепарации (более мелкие порошки).

Перед смешением в металлические порошки вводят технологические присадки различного назначения: пластификаторы (парафин, стеарин и так далее), облегчающие процесс прессования; легкоплавкие металлы, улучшающие процесс спекания; летучие вещества для получения деталей заданной пористостью. Подготовленные порошки смешиваются в различных устройствах (шаровые мельницы, вращающиеся барабаны и так далее) и затем проводят их формование.

Формование заготовок из ПКМ производится методами прессования, изостатического формования, прокаткой или выдавливанием.

При холодном прессовании (рис. 18.8, а) порошок 1 засыпается в пресс-форму 2 и прессуют пуансоном 3. Под действием давления происходит уплотнение порошка и деформация отдельных частиц. Прочность получаемого брикета зависит от приложенного давления, которое распределяется неравномерно по его высоте из-за возникающих сил трения между стенками пресс-формы и порошком. После одностороннего холодного прессования прочность и пористость по высоте брикета различаются, поэтому одностороннее холодное прессование применяют для заготовок простой формы с отношением высоты к диаметру меньше единицы. Заготовки более сложной формы прессуют набором пуансонов (рис. 18.8, б). Для получения заготовок сложной формы применяют двустороннее прессование (рис. 18.8, в), при этом для получения равномерных показателей плотности и прочности давление снижается на 30...40%. Кривая упрочнения частиц порошка (рис. 18.8, г) имеет три характерных участка: На участке «А» идет наиболее интенсивное нарастание плотности при относительно свободном перемещении частиц, занимающих пустоты. На участке «Б» возрастание давления практически не влияет на плотность. По достижении предела текучести при сжатии порошкового тела начинается деформация частиц (участок «В»).

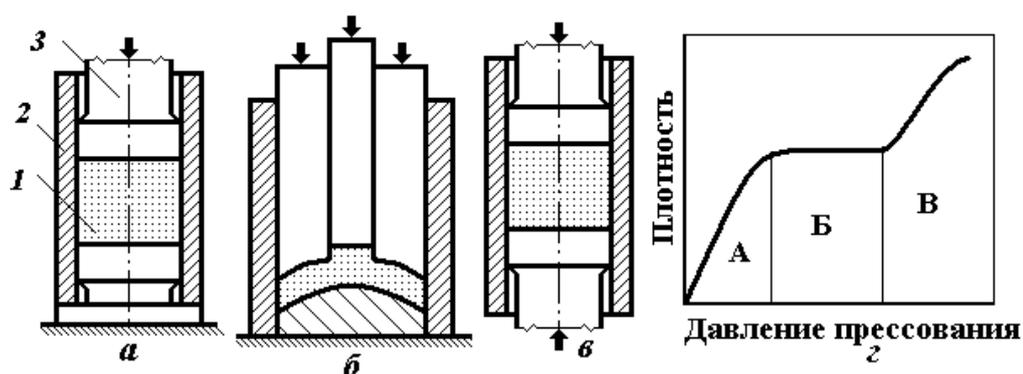


Рис. 18.8. Схемы холодного прессования: а – одностороннего, одним пуансоном; б – одностороннего, набором пуансонов; в - двустороннего; г – кривая процесса упрочнения; 1 – порошок; 2 – пресс-форма; 3 – пуансон; А, Б, В – участки кривой упрочнения.

При горячем прессовании (с нагревом до 0,6...0,8 температуры плавления) одновременно протекают процессы формообразования и спекания заготовки. Нагрев приводит к интенсификации процессов уплотнения, что позволяет уменьшить давление прессования и получать компактные заготовки с высокими показателями механических свойств и однородностью структуры. Недостаток горячего прессования – малая стойкость пресс-форм, которые выдерживают 10...12 прессований и, соответственно низкая производительность процесса.

При изостатическом (всестороннем) прессовании отсутствуют потери на внешнее трение, а равномерность всестороннего давления позволяет получать требуемую плотность заготовки при давлениях меньших, чем при прессовании в закрытых пресс-формах.

В промышленности освоены три основных вида изостатического формования: гидростатическое, формование с помощью эластичной оболочки и горячее формование.

При гидростатическом формовании (рис. 18.9) на порошок 3, заключенный в эластичную оболочку 2, передается давление с помощью жидкости (вода, масло, глицерин), находящейся в сосуде высокого давления

1.

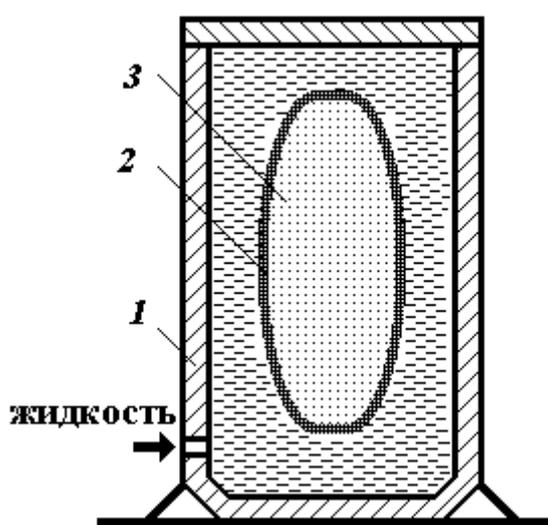


Рис. 18.9 Схема гидростатического формования: 1 – сосуд высокого давления; 2 – эластичная оболочка; 3 – порошок.

При формовании брикетов с помощью эластичной оболочки, вставленной в стальную пресс-форму, давление передается через оболочку, которая одновременно изолирует порошок от стенок пресс-формы. Этот

способ применяют в основном для получения крупногабаритных заготовок типа труб. При горячем формовании порошок помещают в эластичную металлическую оболочку, которая нагревается и подвергается давлению, при этом совмещаются процессы формования и спекания.

Прокатка – наиболее производительный способ получения изделий из порошков с высокой степенью автоматизации и непрерывности процесса, позволяющий получать однослойные (рис. 18.10, а) и многослойные (рис. 18.10, б) ленты или полосы, прутки различного профиля и проволоку. В бункер 1 непрерывно поступает порошок 2, который, попадая в зазор между вращающимися валками 3 вытягивается в ленту или полосу 4 определенной толщины. Процесс формования может быть совмещен со спеканием при прохождении ленты через печь и последующим обжатием для получения необходимых размеров.

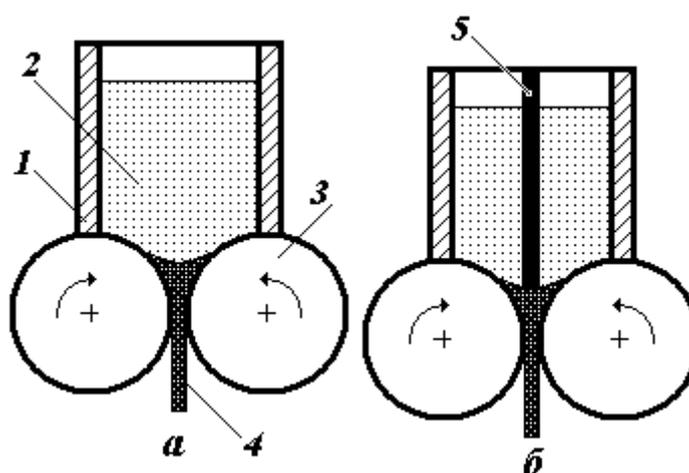


Рис. 18.10. Схема прокатки порошков: а – для изготовления однослойных полуфабрикатов; б - для изготовления двухслойных полуфабрикатов; 1 – бункер; 2 – порошок; 3 – валки; 4 – лента или полоса; 5 – перегородка.

Выдавливание применяют для изготовления труб и профилей различного сечения путем выдавливания порошка через калиброванное отверстие. Перед выдавливанием в порошок добавляют пластификатор (10...12% от массы порошка) для улучшения процесса соединения частиц и уменьшения трения между порошком и стенками пресс-формы.

Для повышения прочности прессованных заготовок проводят спекание при температурах ниже температуры плавления основного порошка композиции. При спекании происходит усиление контакта между отдельными частицами порошка за счет восстановления поверхностных оксидов, диффузии и рекристаллизации. В процессе спекания происходит усадка и в ряде случаев можно получить заготовки с минимальной пористостью и высоким комплексом физико-механических свойств. Как правило, спекание проводят в электропечах сопротивления или в индукционных печах в восстановительной атмосфере или в вакууме.

Для повышения физико-механических свойств спеченных заготовок часто применяют повторное прессование и спекание, пропитку смазочными материалами (для антифрикционных деталей), отжиг, закалку, а также химико-термическую обработку.

Спеченные материалы можно подвергать всем видам обработки давлением: ковке, прокатке, штамповке, что позволяет повысить пластичность материалов за счет уменьшения пористости.

### ***Контрольные вопросы***

1. Какова температура длительной эксплуатации изделий из композиционных материалов армированных волокнами бора?
2. Что такое войлокование?
3. Как получают ориентированные пакеты из жестких волокон?
4. Как производится пропитка, армирующих компонентов?
5. Что такое контактная формовка?
6. Что такое автоклавная формовка?
7. Каким способом получают прорезиненные ткани?
8. Что такое вулканизация?
9. Как производят механическое размельчение порошков?
10. Что такое распыление порошков?

11. На чем основан химико-металлургический метод изготовления порошков?

12. Какими методами происходит формование заготовок из ПКМ?  
Опишите эти методы.

## **ГЛАВА 19. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ (МИД)**

Множественность и многовариантность технологических цепочек изготовления деталей машин требует системного анализа при рассмотрении обобщенной структурной схемы технологического процесса изготовления изделия. Системный подход основан на представлении МИД в виде технической системы.

### ***19.1. Технологический процесс изготовления деталей - техническая система***

Системой называется организованный комплекс средств необходимых для достижения общей цели. При этом данный комплекс имеет иерархическую структуру, каждый из элементов которой по степеням иерархии являются средством достижения цели элемента или подсистемы более высокого уровня. В свою очередь, МИД определяется способами формирования заданных параметров их качества с производительностью, соответствующей наименьшим затратам в данных условиях производства. Из этого следует, что общей целью, которая достигается при применении того или иного МИД получение изделия с заданными параметрами качества. МИД как любой системе присущи четыре основных свойства: целостность и членимость; свойство связи; организация; интегративные качества.

#### **Целостность и членимость**

Это свойство проявляется в структуре системы, которая представляет собой устойчивую упорядоченность в пространстве и во времени ее элементов и связей. Технологическая структура процесса изготовления деталей (на примере метода механической обработки «МО») представлена на **рис. 19.1**. Система МИД состоит из пяти основных подсистем (**рис. 19.2**): способа воздействия на обрабатываемый материал; кинематических характеристик; обрабатывающего инструмента; динамических характеристик; статических характеристик. Каждая из этих подсистем

состоит из подсистем более низкого уровня, которые, в свою очередь, могут быть разделены на отдельные элементы. Каждый из элементов системы имеет свою собственную цель, без достижения которой общая цель системы не может быть достигнута.



Рис. 19. 1. Технологическая структура метода механической обработки.



Рис. 19. 2. Структура подсистем: «Способ воздействия», «Обрабатывающий инструмент», «динамические, кинематические и статические характеристики».

Так, если посредством способа воздействия физико-механические свойства обрабатываемого материала не будут определенным образом изменены, то при резании не произойдет стружкообразования, а при поверхностном пластическом деформировании - снижения шероховатости обрабатываемой поверхности и ее упрочнения. Не обеспечив кинематических движений инструмента и детали, невозможно осуществить формообразование обрабатываемой поверхности, сформировать ее макро - и микрогеометрию. Без инструмента не может быть произведено воздействие на обрабатываемую поверхность или объем материала. Не учитывая статические и динамические характеристики, в частности, жесткость технологической системы невозможно обеспечить точность размера, формы и расположения поверхностей детали. Невыполнение хотя бы одной из вышеуказанных частных целей влечет за собой невыполнение общей цели всей системы МИД. Следовательно, хотя система и состоит из определенного числа элементов, т.е. членима, в то же время она представляет собой единое целое, т.к. каждый из вышеуказанных элементов, необходим для достижения общей цели системы.

#### Свойство связи

Систему характеризует наличие существенных устойчивых связей между элементами или их свойствами, которые превосходят по мощности связи этих элементов с элементами, не относящимися к рассматриваемой системе. Связь представляет собой физический канал, по которому обеспечивается обмен веществом, энергией и информацией между элементами системы, а также системы и окружающей среды. Основными характеристиками связи являются физическое наполнение, направленность, мощность и роль в системе.

По физическому наполнению различаются связи вещественные, энергетические, информационные, смешанные и не наполненные (отношения). По направлению различают связи прямые, обратные,

контрсвязи и нейтральные. По роли в системе различают связи: соединительные, ограничивающие, усиливающие, ослабляющие, запаздывающие, опережающие, мгновенные, селективирующие, преобразующие, согласующие и т.д.

Анализ связей между основными характеристиками метода обработки показывает следующее. При реализации любого МО на поверхность детали осуществляется то или иное энергетическое воздействие. Вид подводимой к поверхности детали энергии определяется способом воздействия на обрабатываемый материал. В свою очередь, способ воздействия однозначно определяет характеристики инструмента, с помощью которого осуществляется энергетическое воздействие на обрабатываемую поверхность. Чаще всего, инструмент воздействует на поверхность детали локально, т.е. энергия передается отдельными квантами. Так как обработка должна быть произведена по всей поверхности, то источник энергии должен перемещаться, причем кинематика его движения определяется формой обрабатываемой поверхности. Необходимо отметить, что при МО и сварке для энергетического воздействия на поверхность детали используются кинематические движения, сообщаемые инструменту и детали. Согласно закону механики о равенстве сил действия и противодействия при внедрении инструмента в обрабатываемую поверхность возникает система сил, действующих на деталь и инструмент и характеризующих динамику процесса. Согласно тому же закону для уравнивания системы внешних сил и сохранения постоянного относительного положения инструмента и детали при обработке необходима система статических сил, определяемая статическими характеристиками МИД. Из этого следует, что в МИД как в системе между элементами существуют энергетические согласующие прямые и обратные связи, различные по своей мощности.

Анализ связей, существующих между характеристиками МИД, а также между последними и элементами системы «технологическая операция», подсистемой которой является МИД, позволяет выявить значительное

отличие в мощности двух вышеуказанных вариантов связей. Так, например, способ воздействия всегда однозначно определяет характеристики инструмента, и, в свою очередь, инструмент всегда является носителем какого-либо способа воздействия. Элементы технологической операции, выполняющие контроль размера детали связаны с инструментом только через его износ, т.е. через его свойство. Если осуществляется МО, что при достижении определенной величины износа инструмента в случае выхода размера детали за поле допуска производится его смена или переналадка. Данная связь не постоянная, а периодическая. Таким образом, можно заключить, что мощность связи между элементами системы МИД (способ воздействия - инструмент) больше мощности связи характеристики МИД (инструмента) с элементами другой системы (элементы, контролирующие размер детали ...), которая в этом случае является внешней средой для системы МИД.

### Организация

Организация - как свойство системы характеризуется снижением энтропии (степени неопределенности) системы  $H(S)$  по сравнению с энтропией системоформирующих факторов  $H(F)$ , определяющих возможность создания системы. К системоформирующим факторам  $H(F)$  относятся: число элементов системы, число системозначных свойств элемента, число существенных связей элемента, число системозначных свойств связей, число квантов пространства и времени, в которых может существовать элемент, связь и их свойства. В этой связи можно сформулировать общие принципы построения МИД как системы с учетом оптимальной величины энтропии. Необходимо учесть, что энтропия или степень неопределенности поведения технической системы прямо связана с таким показателем как ее надежность, а также в значительной мере влияет на эффективность управления системой. Так, с увеличением количества элементов системы при равной надежности каждого из них, ее общая

надежность снижается. Это же можно сказать и о количестве связей между элементами. На эффективность управления системой также влияет количество системозначных свойств системы, ее элементов и их связей, т.к. при улучшении одного из свойств элемента достаточно часто ухудшаются одно или несколько других его свойств. Это приводит к многокритериальной задаче оптимизации, которая должна решаться с помощью принципа Парето. По отношению к МИД как к технической системе данный принцип можно трансформировать следующим образом. Если у системы, элемента или связи имеется несколько свойств, важно выявить их главные и дополнительные свойства. Причем при построении МИД необходимо обеспечивать экстремум главной функции (свойства) при минимуме отрицательного влияния дополнительных свойств на достигаемое качество и технико-экономические показатели.

По отношению к методам МО следует отметить, что при реализации черновой обработки, как правило, основным критерием является производительность обработки, и связанное с ней основное (машинное) время, а параметры качества (точность, шероховатость, степень и глубина упрочнения и т.д.) выступают как критерии вспомогательные. При чистовой формообразующей обработке основным критерием является точность или величина поля допуска, при чистовой отделочной - шероховатость поверхности детали, а при упрочняюще-чистовой обработке - степень или глубина упрочнения поверхностного слоя. Из данных частных критериев можно различными методами сформировать обобщенный критерий.

#### *Интегративные качества*

Интегративные качества - это свойства, присущие системе в целом и не свойственные ни одному из ее элементов в отдельности. Это можно проиллюстрировать следующим примером. Основной функцией способа воздействия является преобразование свойств материала обрабатываемой детали, кинематические характеристики определяют форму обрабатываемой

поверхности. Инструмент осуществляет непосредственное воздействие на деталь в процессе обработки, динамические характеристики определяют энергетическое взаимодействие инструмента и детали, а статические характеристики обеспечивают постоянное относительное положение инструмента и детали при обработке. МИД, как система, вышеуказанные свойства входящих в нее элементов трансформирует в интегративные качества - образование поверхностей и объема детали с заданными параметрами качества при обеспечении максимальной производительности и минимума затрат на производство в данных конкретных условиях. Представление МИД как технической системы позволяет составить его информационную модель.

### ***19.2. Информационная модель МИД***

Для формализованного описания МИД как системы наиболее удобным математическим аппаратом является теория графов. Связь структурных элементов МИД задается графом  $S(Q, T)$ , множество вершин которого изоморфно характеристикам МИД, а множество дуг - отношениям, с помощью которых выражается временная упорядоченность действий определенных характеристик. Применяя вышеуказанные отношения, можно комбинировать характеристики МИД с целью создания новых вариантов. Наряду с временной упорядоченностью структура МИД как системы характеризуется ступенчатостью, которая распространяется на различную глубину. Применяя к исходной системе определенный способ расчленения, можно получить множество подсистем первого уровня  $\{Q_1', Q_2', Q_3', Q_4', Q_5'\}$ . Прделав эту же операцию для каждой подсистемы первого уровня можно получить множество подсистем второго уровня  $\{Q_{i1}^2, Q_{i2}^2, \dots, Q_{ik}^2\}$ . Результатом такого расчленения будет граф структуры системы, вершинами которого являются характеристики МИД (рис. 19. 3). Функция МИД заключается в преобразовании исходной заготовки в готовую деталь и описывается отображением  $Q: K \cap QK_k$ . В этом случае исходное и

конечное состояния обрабатываемой детали определяется множеством параметров качества. К которым относятся: химический состав материала; модули упругости и упрочнения первого рода; модули упругости и упрочнения второго рода; пределы текучести и прочности; твердость материала и распределение твердости по глубине и длине детали; точность размера, формы и расположения поверхностей детали; волнистость и шероховатость поверхности; конфигурация детали; анизотропия свойств материала детали. МИД может состоять из нескольких стадий  $\varphi$ .

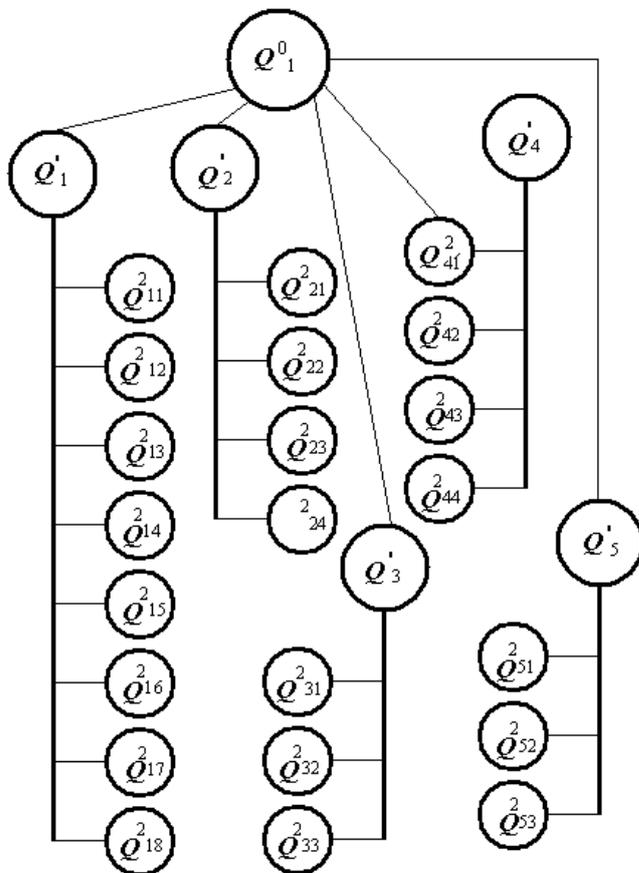


Рис. 19. 3. Граф структуры системы МИД:  $Q_{11} \dots Q_{51}$  – подсистемы первого уровня;  $Q_{ij2} \dots Q_{ik2}$  – подсистемы второго уровня.

Учитывая вышеизложенное, можно описать функцию МИД графом  $F(K, Q): F(K, Q) = K_0 \varphi_1 \dots K_{k-1} \varphi_k K_k$ . Так как для реализации заданной функции могут быть созданы методы с различной структурой, то

необходимо ввести оценочные функции, с помощью которых можно определить эффективность того или иного метода. Оценочные функции в этом случае являются технической характеристикой метода изготовления детали, состоящей из некоторого множества параметров:  $Z = \{Z_1, Z_2 \dots Z_l \dots Z_n\}$ . В качестве оценочных функций принимают производительность обработки, стойкость инструмента, энергоемкость процесса и т.д. Комплексным критерием оценки эффективности МИД может быть принята себестоимость изготовления деталей, прибыль или приведенные затраты.

Таким образом, информационная модель МИД как технической системы описывается рядом соотношений, определяющих функцию, техническую характеристику и структуру системы на всех уровнях расчленения:

$$Q^0 = \Theta: K_0 \rightarrow K_k S^0(Q, T), \{Z_i^0\}$$

$$Q^1 = \{(\varphi^1: K_{j-1}^1 \rightarrow K_j^1, S^1(Q^2, T), \{Z_{ij}^1\})_j\}; j=1, m_1$$

$$Q^2 = \{(\varphi^2: K_{j-1}^2 \rightarrow K_j^2, S^2(Q^3, T), \{Z_{ij}^2\})_j\}; j=1, m_2$$

$$Q^3 = \{(\varphi^3: K_{j-1}^3 \rightarrow K_j^3, S^3\{Z_{3ij3}\})_j\}; j=1, m_3$$

Информационная модель позволяет перейти к формализованному описанию процесса синтеза МИД и его совершенствования, а также использовать для этого вычислительную технику.

Рассматриваемые выше функция и техническая характеристика МИД состоит из определенного числа целей, которые необходимо достигнуть при реализации процесса обработки детали. Вследствие этого, вопрос выявления всего объема технологических целей, и анализ их взаимосвязей с характеристиками методов изготовления детали является достаточно важным. Рассмотрим это на примере методов МО, включающих в себя резание и поверхностное пластическое деформирование.

### ***19.3. Функциональная модель метода МО***

Рассмотрим граф-дерево технологических целей (рис. 19.4), достигаемых при реализации методов МО. Технологические цели разбиты на четыре большие группы: образование поверхности детали, технологическое обеспечение, управление и развитие. Цели, достигаемые при образовании поверхности детали также разделены на три группы, характеризующие обеспечение заданного качества при максимальной производительности труда и минимальных затратах на изготовление. Цели технологического обеспечения (рис. 19.5) определяют функции, которые необходимо учитывать при выборе и расчете требуемых для изготовления детали: способа воздействия на обрабатываемый материал, обрабатывающего

инструмента, кинематических, динамических и статических характеристик метода обработки.

Цели управления (рис. 19.6) указывают на осуществление управляющих воздействий вышеприведенными характеристиками метода обработки. Группа целей развития (рис. 19.7) перекликается в определенной мере с целями при образовании поверхности детали и включает в себя цели, которые характеризуют улучшение качества обработанных деталей, а также повышение других технико-экономических показателей технологических процессов и операций. При разработке граф-дерева технологических целей осуществляется процесс квантификации целей.



Рис. 19. 4. Граф-дерево технологических целей: 1-обеспечение минимальных затрат; 2 – обеспечение максимальной производительности; 3 - обеспечение заданного качества детали; А – статические характеристики; В – динамические характеристики; С – характеристики инструмента; D – кинематические характеристики; Е – способ воздействия.



Рис. 19. 5. граф-дерево целей технологического обеспечения.

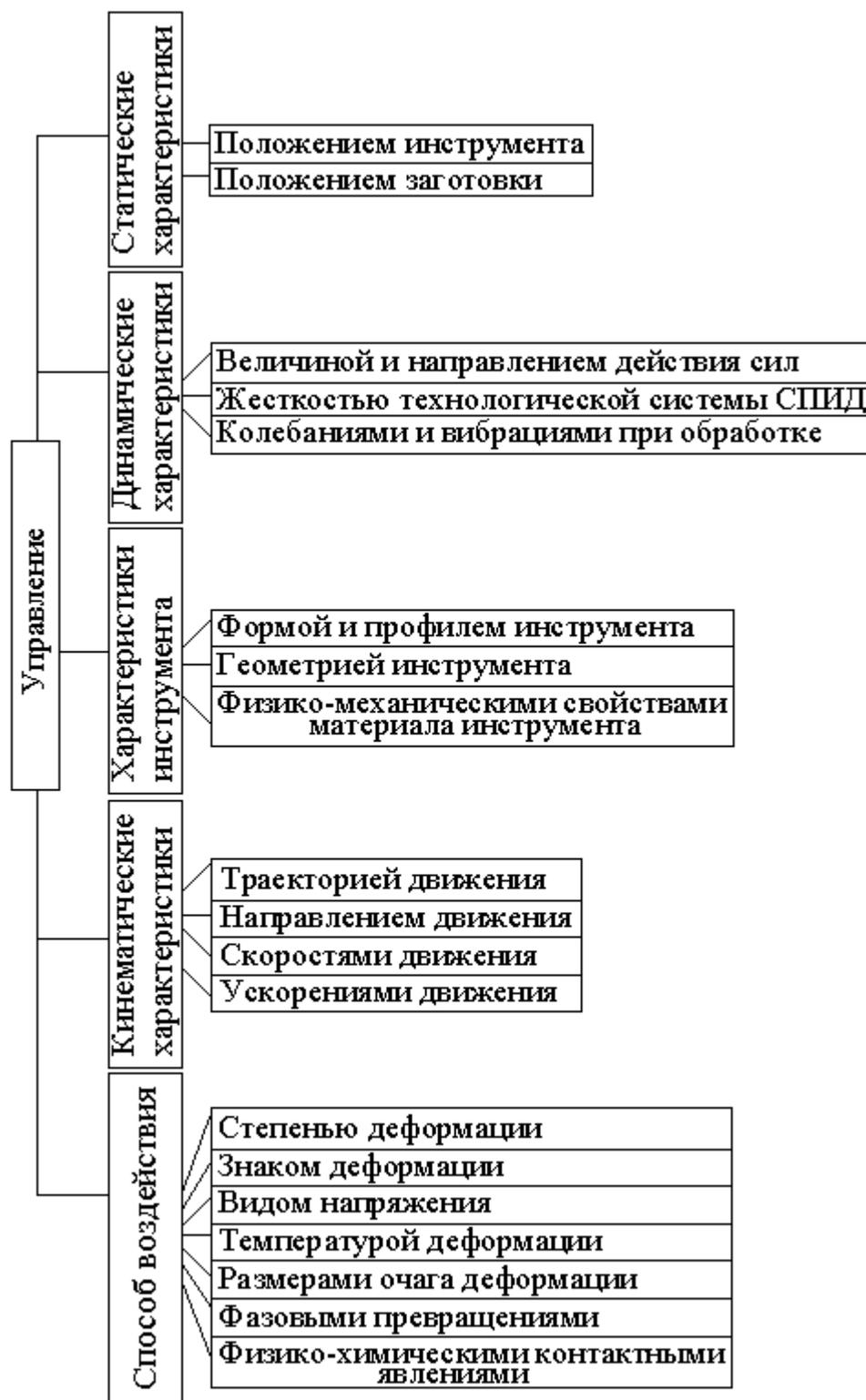


Рис. 19. 6. граф-дерево цели управления.

Данный процесс производится до тех пор, пока во всех висячих вершинах графа не будут содержаться количественно определяемые цели. На основании изучения научно-технической и патентной литературы производится анализ взаимосвязей технологических целей, стоящих при

образовании поверхности детали и развитии с характеристиками метода обработки (рис. 19. 8). На рис. 19. 9 представлен пример кругового графа взаимосвязей между целью развития «Способ воздействия» и характеристиками метода обработки. Анализ аналогичных графов позволяет выявить характеристики, влияющие на наибольшее количество технологических целей, и совершенствование которых дает наибольший эффект по улучшению качественных и технико-экономических показателей процессов обработки деталей.

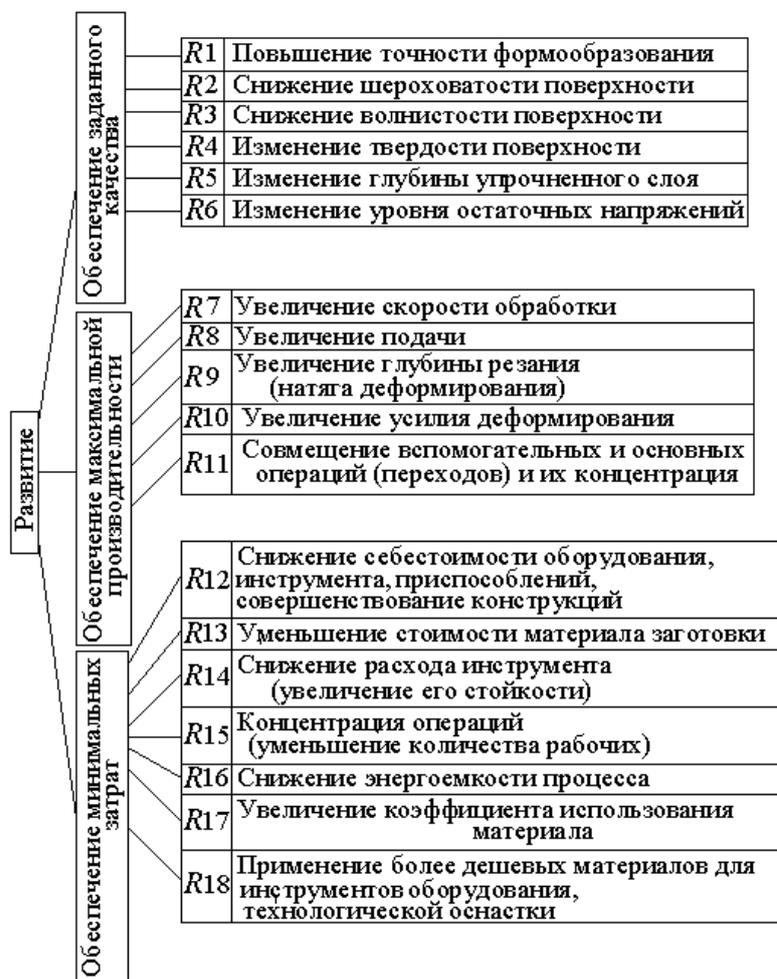


Рис. 19. 7. граф-дерево целей развития:  
R1 – повышение точности формообразования; R2 – снижение шероховатости поверхности; R3 – снижение волнистости поверхности; R4 – изменение твердости поверхности; R5 – изменение глубины упрочненного слоя; R6 – изменение уровня остаточных напряжений; R7 – увеличение

скорости обработки; R8 - увеличение подачи; R9 – увеличение глубины резания (натяга деформирования); R10 – увеличение усилия деформирования; R11 – совмещение вспомогательных и основных операций (переходов) и их концентрация; R12 – снижение себестоимости оборудования, инструмента, приспособлений, совершенствование конструкций; R13 – уменьшение стоимости материала заготовки; R14 -

снижение расхода инструмента (увеличение стойкости); R15 – концентрация операций (уменьшение количества рабочих мест); R16 – снижение энергоемкости процесса; R17 – увеличение коэффициента использования металла; R18 - применение более дешевых материалов для оборудования, технологической оснастки, инструментов.

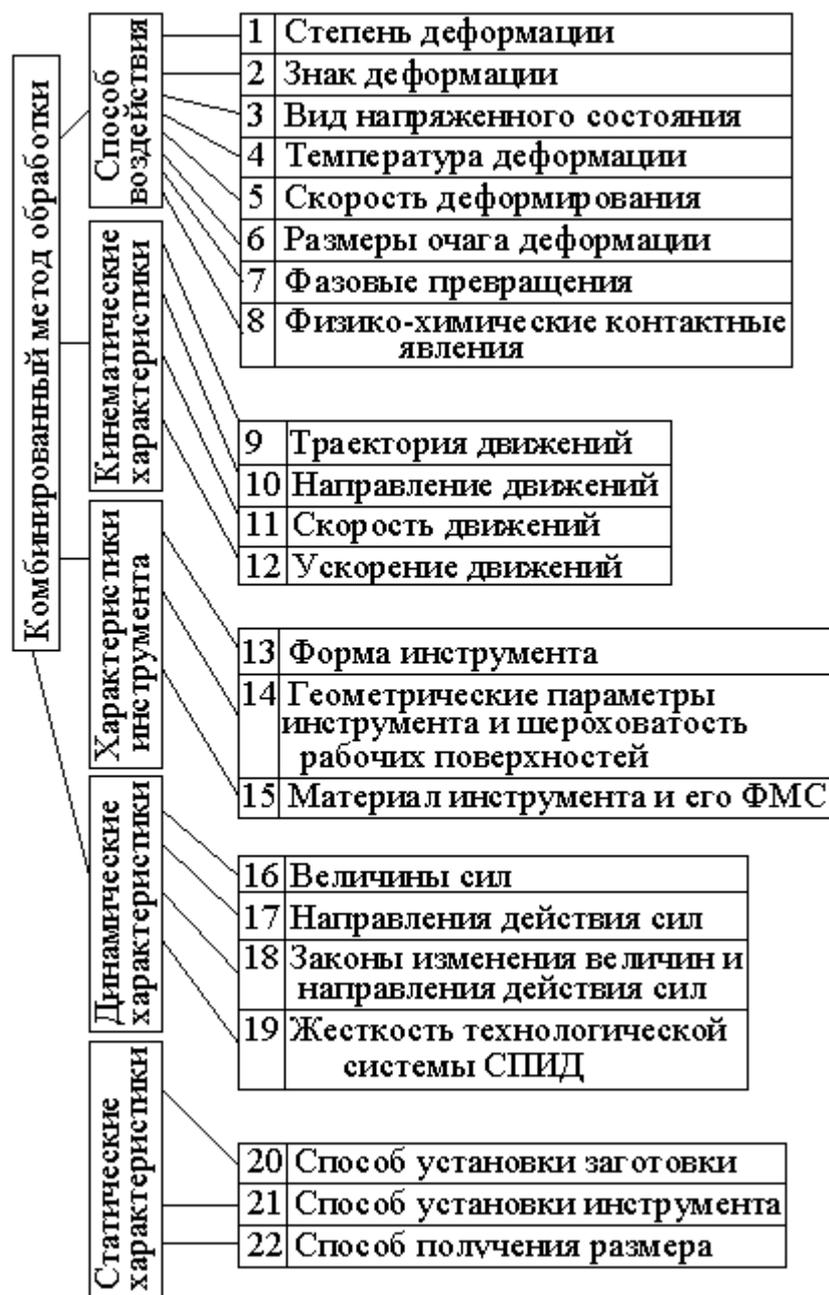


Рис. 19. 8. Классификатор характеристик метода обработки.

На основании полученных графов можно сделать вывод, что доминирующее влияние на максимальное количество целей имеют способ воздействия на обрабатываемый материал и обрабатывающий инструмент. Это позволяет

наметить пути совершенствования метода обработки, выявить и сформулировать для этого физические и технологические принципы, а также определить направления технологических и фундаментальных исследований взаимосвязей целей с характеристиками методов обработки. Это позволяет в свою очередь на основе найденных в результате таких исследований математических зависимостей проставить на вышеприведенных дугах графов числовые функции количественно характеризующие мощность связей характеристик метода МО и технологических целей. После нахождения взаимосвязей целей с характеристиками метода обработки на следующем этапе системного анализа создается логико-множественная модель метода обработки и процесса его синтеза.

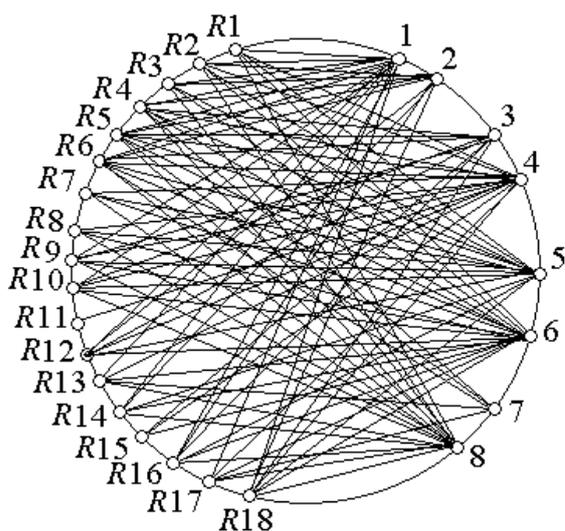


Рис. 19.9. Пример кругового графа взаимосвязей между целью развития «Способ воздействия» и характеристиками метода обработки:

R1 – повышение точности формообразования; R2 – снижение шероховатости поверхности; R3 – снижение волнистости поверхности; R4 – изменение твердости поверхности; R5 – изменение глубины упрочненного слоя; R6 – изменение уровня остаточных напряжений; R7 – увеличение скорости обработки; R8 - увеличение подачи; R9 – увеличение глубины резания (натяга деформирования); R10 – увеличение усилия деформирования; R11 – совмещение вспомогательных и основных операций (переходов) и их концентрация; R12 – снижение себестоимости оборудования, инструмента, приспособлений, совершенствование конструкций; R13 – уменьшение стоимости материала заготовки; R14 - снижение расхода инструмента (увеличение стойкости); R15 – концентрация операций (уменьшение количества рабочих мест); R16 – снижение энергоемкости процесса; R17 – увеличение коэффициента

использования металла; R18 - применение более дешевых материалов для оборудования, технологической оснастки, инструментов; 1 – степень деформации; 2 – знак деформации; 3 – вид напряженного состояния; 4 – температура деформации; 5 – скорость деформации; 6 – размеры очага деформации; 7 - фазовые превращения; 8 – физико-химические контактные явления.

#### ***19.4. Логико-множественная модель метода МО и технологических объектов, участвующих в процессах изготовления деталей***

Для создания такой модели и формализации процесса синтеза метода обработки надо рассмотреть взаимосвязи между подмножествами технологических объектов, включающими в себя:  $T_1$  - подмножество кинематических характеристик,  $T_2$ - подмножество способов воздействия,  $T_3$  - подмножество характеристик инструмента,  $T_4$  - подмножество динамических характеристик,  $T_5$  - подмножество статических характеристик,  $T_6$  – подмножество обрабатываемых поверхностей,  $T_7$  - подмножество обработанных поверхностей,  $T_8$  - подмножество базовых поверхностей,  $T_9$  - подмножество станков для реализации методов обработки,  $T_{10}$  - подмножество режимов обработки,  $T_{11}$  - подмножество рабочих приспособлений. При этом первые пять подмножеств относятся к системе "метод обработки", остальные подмножества характеризуют другие технологические объекты, участвующие в процессе обработки деталей.

Данные объекты либо являются определяющими при выборе характеристик метода обработки, либо необходимы для его реализации в технологическом процессе. Множество «Т» технологических объектов:

$T = T_1 \cup T_2 \cup T_3 \cup T_4 \cup T_5 \cup T_6 \cup T_7 \cup T_8 \cup T_9 \cup T_{10} \cup T_{11}$  обладает множеством «М» свойств:  $M = M^1 \cup M^2 \cup M^3 \cup M^4 \cup M^5 \cup M^6 \cup M^7 \cup M^8 \cup M^9 \cup M^{10} \cup M^{11}$ .

Синтез метода обработки может осуществляться по двум основным алгоритмам. Алгоритм эвристического синтеза метода обработки относительно выбранного прототипа, т.е. наиболее близкого по технической

сущности представлен на рис. 19. 10 и может быть применен в том случае, если в действующем производстве необходимо улучшить качество обрабатываемых деталей и другие технико-экономические показатели операции или техпроцесса. Наиболее важными этапами вышеуказанного алгоритма являются поиск и анализ прототипа с определением технического или физического противоречий, а также поиск путей решения выявленных противоречий с формированием вариантов приемлемых технических решений. Их анализ и выбор оптимального метода обработки осуществляется по заранее выбранному критерию оптимальности (себестоимости, производительности, стойкости инструмента и т.д.) Для реализации выбранного метода обработки может быть осуществлена разработка нового или модернизация существующего оборудования, инструмента и технологической оснастки.

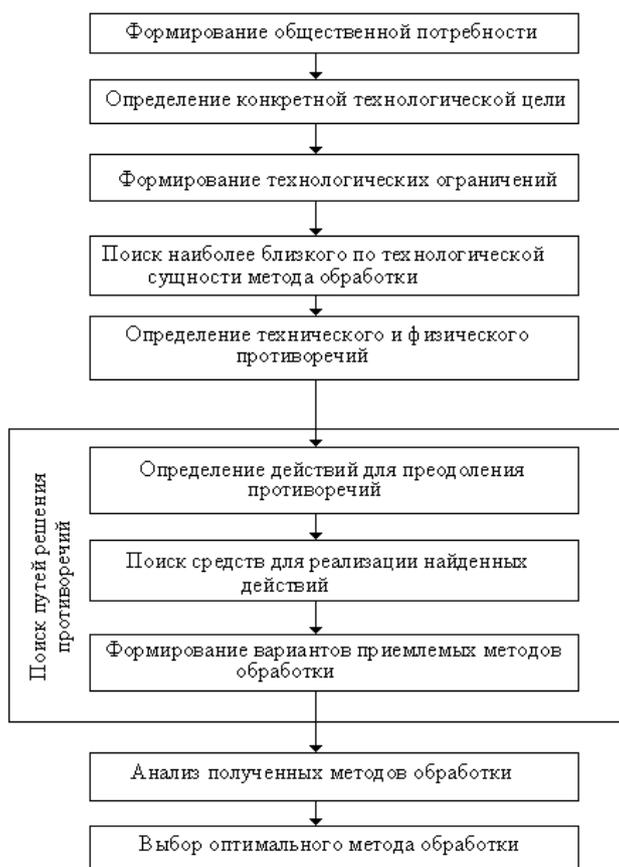


Рис. 19. 10. Алгоритм эвристического синтеза МО.

При технологической подготовке производства деталей из новых конструкционных материалов может возникнуть необходимость проектирования индивидуального метода обработки, имеющего принципиальные отличия от всех

существующих. В этом случае проектирование осуществляется по алгоритму, представленному на рис. 19.11, который включает в себя синтез технического решения по каждой характеристике метода обработки и

технологическим объектам его реализации. В каждом из блоков алгоритма после выбора тех или иных характеристик метода обработки осуществляется проектирование и расчет средств их реализации. Процесс функционирования созданной модели при реализации цели потребителя состоит из трех этапов: измерения, оценки и принятия решения. На первом этапе выбираются технологические и физические параметры согласно целям и ограничениям. На этапе оценки изыскиваются пути решений, заданных целью и ограничениями с помощью баз данных, содержащих два вида информации: временную и базовую. Временную информацию составляют ГОСТы, нормалы, справочники, различные нормативные документы и т.д. В базовую информацию входят установленные в настоящее время взаимосвязи между характеристиками МО, технологическими параметрами и физическими явлениями в зоне обработки по научно-технической и патентной литературе. Если в результате анализа временной и базовой информации невозможно реализовать цель потребителя за счет применения типовых решений или выявляется неопределенность взаимосвязей технологических факторов, параметров качества деталей и физических явлений в зоне обработки, то

после проверки цели потребителя на правомерность возникает необходимость проведения технологических и фундаментальных исследований.



Рис. 19. 11. Алгоритм морфологического синтеза метода обработки.

### *Контрольные вопросы*

1. Что такое «система», какую она имеет структуру?
2. Что такое целостность системы?
3. Что такое членимость системы?
4. Что такое интегративные качества системы?

## *Список литературы*

1. Технология конструкционных материалов: Учебник для машиностроительных специальностей ВУЗов. [Текст] /Дальский А.М., Барсукова Т.М., Бухаркин Л.Н., Гаврилюк В.С., Дмитриев А.М., Каширцев В.П., Кременский И.Г., Макаров Э.Л., Попов Е.А., Степанов Ю.А., Соколов Е.А. под редакцией Дальского А.М. – 5-е издание, М., Машиностроение, 2003. – 512с.
2. Материаловедение: Учебник для ВУЗов. [Текст] /Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г., Рыжов Н.М., Силаева В.И. под редакцией Арзамасова Б.Н. и Мухина Г.Г. – М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001 – 648с.
3. Конструкционные материалы [Текст] /Арзамасов Б.Н., Бродстрем Н.А., Буше Н.А. под редакцией Арзамасова Б.Н. – М., Машиностроение, 1990 – 687 с.
4. Материаловедение: Учебник для ВУЗов. [Текст] /Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. - 3-е издание, М., Машиностроение, 1990. – 252с.
5. Определение механических свойств материалов. [Текст] /Вербицкая А.Г. Кирносов В.И. - М., издательство стандартов. 1984. 191с.
6. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. [Текст] /Буланов И.М., Воробей В.В. - М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998 – 516с.
7. Технология литейного производства. Литье в песчаные формы: Учебник. [Текст] / Трухов А.П., Сорокин Ю.А., Ершов М.Ю., Благоднравов Б.П., Минаев А.А., Гини Э.Ч. под редакцией Трухова А.П. – М., издательский центр «Академия», 2005. – 528с.
8. Технология литейного производства. Специальные виды литья: Учебник. [Текст] /Гини Э.Ч., Зарубин А.М., Рыбкин В.А. под редакцией Рыбкина В.А. - М., издательский центр «Академия», 2005. – 353с.
9. *Баландин Г.Ф.* Основы теории формирования отливок. [Текст] / - М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998 – 486с.

10. Литье тонкостенных конструкций. [Текст] /Степанов Ю.А., Гини Э.Ч., Соколов Е.А., Матвейко Ю.П. - М.; Машиностроение; 1966 - 254с.
11. Центробежное литье. [Текст]/Юдин С.Б., Левин М.М., Розенфельд С.Е. - М.; Машиностроение; 1972 - 279с.
12. Сварка, резка, контроль: Справочник, в 2-х т. [Текст] / Г.П. Чернышов, Н.П. Алешин - М.: Машиностроение; 1985 – 624 и 480 с.
13. Сварка и свариваемые материалы: в 3-х т. [Текст] / Волченко В.Н., Ямпольский В.М., Николаев Г.А., Бернадский В.Н., Зубченко А.С., Каракозов Э.С., Макаров Э.Л., Никифоров Н.И., Смирнов В.В., Ющенко К.А. - М.; МГТУ им. Баумана; 1977 – 625с.
14. Технология создания неразъемных соединений при производстве газотурбинных двигателей. [Текст]/Крымов В.В., Елисеев Ю.С., Зудин К.И. - М.; Наука и технология; 2001 - 544 с.
15. Плазменная сварка. [Текст] /Ширшов И.Г., Котиков В.Н. - Л.; Машиностроение; 1987 - 192с.
16. Технология автомобилестроения: Учебник для вузов. [Текст] /Карунин А.Л., Бузник Е.Н., Дашенко О.А., Елхов П.Е., Редин В.Н., Тетерин В.Ф., Шпунькин Н.Ф., Гладков В.И., Букин-Батырев И.К., Зинченко В.М., Перекатов Ю.А. под ред. Дашенко А.И. – М.; Академический Проект; Трикста, 2005.-624 с.
17. Отделочные операции в машиностроении. [Текст] /Космачев И. Г., Дугин В.Н.; Немцев Б.А. -Л., Лениздат., 1985, 248 с.
18. *Резников А.Н.* Абразивная и алмазная обработка металлов., Справочник [Текст]/. - М., Машиностроение, 1977, 392 с.

## Содержание

<b>ЧАСТЬ 1. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>5</b>
<b>ГЛАВА 1. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ.....</b>	<b>6</b>
<b>ГЛАВА 2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ</b> <b>.....</b>	<b>43</b>
<b>ГЛАВА 3. ЖЕЛЕЗО И СПЛАВЫ НА ЕГО ОСНОВЕ.....</b>	<b>49</b>
<b>ГЛАВА 4. ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ДЕФОРМИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОВ И</b> <b>СПЛАВОВ.....</b>	<b>67</b>
<b>ГЛАВА 5. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СПЛАВОВ .....</b>	<b>79</b>
<b>ГЛАВА 6. ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СПЛАВОВ .....</b>	<b>99</b>
<b>ГЛАВА 7. КЛАССИФИКАЦИЯ СТАЛЕЙ.....</b>	<b>109</b>
<b>ГЛАВА 8. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ .....</b>	<b>130</b>
<b>ГЛАВА 9. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ.....</b>	<b>150</b>
<b>ГЛАВА 10. КОМПОЗИЦИОННЫЕ И ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....</b>	<b>164</b>
<b>ГЛАВА 11. МЕТАЛЛУРГИЯ.....</b>	<b>171</b>
<b>ГЛАВА 12. ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО .....</b>	<b>203</b>
<b>12.1. ОСНОВЫ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА .....</b>	<b>203</b>
<b>12.2. СПОСОБЫ ЛИТЬЯ.....</b>	<b>214</b>
<b>КРОМЕ ОПИСАННЫХ ВЫШЕ ПРИМЕНЯЮТ МНОГО ДРУГИХ СПЕЦИАЛЬНЫХ</b> <b>ВИДОВ ЛИТЬЯ: ЛИТЬЕ ПОД РЕГУЛИРУЕМЫМ ДАВЛЕНИЕМ, ВАКУУМНЫМ</b> <b>ВСАСЫВАНИЕМ, ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЕ И ДР., КОТОРЫЕ ПОЗВОЛЯЮТ ПОВЫСИТЬ</b> <b>КАЧЕСТВО ОТЛИВОК.....</b>	<b>241</b>
<b>12.3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОТЛИВОК ИЗ РАЗЛИЧНЫХ СПЛАВОВ</b>	<b>241</b>
<b>12.4. ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ</b>	<b>250</b>
<b>ГЛАВА 13. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....</b>	<b>257</b>
<b>ГЛАВА 14. СВАРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО.....</b>	<b>330</b>
<b>14.1. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ</b> <b>.....</b>	<b>330</b>

14.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВИДЫ СВАРКИ .....	339
ДУГОВАЯ СВАРКА В ЗАЩИТНОМ ГАЗЕ .....	350
14.3. ХИМИЧЕСКИЕ ВИДЫ СВАРКИ.....	361
14.4. ЛУЧЕВЫЕ ВИДЫ СВАРКИ .....	366
14.5. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВИДЫ СВАРКИ.....	371
14.6. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ВИДЫ СВАРКИ .....	380
14.7. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ	390
14.8. КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ .....	393
ГЛАВА 15. МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК .....	401
ГЛАВА 16. ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗАГОТОВОК БЕЗ СНЯТИЯ СТРУЖКИ .....	473
ГЛАВА 17. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗАГОТОВКИ.....	484
ГЛАВА 18. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ И ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	498
ГЛАВА 19. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ (МИД) .....	516