

**Министерство образования Российской Федерации
Российский химико-технологический университет
им. Д.И. Менделеева**

Новомосковский институт

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Учебное пособие для студентов
заочного факультета*

Новомосковск 2004

УДК 669.017 + 621.7

ББК 34

М 341

Рецензенты:

доктор химических наук, профессор (НИ РХТУ им. Д.И.Менделеева)

А.В.Волкович

кандидат технических наук, доцент (НИ РХТУ им. Д.И.Менделеева)

В.В.Воспенников

Сафонов Б.П., Марценко К.Н.

М 341 Материаловедение и технология конструкционных материалов. Учебное пособие для студентов заочного факультета / РХТУ им. Д.И. Менделеева, Новомосковский институт; Б.П. Сафонов, К.Н. Марценко. Новомосковск, 2004. – 194 с.

ISBN5-7237-0615-2

В учебном пособии рассмотрены вопросы: кристаллического строения металлических материалов, теория сплавов, железоуглеродистые сплавы, термическая обработка, цветные металлы, неметаллические и композиционные материалы, а также технологические методы переработки материалов в изделия.

Рассмотрены вопросы, связанные с выполнением студентами заочного факультета контрольной работы по курсу МиТКМ: правила оформления контрольной работы, теоретические вопросы и задачи контрольной работы.

В пособии содержатся методические указания по построению кривых охлаждения железоуглеродистых сплавов, по выбору режима термообработки сталей, по построению диаграмм состояния двойных сплавов и фазовому анализу сплавов, по микроструктурному анализу доэвтектоидной стали.

Ил. 77. Табл. 43. Библиогр. список 22 назв.

УДК 669.017 + 621.7

ББК 34

© Б.П.Сафонов, К.Н.Марценко 2004

© Новомосковский ин-т Российского
химико-технологического ун-та
им. Д.И.Менделеева, 2004

Предисловие

В системе общинженерной подготовки специалистов, в формировании у них инженерного мышления материаловедческая и технологическая подготовка занимает одно из центральных мест.

Для студентов немеханического профиля знание конструкционных материалов, возможностей и особенностей тех или иных технологических методов их переработки в готовые изделия позволяет успешно выполнять конструкторские работы в рамках курсового и дипломного проектирования.

Свойства металлов и сплавов неразрывно связаны с технологией изготовления деталей. Для инженера, занятого эксплуатацией промышленного оборудования и контрольно-измерительных приборов, знание и понимание внутренней взаимосвязи разделов курса МиТКМ чрезвычайно важно, поскольку раскрывает причинно-следственную связь формирования потребительских свойств изделий машиностроения.

Настоящее учебное пособие написано в соответствии с программой учебных дисциплин «Материаловедение и технология конструкционных материалов» для специальностей 1004, 1007, 1908 и «Материаловедение» для специальности 2102. Отличительной особенностью пособия, определяющей его структуру и подбор материала, является его многофункциональность.

Поскольку авторы поставили целью в рамках одного учебного пособия, изложить основы материаловедения и технологии переработки материалов, а также методические указания по выполнению контрольной работы студентами заочного факультета, поэтому пособие имеет соответствующий объем, насыщено иллюстрациями, справочным материалом в виде таблиц по свойствам материалов, имеет приложение, включающее перечень ГОСТов по материалам и методам испытаний и снабжено подробным предметным указателем.

Учебное пособие будет полезно также студентам старших курсов в качестве справочного руководства по конструкционным материалам, способам термообработки и формообразования деталей.

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры «Машиноведение и технология конструкционных материалов» Зоной Г.М. и Беговой А.В. за кропотливый труд по компьютерному набору текста, подготовке иллюстрационного материала и компьютерной верстке пособия.

Введение

В курсе МиТКМ изучаются в основном **конструкционные материалы**, т.е. материалы, применяемые для изготовления конструктивных элементов технических устройств, которые воспринимают силовую и иную эксплуатационную нагрузку и методы переработки материалов в готовые изделия.

Материаловедение – наука, изучающая взаимосвязь между составом, строением и свойствами материалов. Применяемые в технике материалы делятся на **металлические, неметаллические и композиционные**. Среди металлических материалов львиная доля (~90%) приходится на **железо-углеродистые сплавы (стали и чугуны)**. В машино- и приборостроении широко используются также **цветные металлы и сплавы** на их основе (**дуралюмины, силумины, бронзы, латуни и др.**).

Российские ученые внесли значительный вклад в развитие материаловедения и металлостроения.

П.П.Аносов (1799-1851 г.г.) впервые экспериментально установил существование взаимосвязи между строением стали и ее свойствами, исследовав структуру стали с помощью металлографического микроскопа (1831 г.), вновь открыл утерянный в средние века секрет изготовления булатной стали.

Д.К.Чернов (1839-1921 г.г.) открыл критические точки стали (1868 г.), в своих работах заложил фундамент современного материаловедения и термической обработки стали.

Н.С. Курнаков (1860-1944 г.г.) применил для исследования свойств сплавов методы физико-химического анализа (электрический, dilatометрический, магнитный и др.), получил известное правило о взаимосвязи концентрации и свойств сплавов разного фазового состава, так называемое «правило Курнакова».

Большой вклад в развитие металлостроения внесли зарубежные ученые: **Р.Аустен, Э.Бейн, В.Брегг, Э.Давенпорт, А.Мартенс, Г.Сорби, Г.Эрстед и др.**

Применяемые в технике материалы чрезвычайно разнообразны по своей природе и свойствам, поэтому разнообразны также технологические методы их переработки в изделия: **литье, пластическое деформирование, сварка и резание**. Изложение названных технологических методов переработки материалов в изделия составляет вторую часть курса МиТКМ – **технологии конструкционных материалов**.

1. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

1.1. Строение металлов

Металлы в твердом состоянии обладают рядом характерных свойств, основными из которых являются повышенная способность к пластической деформации, хорошая отражательная способность и металлический блеск.

Все металлы и металлические сплавы – тела **кристаллические**, атомы (ионы) расположены в металлах закономерно в отличие от **аморфных** тел, в которых атомы расположены хаотично.

В кристалле **частицы (ионы, атомы, молекулы)**, из которых построен кристалл, сближены до соприкосновения и располагаются различно, но закономерно по разным направлениям (рис. 1.а). Для упрощения пространственное изображение кристалла заменяют схемой (рис. 1.б), отмечая точками центры тяжести частиц (атомов). Кристаллы различаются симметрией расположения частиц.

Если в кристалле провести три направления x , y , z , не лежащие в одной плоскости, то расстояние между частицами, расположенными по этим направлениям, в общем случае неодинаковы и соответственно равны a , b , c (рис. 1.б)

Плоскости, параллельные координатным плоскостям, находящиеся на расстоянии a , b , c , разбивают кристалл на множество параллелепипедов, равных и параллельно ориентированных. Наименьший параллелепипед называют **элементарной ячейкой**. Последовательное перемещение элементарной ячейки образует пространственную **кристаллическую решетку**. Вершины параллелепипеда называют **узлами** пространственной решетки.

Для описания элементарной ячейки кристаллической решетки используют шесть величин: три отрезка (**периоды решетки**), равные расстояниям a , b , c до ближайших частиц по осям координат X , Y , Z . И три угла α , β , γ между этими отрезками. Соотношения между этими величинами определяются **симметрией**, согласно которой все кристаллы подразделяют на семь систем (**сингоний**) (табл. 1).

В большинстве случаев ячейки имеют сложное строение, так как частицы находятся не только в узлах, но и на гранях или в центре ячейки (рис. 2).

Среди кристаллов распространено явление **полиморфизма** – способность в твердом состоянии при различных температурах (или давлении) иметь различные типы кристаллических структур.

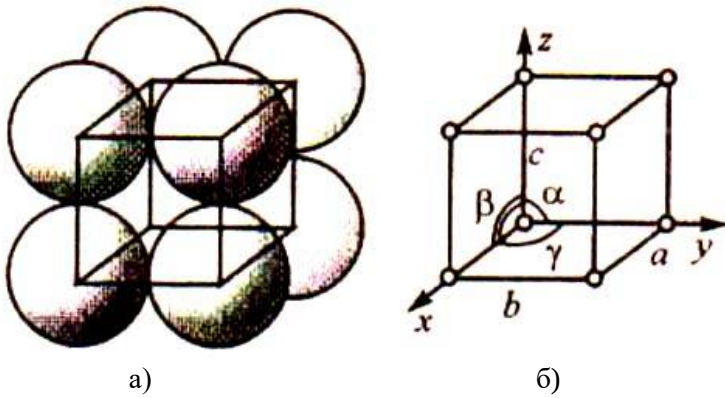


Рис.1. Расположение частиц в ячейке:
а – пространственное изображение; б- схема

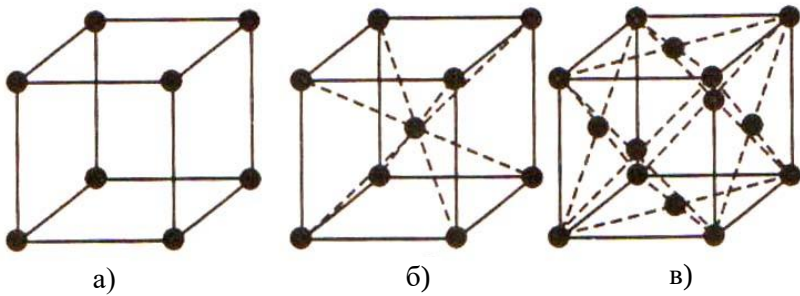


Рис.2. Типы элементарных ячеек кристаллических решеток:
а – простая кубическая; б- кубическая объемно-центрированная (ОЦК); в – кубическая гранецентрированная; (ГЦК)

Таблица 1.

Кристаллические системы элементов

Система (сингония)	Ребра	Углы	Металлы, сплавы
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	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
Гексагональная	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$	Be, Mg, Ca, Zn, Cd, Ti, Co, Zr
Тетрагональная	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Мартенсит
Кубическая	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Ag, Ti, Fe, Nb, V, W, Cu, Al, Ni, Pb, Cr, Co

Эти кристаллические структуры называют **аллотропическими формами** или **модификациями**

Низкотемпературную модификацию обозначают α , а высокотемпературные β , γ , δ и т.д. (табл. 2).

Полиморфизмом обладают около тридцати металлов. Быстрое охлаждение может сохранить высокотемпературную модификацию в течение длительного времени при комнатной температуре, так как низкая диффузионная подвижность атомов при $20 \dots 25^\circ \text{C}$ не способна вызвать перестройку решетки. Но данная модификация при комнатной температуре будет термодинамически неустойчивой.

Металлы после затвердевания представляют собой **поликристаллы** (рис. 3). Они состоят из **кристаллитов** или **зерен**, кристаллические решетки которых имеют различную пространственную ориентацию.

Каждый кристаллит обладает **анизотропией** свойств, т.е. его свойства зависят от направления измерения. Анизотропия обусловлена упорядоченным расположением атомов (ионов) в пространстве. В отличие от кристаллита поликристалл **изотропен**, т.к. насыщенность любого направления атомами в поликристалле одинакова (см. направления I и II на рис 3).

Строение металлов на уровне элементарной ячейки изучают на **дифрактометре** методами **рентгеноструктурного анализа**.

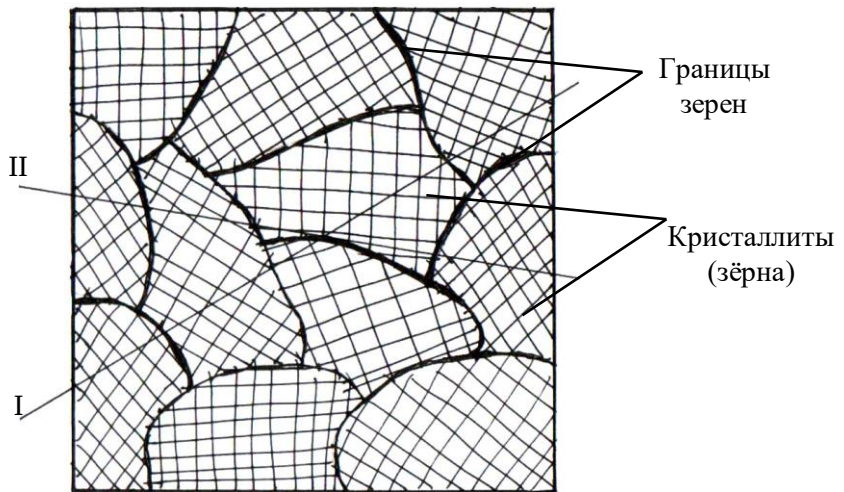


Рис.3. Поликристалл (схема):
I, II – направления с равной плотностью атомов
(изотропия поликристалла)

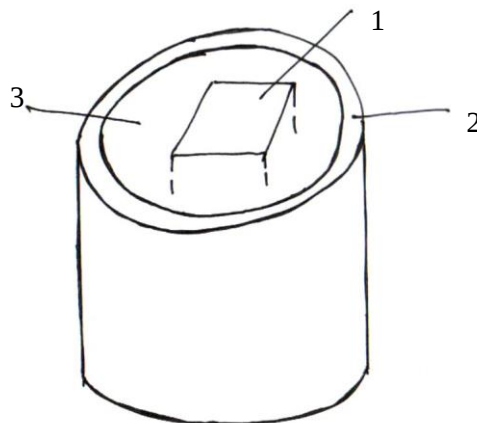


Рис.4. Микрошлиф в оправке (схема): 1- микрошлиф;
2- оправка; 3- заливка

Период решетки составляет величину порядка нанометра 1 нм (1 нм = 10^{-9} м).

Таблица 2.

Кристаллическая структура некоторых
полиморфных металлов

Металл	Модификация	Кристаллическая структура	Температура существования, °С
Титан	Ti α	ГП	до 882
	Ti β	ОЦК	882 – 1668
Цирконий	Zr α	ГП	до 862
	Zr β	ОЦК	862 – 1852
Олово	Sn α	Алмазная	до 13
	Sn β	ТОЦ	13 – 161
	Sn γ	Ромбическая	161 – 232
Железо	Fe α	ОЦК	до 911
	Fe γ	ГЦК	911 – 1392
	Fe δ	ОЦК	1392 – 1539
Кобальт	Co α	ГП	до 447
	Co β	ГЦК	447 - 1490
Аббревиатуры кристаллических структур: ГП – гексагональная плотноупакованная; ОЦК – кубическая объемно-центрированная; ТОЦ – тетрагональная; ГЦК – кубическая гранецентрированная;			

Например, Fe α имеет период решетки $d = 2,861 \cdot 10^{-10}$ м, Fe γ – $d = 3,633 \cdot 10^{-10}$ м.

Размеры, форму и взаимное расположение кристаллитов в поликристалле изучает **металлография**. Объектом исследования при этом

является специально подготовленный для исследования на микроскопе образец металла, именуемый **микрошлифом**, который зафиксирован в оправке (рис. 4).

Оправка необходима для сохранения плоскости микрошлифа, заливка служит для фиксации образца в оправке. Для заливки используются **эпоксидная смола** или легкоплавкие сплавы, например сплав Вуда, имеющий состав 50% Bi, 12,5% Pb, 12,5% Sn, 12,5% Cd и температуру плавления $t_{пл} = 68^{\circ}\text{C}$.

Поверхность микрошлифа шлифуют для получения плоскости, затем полируют до зеркального блеска и травят. Для углеродистых сталей в качестве травителя используют спиртовой раствор азотной кислоты. С помощью травления выявляются границы зерен, которые видны на поверхности шлифа в виде темной сетки.

Микроструктуру металла наблюдают с помощью **металлографического микроскопа** (работает в отраженном свете) при увеличении $\times 100 \dots 500$ (в редких случаях до $\times 2000$).

Строение реальных кристаллов отличается от идеальных. В реальных кристаллах всегда содержатся дефекты, которые подразделяют на точечные, линейные, поверхностные и объемные.

Размеры точечного дефекта близки к межатомному расстоянию. К самым простым точечным дефектам относятся **вакансии**, **межузельные атомы** основного вещества, чужеродные **атомы внедрения** (рис. 5).

Вакансии и межузельные атомы появляются в кристаллах при любой температуре выше абсолютного нуля из-за тепловых колебаний атомов. Каждой температуре соответствует равновесная концентрация точечных дефектов. Например, в меди при комнатной температуре содержатся $10^{-13}\%$ (ат.) вакансий, а вблизи точки плавления – уже $0,01\%$ (ат.), т.е. концентрация вакансий увеличивается в 10^{11} раз.

У линейных дефектов длина на несколько порядков больше ширины. Важнейшие виды линейных несовершенств кристаллического строения – **краевые** и **винтовые дислокации** (рис. 6). Краевая дислокация в сечении представляет собой край «лишней» полуплоскости в решетке. Вокруг дислокаций решетка упруго искажена.

Наличие дислокаций в металле характеризуется **плотностью дислокаций** – это суммарная длина всех дислокаций в единице объема ρ [см^{-2}]. В полупроводниковых кристаллах она равна $10^4 \dots 10^5 \text{см}^{-2}$, у отожженных металлов – $10^6 \dots 10^8 \text{см}^{-2}$. При холодном пластическом деформировании металла плотность дислокаций увеличивается до $\rho = 10^{11} \dots 10^{12} \text{см}^{-2}$.

У поверхностных дефектов мала толщина, а ширина и длина больше ее на несколько порядков. Особенно большое значение в формировании свойств металла имеют **границы зерен**.

Объемные дефекты (поры, трещины) имеют значительные размеры во всех трех направлениях.

Дефекты кристаллов сохраняют подвижность, способны перемещаться в кристаллической решетке и при сближении взаимодействуют между собой. В большинстве случаев подвижность дефектов контролируется диффузией. Передвижение дислокаций под действием напряжений не связано с массопереносом, дислокации подвижны и при низких температурах, когда диффузия уже не играет никакой роли.

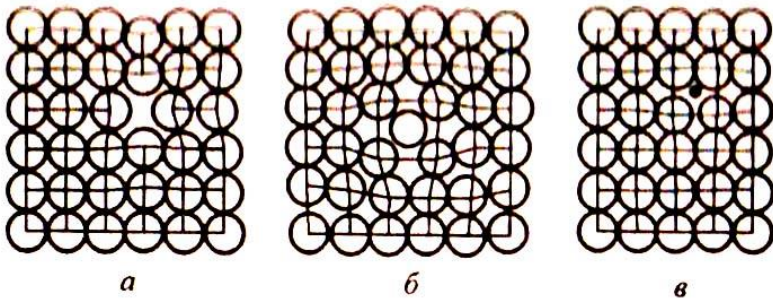


Рис.5. Точечные дефекты в кристаллической решетке:
а – вакансии; б- межузельный атом; в- примесный атом внедрения

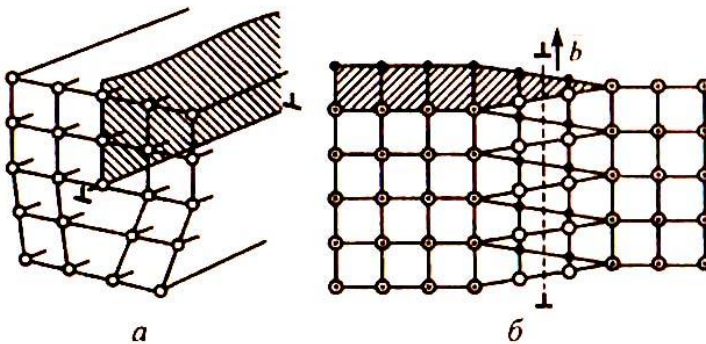


Рис.6. Схемы краевой (а) и винтовой (б) дислокаций

1.2. Пластическая деформация и механические свойства металлов

Деформацией называется изменение размеров и формы тела под действием приложенных к нему сил. В зависимости от наличия остаточной деформации металла после снятия нагрузки различают **упругую** и **пластическую деформацию**. Пластическая деформация металла происходит или по схеме **скольжения** (Fe, Cu, Al, Mo и др.), или **двойникования** (Ti, Mg, Be, Zr и др.) (рис. 7).

В результате увеличения приложенной нагрузки выше определенного уровня происходит **разрушение** тела, т.е. разделение его на части под действием приложенной нагрузки.

Разрушение бывает **хрупким** и **вязким**. Хрупкое разрушение происходит без предшествующей пластической деформации. Это наиболее опасный вид разрушения, т.к. хрупкое разрушение деталей происходит внезапно и часто приводит к аварийным отказам оборудования с катастрофическими последствиями.

Механическими свойствами называются свойства металла, определяемые либо пластическим деформированием (вдавливание, изгиб), либо разрушением (разрыв, удар) специального образца на специальном оборудовании (**твердомеры, прессы, разрывные машины, маятниковые копры**).

Наиболее информативным является испытание на растяжение (ГОСТ 1497). При растяжении используется цилиндрический (рис. 8) или плоский образец. В процессе испытания растяжением регистрируется нагрузка на образце и его удлинение на **диаграмме растяжения** «Р - Δl » (рис. 9).

К механическим свойствам металла относят **прочность** и **пластичность**. Под прочностью металла понимают сопротивление его нагрузке, а под пластичностью – способность металла деформироваться, не разрушаясь.

При растяжении определяют ряд прочностных свойств, основными из них для инженерной практики являются предел текучести и предел прочности.

Предел текучести представляет собой напряжение, соответствующее началу пластической деформации образца. Для металлов с выраженной текучестью (рис. 9а) определяют физический предел текучести σ_T , для металлов без выраженной площадки текучести (рис. 9б) – условный предел текучести $\sigma_{0,2}$

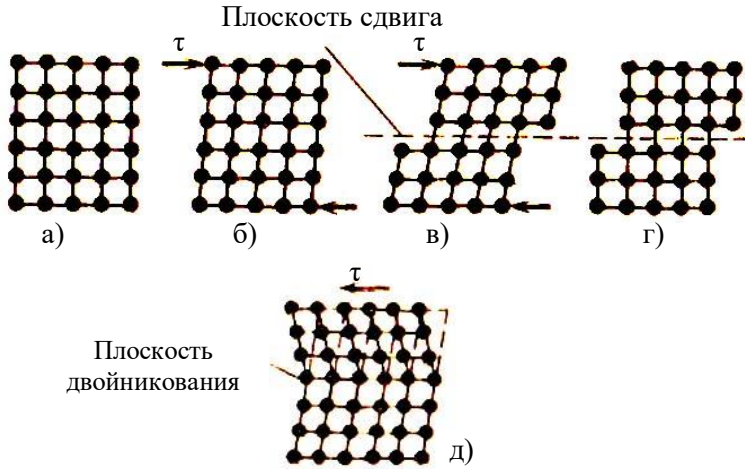


Рис.7. Схема упругой и пластической деформации металла под действием касательных напряжений:
а- первоначальный кристалл; б, в, г- стадии появления сдвига; д- образование двойника

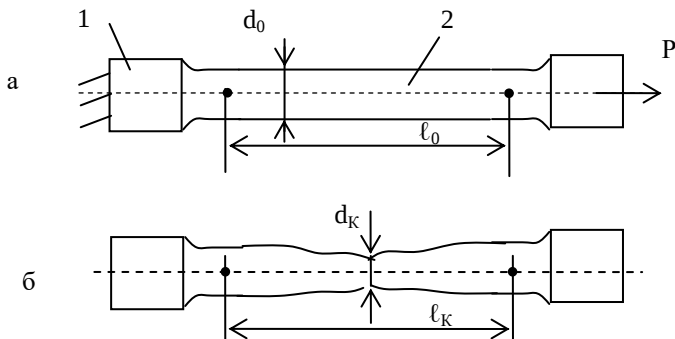


Рис.8. Разрывной образец до (а) и после (б) испытаний:
1- головка; 2- рабочая часть

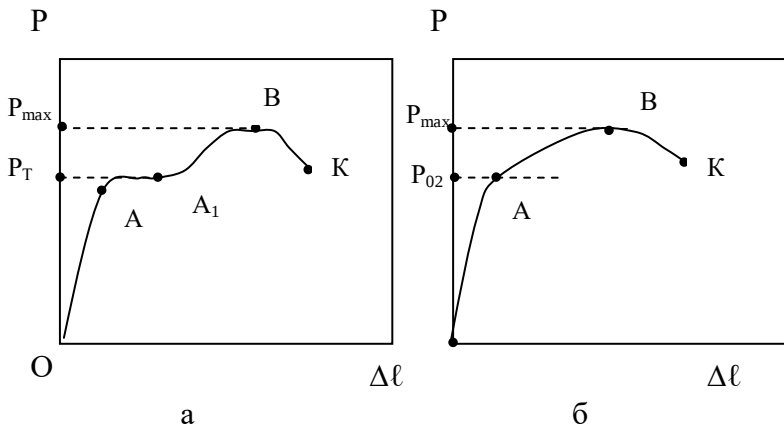


Рис. 9. Диаграмма растяжения малоуглеродистой (а) и среднеуглеродистой (б) стали (схема)

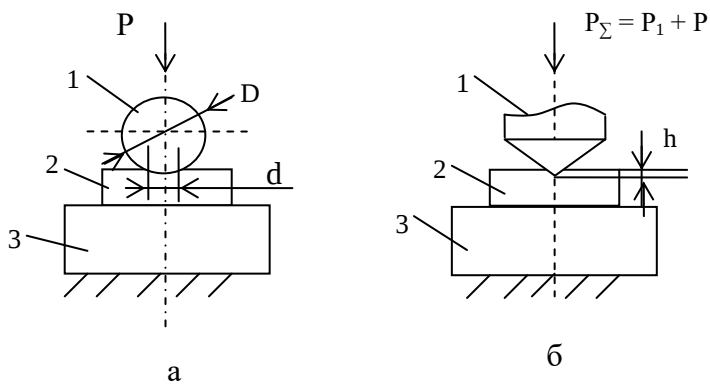


Рис. 10. Схема испытаний при определении твердости по Бринеллю (а) и Роквеллу (б): 1 – индентор; 2 – образец; 3 – предметный столик твердомера

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}, \quad \sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0} \quad (1)$$

где F_0 – площадь сечения рабочей части образца до деформации.

Предел прочности σ_B равен отношению максимальной нагрузки $P_{\max}$ на образце к исходной площади сечения F_0

$$\sigma_B = \frac{P_{\max}}{F_0} \quad (2)$$

Напряжения σ_T , σ_B имеют размерность кгс/мм² или МПа.
1 кгс/мм² = 9,8 МПа ~ 10 МПа.

Пластичность металла характеризуется **относительным удлинением δ** и **относительным сужением ψ**

$$\delta = \frac{\ell_k - \ell_0}{\ell_0} \cdot 100\% \quad (3)$$

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\% \quad , \quad (4)$$

где ℓ_0 , ℓ_k – базовая длина образца до и после испытания;

F_k – площадь сечения образца в шейке.

Прочность металла можно определить также пластическим внедрением в его поверхность твердого тела специальной формы – **индентора**. При таком испытании определяется **твердость** металла.

Твердость характеризует сопротивление материала местной пластической деформации. Такое же сопротивление оценивает и предел прочности, при определении которого возникает сосредоточенная деформация в области шейки разрывного образца. Поэтому для ряда материалов численные значения твердости и предела прочности пропорциональны друг другу, и выражаются соотношением вида $H = k\sigma$.

Отмеченная корреляция твердости и предела прочности, а также простота измерения позволяют считать испытания на твердость одним из наиболее распространенных (технологичных) видов механических испытаний. В заводской практике наиболее широко применяют два метода измерения твердости: по Бринеллю и Роквеллу.

Твердость по Бринеллю ГОСТ 9012. При этом методе измерения твердости в поверхность образца вдавливают (рис. 10а) закаленный стальной шарик диаметром $D = 10; 5; 2,5$ мм при действии нагрузки $P = 15,6 \dots 3000$ кг.

Численно твердость по Бринеллю **НВ** определяется как отношение нагрузки P на индентор к площади поверхности $F_{отп}$ отпечатка

$$HB = \frac{P}{F_{отп}} = \frac{2P}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}, \quad (5)$$

где D – диаметр шарика; d – диаметр отпечатка

Выбор P и D производится в зависимости от твердости металла и толщины образца δ . Для стали при $\delta > 6$ мм, $D = 10$ мм $P = 30D^2 = 3000$ кг.

Число твердости по Бринеллю имеет размерность кгс/мм² или МПа, значение твердости по ГОСТ 9012 записывается без единиц измерения, например 200 НВ или 2000 НВ.

На практике при измерении НВ расчет по формуле (5) не производят, а используют таблицы ГОСТа 9012, указывающие значение НВ в зависимости от измеренного диаметра отпечатка d и выбранных D , P .

Способ измерения твердости по Бринеллю не является универсальным. Его используют для материалов малой и средней твердости: сталей - до 450 НВ, цветных сплавов – до 200 НВ.

Твердость по Роквеллу ГОСТ 9013. Этот метод измерения твердости более универсален и удобен (технологичен) чем метод Бринелля. Метод Роквелла не предполагает измерение размеров отпечатка, так как число твердости HR отсчитывают непосредственно по шкалам твердомера.

Измерения HR проводятся в автоматическом режиме. Нагрузка $P_{\Sigma} = P_0 + P$ прикладывается в два этапа. Предварительная нагрузка $P_0 = 10$ кгс приводит в соприкосновение индентор и образец, основная нагрузка P обеспечивает проникновение индентора на некоторую глубину h , величина которой и характеризует твердость металла (рис. 10б). **Индентором** служит **алмазный конус** с углом при вершине 120° (показан на рис. 10б) или **стальной закаленный шарик** диаметром $D = 1/16'' = 1,588$ мм.

Нагрузку P_{Σ} и индентор выбирают в зависимости от предполагаемой твердости исследуемого образца. Твердомер Роквелла имеет три измерительных шкалы: А, В, С. Обозначение твердости включает в себя обозначение метода, шкалы и численное значение: 80HRA, 60HRC, 32HRB.

Шкала А (индентор – алмазный конус, $P_{\Sigma} = 60$ кгс) применяется для особо твердых материалов (быстрорежущие стали, твердые сплавы и др.), для тонких листовых материалов или тонких (0,5...1 мм) поверхностных слоев. Пределы измерения твердости по шкале А: 70HRA ...85HRA.

Шкала В (индентор – шарик, $P_{\Sigma} = 100$ кгс) служит для определения твердости сравнительно мягких материалов (отожженные стали, цветные сплавы). Пределы измерения твердости по шкале В: 25 HRB ...100 HRB.

Шкала С (индентор – алмазный или твердосплавный конус, $P_{\Sigma} = 150$ кгс) служит для материалов средней твердости (закаленные стали). Пределы измерения твердости по шкале С: 20HRC...67HRC.

С целью обеспечения единства измерений в нашей стране с 01.07.1980 г. введен *государственный специальный эталон и единая шкала твердости C_{Σ} по Роквеллу* (ГОСТ 8.064-79). Все образцовые и рабочие средства настроены и поверяются по шкале C_{Σ} . Твердость, измеренную по шкале C_{Σ} , воспроизводимой этим эталоном, обозначают HRC $_{\Sigma}$, в отличие от обозначения HRC ранее применявшегося в промышленности (табл. 3).

Таблица 3.

Перевод чисел твердости HRC в числа твердости HRC $_{\Sigma}$

HRC	HRC $_{\Sigma}$	HRC	HRC $_{\Sigma}$	HRC	HRC $_{\Sigma}$	HRC	HRC $_{\Sigma}$	HRC	HRC $_{\Sigma}$
20	22,1	30	31,8	40	41,6	50	51,3	60	61,0
25	27,0	35	36,7	45	46,4	55	56,1	65	65,8

Соотношение чисел твердости HB, HRA, HRC, HRB приведено в таблице 4.

Таблица 4.

Соответствие чисел твердости по Бринеллю и Роквеллу

Бринелль		Роквелл			Бринелль		Роквелл		
D, мм	HB	HRA	HRC	HRB	D, мм	HB	HRA	HRC	HRB
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
2,20	782	89	72,0	-	3,70	269	65,0	28,0	-
2,25	744	87	69,0	-	3,74	263	64,0	27,0	-
2,30	713	85	67,0	-	3,80	255	64,0	26,0	-
2,34	688	84,5	65,0	-	3,85	248	63,0	25,0	-
2,37	688	83,5	64,0	-	3,90	241	63,0	24,0	100
2,39	659	83,0	63,0	-	3,96	234	62,0	23,0	99
2,42	643	82,5	62,0	-	4,00	229	62,0	22,0	98
2,45	627	82,0	61,0	-	4,06	222	61,0	21,0	97
2,48	611	-	60,0	-	4,10	217	61,0	20,0	97
2,50	601	81,0	59,0	-	4,15	212	60,0	19,0	96
2,54	582	80,5	58,0	-	4,18	209	60,0	-	95
2,56	573	80,0	57,0	-	4,20	207	60,0	18,0	95
2,60	555	79,0	56,0	-	4,22	204	60,0		94
2,61	551	79,0	55,0	-	4,25	201	59,0		-

1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
2,65	534	78,5	54,0	-	4,30	197	58,0		93
2,68	522	78,0	53,0	-	4,32	195	58,0		92
2,70	514	-	-	-	4,34	193	58,0		-
2,72	507	77,0	52,0	-	4,36	191	58,0		-
2,75	495	76,0	51,0	-	4,40	187	57,0		91
2,76	492	76,0	50,0	-	4,45	183	56,0		89
2,81	474	76,0	49,0	-	4,52	177	56,0		88
2,87	454	75,0	48,0	-	4,60	170	55,0		86
2,90	444	74,0	47,0	-	4,65	167	54,0		85
2,91	441	74,0	46,0	-	4,72	161	53,0		84
2,95	429	73,0	45,0	-	4,80	156	52,0		82
3,00	415	73,0	44,0	-	4,91	148	51,0		79
3,02	409	72,0	43,0	-	4,95	146	50,0		78
3,06	398	72,0	42,0	-	5,00	143	-		77
3,10	388	71,0	41,0	-	5,05	140	-		77
3,14	378	71,0	40,0	-	5,15	134	-		74
3,20	363	70,0	39,0	-	5,21	130	-		72
3,24	354	69,0	38,0	-	5,40	121	-		68
3,30	341	69,0	37,0	-	5,50	116	-		65
3,36	329	68,0	36,0	-	5,59	112	-		63
3,40	321	68,0	35,0	-	5,68	108	-		61
3,44	313	67,0	34,0	-	5,78	104			58
3,48	306	67,0	33,0	-	5,87	100			55
3,52	298	67,0	32,0	-	5,99	96			52
3,58	288	66,0	33,0		6,16	90			48
3,60	285	66,0	32,0		6,48	80			40
3,66	275	65,0	29,0		6,63	76			36

Примечания:

1. Указанные в таблице значения твердости по Роквеллу соответствуют значениям твердости по Бринеллю, определенным с помощью шарика D=10 мм при нагрузке P=3000 кгс.
2. Числа твердости, напечатанные **жирным шрифтом**, приняты ГОСТ.

При работе деталей машин возможны динамические нагрузки, при которых многие металлы проявляют склонность к хрупкому разрушению.

Склонность металла к хрупкому разрушению оценивают по его **ударной вязкости**, определяемой при ударном изгибе на маятниковом копре надрезанного образца (рис. 11)

$$KC = \frac{K_0 - K_{ост}}{F_H}, \quad (6)$$

где KC – ударная вязкость; K_0 , $K_{ост}$ – начальная и остаточная энергия маятника, кгс·м, МДж; F_H – площадь сечения образца в надрезе, см².

В зависимости от формы надреза различают КСУ (ударная вязкость, определенная на *образце Менаже* с U-образным надрезом) и КСВ (на *образце Шарпи* с V-образным надрезом). Надрезы имеют одинаковую глубину 2 мм, и различаются остротой. Образец Менаже имеет радиус надреза 1 мм, а образец Шарпи – 0,25 мм.

Ударная вязкость позволяет оценить *надежность металла* – способность металла противостоять хрупкому разрушению. Ударная вязкость из всех характеристик механических свойств наиболее чувствительна к снижению температуры. Поэтому испытания на ударную вязкость при пониженных температурах используют для определения *порога хладноломкости* $t_{кл}$ – температуры или интервала температур, в котором происходит снижение ударной вязкости (рис. 12).

Для обеспечения надежной работы металла необходимо, чтобы рабочая температура была выше порога хладноломкости

$$t_{раб} > t_{кл}.$$

1.3. Деформационное упрочнение и рекристаллизация

Для кристаллов существует понятие *теоретической прочности*, под которой понимают предельное напряжение, предшествующее разрыву межатомных связей. Теоретическая прочность $\sigma_{теор}$ кристалла может быть рассчитана по формуле Я.И. Френкеля

$$\sigma_{теор} \approx \frac{G}{2\pi} \quad (7)$$

где G – модуль сдвига металла.

Для железа имеем $G = 8470$ кгс/мм², тогда по формуле 7 теоретическая прочность железа составит $\sigma_{теор} = 1332$ кгс/мм². Техническое железо однако имеет $\sigma_{0,2} = 10$ кгс/мм². Т.е. реальная прочность кристалла меньше теоретически возможной более чем в 100 раз.

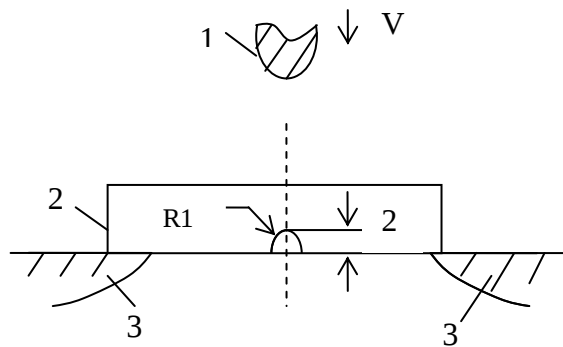


Рис. 11. Схема испытания при определении ударной вязкости: 1 – нож маятника; 2 – образец Менаже; 3 – упоры маятникового копра

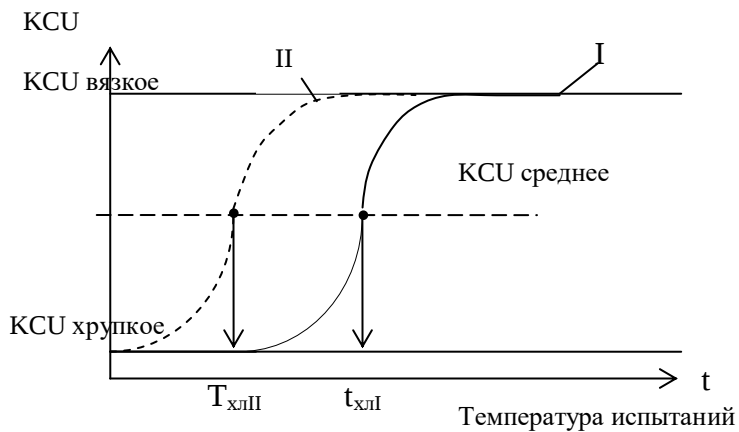


Рис. 12. Определение порога хладноломкости $t_{хл}$ по температурной зависимости ударной вязкости (схема)

Это различие настолько значительно, что были поставлены под сомнение формула Френкеля и сами представления о теоретической прочности. Для объяснения этого расхождения в первой половине XX столетия была разработана (Тейлором и одновременно с ним Орованом и Полани) **теория дислокаций**, которая связывает прочность металла с его дислокационной структурой.

И.А. Одинг и А.А. Бочвар исследовали влияние плотности дислокаций на прочность кристаллов. Получено, что прочность металлов не является линейной функцией плотности дислокаций (рис. 13).

Как видно из рис. 13 минимальная прочность определяется некоторой критической плотностью дислокаций $\rho_{\text{крит}} = 10^6 \dots 10^8 \text{ см}^{-2}$ и относится к отожженным металлам ($\sigma_{0,2} = 10^{-5} \dots 10^{-4} \text{ Г}$). Повышение прочности металла может достигаться созданием металлов и сплавов с бездефектной структурой (**нитевидные кристаллы «усы» железа** имеют $\sigma_{\text{в}} = 1300 \text{ кгс/мм}^2$) или повышением плотности дефектов (в том числе и дислокаций), затрудняющих движение дислокаций. Повышение прочности возможно также созданием **композиционных материалов**.

При увеличении количества дефектов (дислокаций) кристаллического строения свыше $\rho_{\text{крит}}$ (см. рис. 13) происходит упрочнение металла. Плотность дислокаций в деформированном металле не должна превышать $10^{12} \dots 10^{13} \text{ см}^{-2}$. При большей плотности дефектов в металле образуются трещины, приводящие к разрушению.

Во всех случаях упрочнения (наклеп, легирование, термическая и термомеханическая обработка) создаются условия для **торможения дислокаций** в результате увеличения их плотности (**создание дислокационных барьеров**), измельчения блоков (увеличение малоугловых границ), образования **дисперсных частиц второй фазы** (карбидов, нитридов и др. химических соединений).

При легировании и термической обработке упрочнение связано с образованием твердого раствора, гетерогенных структур различной дисперсности или метастабильных структур, например мартенсита.

Пластически деформированный металл запасает 5-10% энергии, затраченной на деформирование. При деформировании увеличиваются прочностные характеристики (H_B , $\sigma_{0,2}$, $\sigma_{\text{в}}$ и др.) и понижаются пластические свойства (δ , ψ), а также вязкость (КСУ).

Металлы интенсивно наклепываются в начальной стадии деформирования, затем при возрастании степени деформации механические свойства изменяются незначительно (рис. 14).

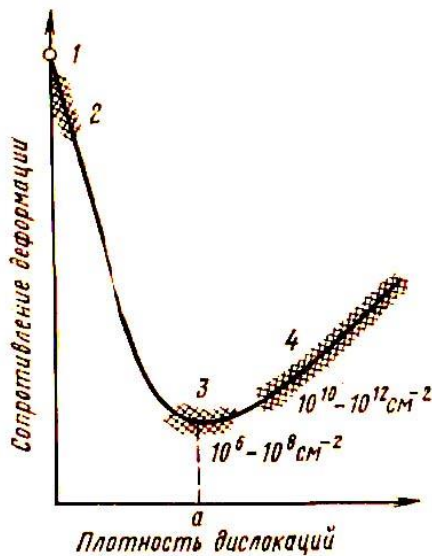


Рис.13. Схема зависимости прочности от плотности дислокаций и других дефектов в металлах (И.А. Одинг, А.А. Бочвар): 1- теоретическая прочность; 2-4- реальная прочность (2- «усы»; 3- чистые отожженные металлы; 4- сплавы, упрочненные легированием, пластическим деформированием, термической или термомеханической обработкой)

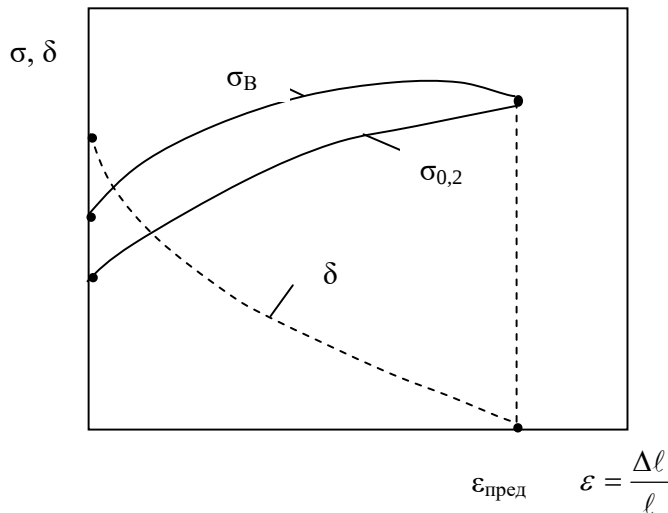


Рис. 14. Зависимость механических σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ свойств холоднодеформированного металла от степени деформации ε (схема)

При достижении предельной деформации $\sigma_{0,2}$ и σ_B сравниваются, а относительное удлинение становится равным нулю, дальнейшая деформация при этом приводит к разрушению металла.

Путем **деформационного упрочнения (наклепа)** HV и σ_B удастся повысить в 1,5...3 раза, а $\sigma_{0,2}$ в 3-7 раз. При поверхностном пластическом деформировании (обдвка дробью, обкатка роликом и пр.) в поверхностном слое формируются напряжения сжатия, а под ним, на большом расстоянии от поверхности, появятся напряжения растяжения. Сжимающие напряжения в поверхностном слое замедляют зарождение усталостной трещины и тем самым увеличивают долговечность деталей, работающих при знакопеременных (циклических) напряжениях (валы, зубчатые колеса и др.)

Однако наклепанные металлы легче корродируют и склонны к коррозионному растрескиванию. Образование текстуры деформации вызывает также анизотропию свойств металла.

Несмотря на снижение пластичности, наклеп широко используют для повышения прочности деталей, изготовленных методами холодной обработки давлением. Снижение пластичности при наклепе улучшает обрабатываемость резанием вязких и пластичных материалов (латуней, сплавов алюминия и др.).

Неравновесная структура, созданная холодным деформированием, у большинства металлов устойчива при комнатной температуре (исключение составляют легкоплавкие металлы Pb, Sn и др.). При нагреве холоднодеформированного металла он стремится вернуться в состояние до деформации.

Процессы, происходящие при нагреве, подразделяют на возврат и рекристаллизацию.

Возвратом называют все изменения тонкой структуры и свойств, которые не сопровождаются изменением микроструктуры деформированного металла, т.е. размер и форма зерен при возврате не изменяется.

Рекристаллизация – это процесс зарождения и роста новых зерен с меньшим количеством дефектов строения; в результате рекристаллизации образуются новые, чаще всего равноосные зерна (рис. 15).

В зависимости от температуры нагрева и времени выдержки различают три стадии рекристаллизации: первичная, собирательная и вторичная.

Первичная рекристаллизация начинается с образования зародышей новых зерен и заканчивается полным замещением наклепанного металла новой поликристаллической структурой (рис. 15а-в).

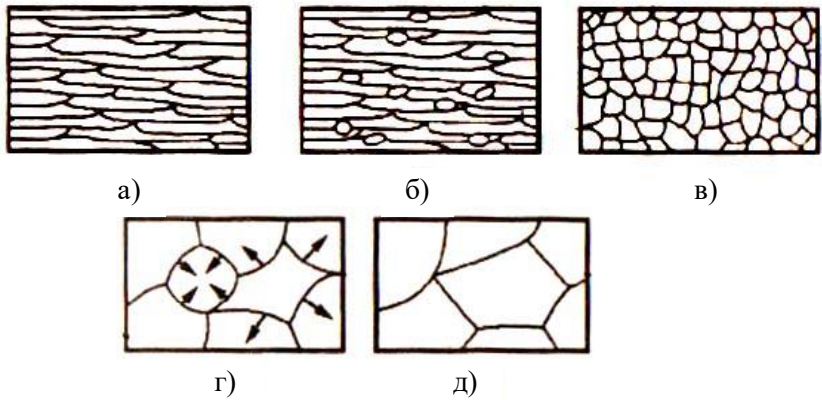


Рис.15. Схема изменения микроструктуры холоднодеформированного металла при нагреве:

а – ориентированные по нагрузке зерна деформированного металла;
 б- начало первичной рекристаллизации; в- завершение первичной рекристаллизации; г- рост зерна; д- образование равновесной структуры

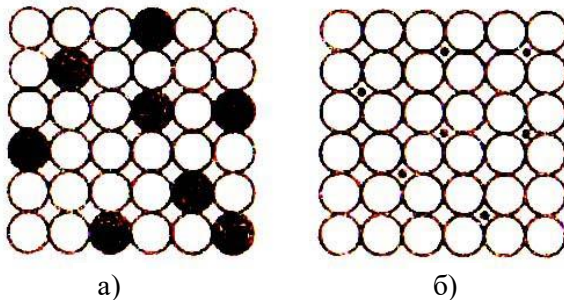


Рис.16. Атомно-кристаллическая структура твердого раствора (схема):
а- твердый раствор замещения; б- твердый раствор внедрения

Для начала первичной рекристаллизации необходимы два условия:

- предварительная деформация наклепанного металла должна быть больше критической

$$\varepsilon > \varepsilon_{\text{крит}};$$

- температура нагрева должна превысить критическое значение $t > t_{\text{крит.}}$

Критическая температура $t_{\text{крит}}$ зависит от степени деформации металла ε ($\varepsilon \uparrow$, $t_{\text{крит}} \downarrow$) и наличия в нем примесей ($\Sigma_{\text{примесей}} \uparrow$, $t_{\text{крит}} \uparrow$). $t_{\text{крит}}$ называется **температурным порогом рекристаллизации $t_{\text{пр}}$** .

А.А. Бочвар получил правило для определения температурного порога рекристаллизации $T_{\text{пр}}$ для технически чистых металлов, подвергнутых значительной деформации

$$T_{\text{пр}} = 0,4 T_{\text{пл}}, \text{ К}, \quad (8)$$

где $T_{\text{пл}}$ – температура плавления деформированного металла.

Для алюминия, меди и железа технической чистоты температурный порог рекристаллизации равен соответственно 100, 270 и 450°C.

При **собирательной** (рис. 15г) и **вторичной** (рис. 15д) рекристаллизации происходит рост зерен. Вторичной рекристаллизации соответствуют высокие температуры нагрева наклепанного металла.

Явление рекристаллизации имеет важное практическое значение. Чтобы восстановить структуру и свойства наклепанного металла (например, при необходимости продолжить обработку давлением путем прокатки, протяжки, волочения и т.п.), его необходимо нагреть выше $t_{\text{пр}}$. Такая термическая обработка металла называется **рекристаллизационным отжигом**.

При температуре обработки давлением выше $t_{\text{пр}}$ упрочнение металла снимается тем быстрее, чем больше перегрев металла по отношению к $t_{\text{пр}}$. При очень высокой температуре (**ковочные температуры**) рекристаллизация завершается в доли секунды.

Обработка металла давлением при температурах выше $t_{\text{пр}}$, когда нет упрочнения металла, называется **горячей деформацией**. Обработка давлением при температуре ниже $t_{\text{пр}}$ вызывает деформационное упрочнение (наклеп) металла и называется **холодной деформацией**.

1.4. Теория сплавов

Сплавом называют вещество, полученное **сплавлением** двух и более компонентов. В настоящее время понятие сплава применяют для более широкого круга веществ. Сплавы получают не только сплавлением компонентов, но и с использованием различных технологических способов: **порошковой металлургии** (прессование твердых частиц и их последующее спекание при высоких температурах), **диффузионных методов** (проникновение одного вещества в другое твердое вещество при высоких температурах), **плазменного напыления**, **кристаллизации из паров в вакууме**, **электролиза** и др.

1.4.1. Фазы сплавов

В сплавах компоненты могут по-разному взаимодействовать между собой, образуя различные по химическому составу, типу связи и строению кристаллические фазы.

Фаза – однородная часть сплава (системы), отделенная от других частей поверхностью раздела, при переходе через которую свойства сплава изменяются скачком.

В зависимости от атомно-кристаллической структуры фазы сплава могут представлять собой твердые растворы или химические соединения.

Твердый раствор – однофазное твердое вещество переменного состава. Твердые растворы обозначаются буквами греческого алфавита: α , β , γ и т.д. или $A(B)$, где A – **растворитель**, B – **растворенный элемент**.

Атомы растворенного элемента B размещаются в кристаллической решетке растворителя-элемента A , замещая атомы в узлах решетки или внедряясь между узлами. В первом случае фазы сплава называют **твердыми растворами замещения**, во втором – **твердыми растворами внедрения** (рис. 16). Количество замещенных атомов, так же как и количество внедренных, может изменяться в широких пределах, что и приводит к переменной растворимости твердых

растворов. С ростом температуры растворимость компонентов сплава обычно повышается.

Образование твердых растворов всегда сопровождается увеличением электрического сопротивления; твердые растворы обычно менее пластичные (исключение составляют твердые растворы на основе меди) и всегда более твердые и прочные, чем чистые металлы.

Твердые растворы по свойствам наиболее близки к растворителю, так как сохраняют его кристаллическую решетку и тип связи. Твердые растворы на основе металлов отличаются высокой *технологической пластичностью* (хорошо деформируются в горячем, а многие и в холодном состоянии). Твердые растворы составляют основу большинства промышленных конструкционных сплавов и сплавов специального назначения.

Химическое соединение – однофазное твердое вещество с металлическим или ионным типом связи. Химическое соединение имеет свою особую кристаллическую решетку и особые свойства, резко отличающиеся от свойств образующих его элементов.

Примером может служить **карбид железа Fe_3C** , кристаллическая структура которого показана на рис. 17. Карбид железа, или **цементит**, имеет $t_{пл} = 1250^{\circ}C$ и твердость $HB > 800$, при $\delta = 0$. В то время, как вещества, образовавшие цементит (железо и углерод) имеют следующие физико-механические свойства. Железо: $t_{пл} = 1539^{\circ}C$, $80HB$, $\delta = 50\%$. Углерод (графит): $t_{пл} = 3500^{\circ}C$, $5HB$.

Химическое соединение с ионным типом связи – **оксиды металлов** FeO , F_3O_4 ($FeO \times Fe_2O_3$) и др.

Химические соединения с металлическим типом связи представляют собой **карбиды и нитриды металлов**. Химический состав таких соединений металлов указывается формулами: **MeX , Me_2X , Me_4X , MeX_4** , где X – неметалл; однако это фазы переменного состава, в которых число неметаллических атомов отличается от стехиометрического состава.

Карбиды и нитриды присутствуют в структуре многих коррозионностойких, износостойких и жаропрочных конструкционных сталей. Карбиды **TiC , TaC , Wc , W_2C** служат основой порошковых твердых сплавов для режущих инструментов.

Карбиды **Fe_3C , $Cr_{23}C_6$ и Cr_7C_3** – важнейшие фазы в конструкционных и инструментальных сталях, во многом определяющие их свойства.

1.4.2. Диаграммы состояния

В сплавах при изменении температуры происходят изменения фазового состава, причем эти изменения происходят не непрерывно, а при определенных температурах или в определенном интервале температур.

Температуры, при которых в сплаве происходят фазовые превращения, называются **критическими точками (или температурами)** сплава. Критические точки имеют названия в зависимости от физических процессов, сопровождающих фазовые превращения в сплаве при данной температуре (табл. 5). Критические температуры сплавов данной системы зависят от концентрации компонентов.

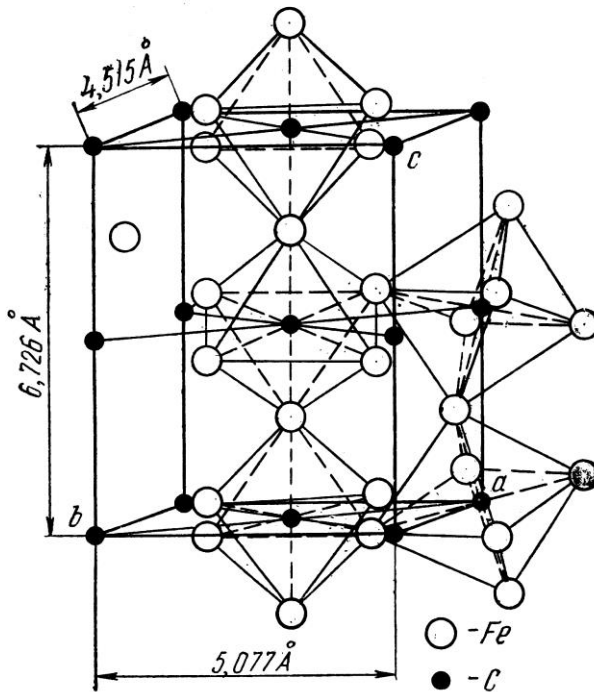


Рис.17. Кристаллическая структура карбида железа Fe_3C

Таблица 5

Критические точки сплавов

Название точки	Фазовое превращение при охлаждении (<i>нагревании</i>)	Примечания
Ликвидус $L \leftrightarrow TV$	Начало выпадения твердой фазы в жидком расплаве (<i>конец расплавления твердой фазы</i>).	Для чистых компонентов и эвтектических сплавов точки ликвидус и солидус совпадают
Солидус $L \leftrightarrow TV$	Конец выпадения твердой фазы в жидком расплаве (<i>начало расплавления твердой фазы</i>).	
Сольвус $TV \leftrightarrow TV + TV_{II}$	Выпадение вторичной фазы при снижении растворимости компонентов сплава в твердом состоянии (<i>растворение одной из фаз при повышении растворимости компонентов сплава в твердом состоянии</i>).	Вторичная фаза представляет собой химическое соединение A_nB_m

Точка Кюри	Приобретение ферромагнитных свойств твердым веществом (<i>потеря ферромагнитных свойств твердым веществом</i>).	Не связано с перекристаллизацией. Ni – 360 °C Fe – 768 °C Co – 1150 °C
Точка полиморфного превращения $T_{V\alpha} \leftrightarrow T_{V\beta}$	Переход одной аллотропической формы в другую (<i>перекристаллизация</i>)	Для сплавов перекристаллизация проходит в интервале температур

Полное представление о фазовом составе данной системы дает диаграмма состояния.

Диаграмма состояния – графическое изображение фазового состава сплава в зависимости от температуры и концентрации компонентов.

Диаграмма состояния дает возможность:

- представить полную картину формирования структуры любого сплава данной системы;
- определить оптимальную температуру заливки сплава для получения литых деталей, оценить жидкотекучесть выбранного сплава и возможность получения химической неоднородности (*ликвации*);
- сделать заключение о возможности и условиях обработки сплава давлением;
- оценить возможность термического упрочнения сплава и назначить режим его термической обработки.

Экспериментальное построение диаграмм состояния возможно благодаря тому, что любое фазовое превращение сплава сопровождается либо изменением физико-механических свойств (электросопротивления, удельных объемов, коэрцитивной силы и др.), либо тепловым эффектом.

Переход сплава из жидкого состояния в твердое и наоборот сопровождается значительным выделением теплоты, поэтому измеряя температуру при нагреве или охлаждении в функции времени (**кривые плавления** или **охлаждения**), можно по перегибам или остановкам на кривых «t – τ» определить критические точки (см. табл. 5) - температуры, при которых в сплаве происходят те или иные фазовые превращения (рис. 18).

Имея кривые охлаждения сплавов, заполняется **формуляр**, в котором указывается состав исследованных сплавов и значение определенных температур (ликвидус, солидус и др.). В табл. 6 в качестве примера представлен формуляр сплавов Pb-Sb.

Таблица 6.

Формуляр сплавов системы Pb – Sb						
Критическая точка	Температура (°C) для сплава с содержанием Pb (%)					
	100	95	90	87	75	0
Ликвидус	$t_1=327$	$t_2=300$	$t_3=260$	$t_3=246$	$t_4=340$	$t_5=631$
Солидус	$t_1=327$	$t_3=246$	$t_3=246$	$t_3=246$	$t_3=246$	$t_5=631$

Имея формуляр сплавов определенной системы, строится диаграмма состояния, на которой одноименные критические точки сплавов соединяются плавными линиями.

На рис. 19 показана диаграмма состояния сплавов Pb – Sb(компоненты нерастворимы в твердом состоянии). t_1 t_2 t_3 t_4 t_5 – линия ликвидус, $t_3=246^\circ\text{C}$ – линия солидус. Сплавы №2, 3, 5 кристаллизуются в интервале температур (см. табл. 6), а сплавы № 1, 4, 6 – при постоянной температуре. Причем сплав № 4 самый низкоплавкий $t_{\text{пл}} = 246^\circ\text{C}$. Сплавы, кристаллизующиеся при постоянной температуре, называются эвтектическими, а структура эвтектического сплава – **эвтектикой**.

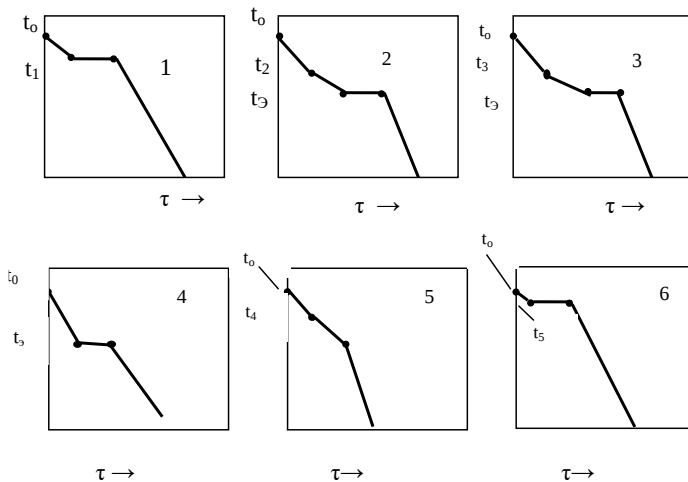


Рис.18.Схематические кривые охлаждения сплавов Pb-Sb, (компоненты не растворимы в твердом состоянии и образуют эвтектику): 1, 6 – чистые компоненты; 2, 3 – доэвтектические сплавы; 4 – эвтектический сплав;

5 – заэвтектический сплав.

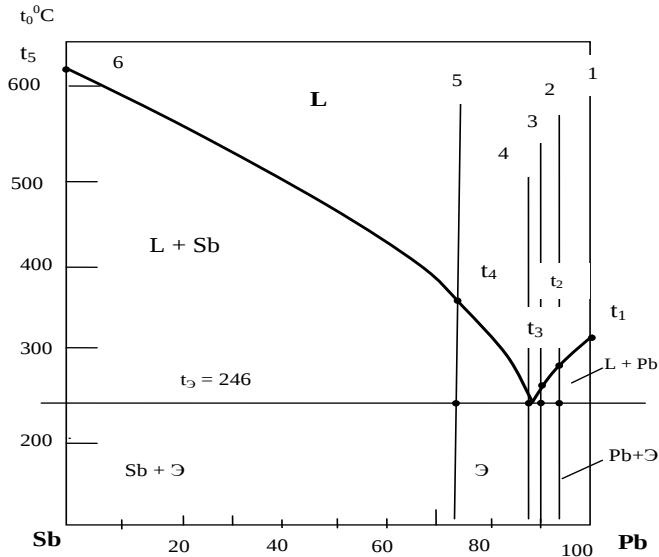


Рис 19. Диаграмма состояния Sb – Pb
(компоненты не растворимы в твердом состоянии и образуют эвтектику)

Экспериментально построенные диаграммы состояния проверяют *по правилу фаз*, дающему возможность теоретически обосновать направление протекания процессов для установления равновесного состояния системы.

Так как диаграммы состояния обычно строят при постоянном (атмосферном) давлении, то правило фаз выражается следующим уравнением

$$C = K + 1 - \Phi, \quad (9)$$

где C – число степеней свободы (или вариантность) системы;
 K – число компонентов в системе; Φ – число фаз.

Число степеней свободы – это число независимых переменных внутренних (состав фаз) и внешних (температура) факторов, которые можно изменять без изменения числа фаз, находящихся в равновесии.

Из правила фаз следует, что в двойной системе, когда $K=2$, при постоянном давлении не может одновременно существовать более трех фаз. В этом случае $C = O$ и $\Phi = 2 + 1$. На кривых охлаждения сплавов при $C = O$ имеются горизонтальные площадки (см. сплавы № 2, 3, 4, 5 на рис. 18), т.е. в случае одновременного присутствия в сплаве трех фаз превращения в нем протекают при постоянной температуре.

Если в двойной системе число фаз больше трех, это значит, что сплав не находится в равновесном состоянии либо неправильно определено число фаз или компонентов. Для однофазного состояния правило фаз не применяется.

На рис. 20 представлена диаграмма состояния системы $A-B$, компоненты которой ограниченно растворимы в твердом состоянии. Линии диаграммы CEF – ликвидус; $CDEKF$ – солидус; DP – сольвус. Компоненты сплава выделяются из расплава L в виде твердого раствора: $\alpha = A(B)$ и $\beta = B(A)$.

При охлаждении сплава № 1 ниже температуры t_3 происходит перекристаллизации – из твердой α фазы выпадают кристаллы фазы β_{II} , которые называются вторичными; этим подчеркивают, что они выпали из твердой фазы, а не из жидкой. Конечная структура данного сплава будет состоять из двух фаз $\alpha + \beta_{II}$ (рис. 21). Твердые растворы α , содержащие компонент B в количестве, меньшем P , при охлаждении ниже линии солидус CD фазовых превращений не испытывают.

Из всех сплавов данной диаграммы выделяется сплав № 3 (см. рис. 20), который является эвтектическим. Он кристаллизуется с **одновременным** выделением двух твердых фаз определенной концентрации: твердого раствора α состава точки D и твердого раствора β состава точки K .

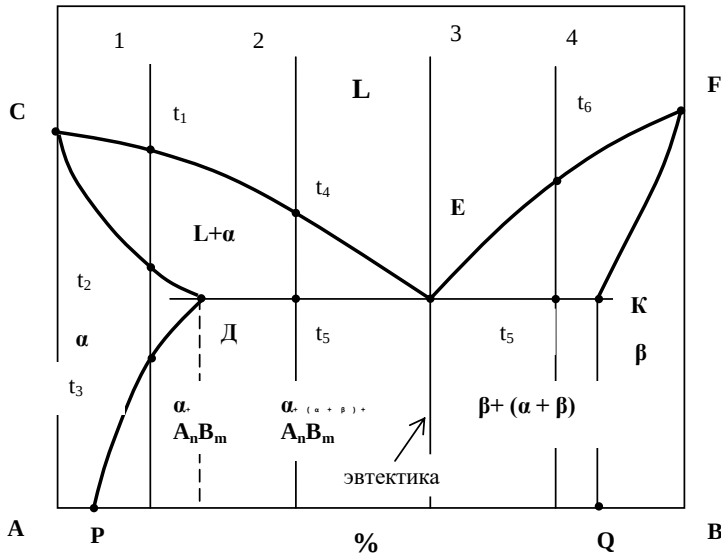


Рис. 20. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которой ограниченно растворимы в твердом состоянии, образуют эвтектику и имеют вторичные фазы:
 СЕФ – ликвидус; СДЕК – солидус; ДР – сольвус;
 ДЕК – эвтектическая прямая.

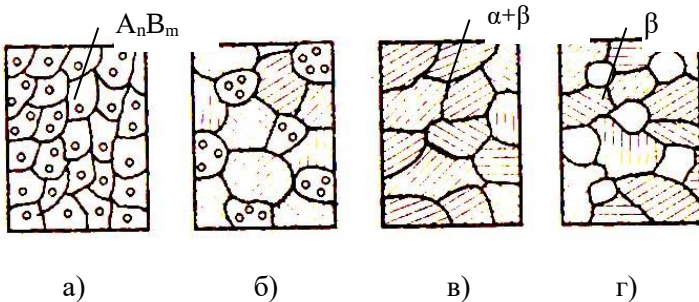


Рис.21. Схемы структур сплавов характерных составов (по рис. 20) а- сплав 1; б- сплав 2; в – сплав 3 (эвтектический); г – сплав 4

Поскольку при охлаждении сплава №3 происходит одновременная кристаллизация двух фаз, то эвтектика представляет собой **механическую смесь**, составляющие части которой при обычном увеличении $\times 200 \dots 500$ неразличимы. Поэтому эвтектика на схеме микроструктуры показывается отдельной **структурной составляющей** (рис. 21в).

Факт одновременной кристаллизации двух фаз подчеркивается записью **$(\alpha + \beta)$** . Эвтектическая реакция протекает в изотермических условиях по схеме



Для эвтектики **$(\alpha_d + \beta_k)$** характерно определенное соотношение фаз

$$\alpha_d / \beta_k = E_D / E_K \quad (11)$$

Механическая смесь, получающаяся в результате фазовых превращений в твердом состоянии, именуется **эвтектоидом** (например, **перлит** в железоуглеродистых сплавах).

Диаграммы состояния позволяют выполнять количественный анализ фазового состава сплавов (правило концентраций и правило отрезков).

Правило концентраций (определение состава фаз) – для определения концентрации компонентов в двух фазах через данную точку ***k*** (рис. 22), характеризующую состояние сплава (концентрация ***X***, температура ***t_k***), проводят изотерму и получают **коноду** акв (часть изотермы, лежащая внутри данной области диаграммы). Абсциссы концов коноды показывают состав фаз:

X_a → состав жидкой фазы ***L***; ***X_в*** → состав твердой фазы ***α***.

Правило отрезков (количественное соотношение фаз в сплаве) – отрезки коноды между точкой ***k*** и точками ***a*** и ***в***, определяющими составы фаз, обратно пропорциональны количествам этих фаз.

$$L_a / \alpha_b = k_b / a_k \quad (12)$$

$$\text{Или } L_a = \frac{k_b}{a_k}; \quad \alpha_b = \frac{a_k}{k_b} \quad (13)$$

Помимо анализа фазового состава диаграммы состояния позволяют также судить о свойствах сплавов, которые также в значительной степени определяются фазовым составом. Впервые на связь между видом диаграммы состояния и свойствами сплава указал наш соотечественник Н.С. Курнаков.

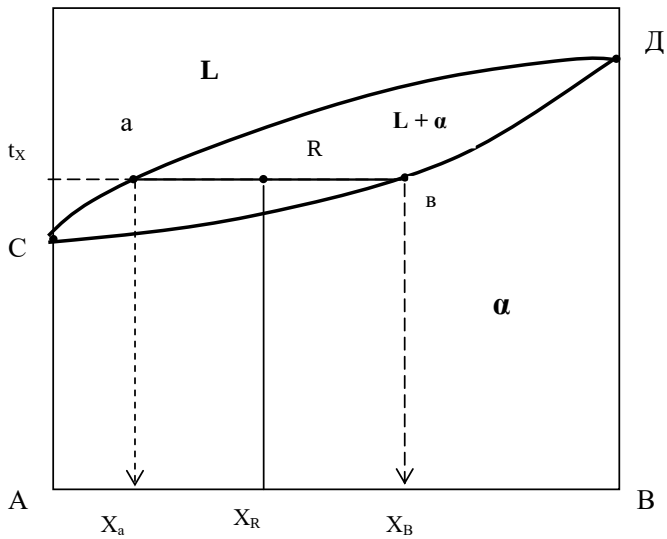


Рис. 22. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых полностью растворимы в жидком и твердом состояниях:
 СаД – ликвидус; СвД – солидус; аРв – конода;
 X_R – состав исследуемого сплава; X_a – состав жидкой фазы сплава точки R; X_b – состав твердой фазы сплава точки R

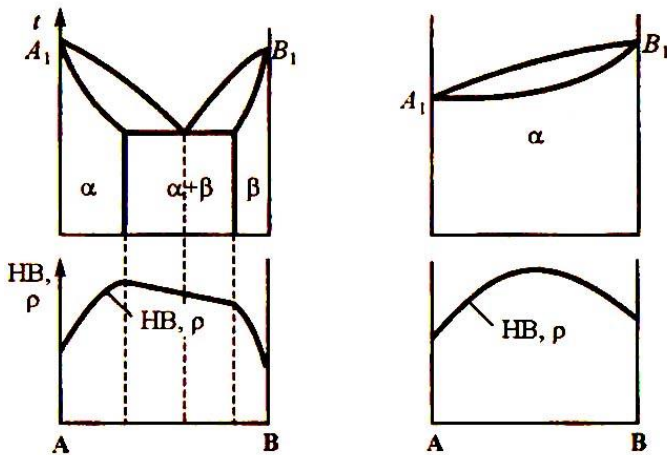


Рис.23. Закономерности Н.С. Курнакова

Для систем, образующих непрерывные твердые растворы, зависимость «состав-свойство» изображаются кривыми, а для двухфазных сплавов – прямыми линиями (рис. 23). Эти закономерности носят название **«правила Курнакова»**.

Согласно правилу Курнакова у твердых растворов такие свойства, как твердость **НВ**, удельное электросопротивление ρ и др., всегда превосходят аналогичные свойства исходных компонентов сплава.

Сплавы – химические соединения (карбиды, нитриды, бориды, оксиды и др.) в большинстве имеют свойства (твердость, пластичность, температура плавления) резко отличные от свойств компонентов сплава.

Закономерности, полученные Н.С. Курнаковым, являются основой при разработке состава сплавов с заданными свойствами. Однако применение их ограничено, т.к. правило Курнакова справедливо для сплавов в равновесном состоянии.

1.5. Железоуглеродистые сплавы

Железоуглеродистые сплавы (**стали и чугуны**) являются самыми распространенными конструкционными и инструментальными материалами, а также специальными сплавами в машиностроении.

1.5.1. Диаграмма состояния «Fe-Fe₃C»

Диаграмма состояния «Fe-Fe₃C» (рис. 24) показывает фазовый состав и структуру сплавов с концентрацией углерода от 0 % (чистое железо) до 6,67% (чистый цементит).

Особенность диаграммы «железо-цементит» – наличие на оси абсцисс также шкалы цементита, которая употребительна при структурном анализе сплавов. Координаты характерных точек диаграммы состояния «Fe-Fe₃C» приведены в табл. 7.

Таблица 7.

Характерные точки диаграммы «Fe – Fe₃C»

Обозначение	Координаты точки			Примечания
	t, °C	C, %	Fe ₃ C, %	
1	2	3	4	5
A	1539	0	0	Точка плавления чистого железа
H	1499	0,1	1,5	Предельная концентрация углерода в высокотемпературном феррите

1	2	3	4	5
J	1499	0,16	2,4	Концентрация углерода в аустените при перитектическом превращении
B	1499	0,51	7,6	Концентрация углерода в жидком сплаве при перитектическом превращении
N	1392	0	0	Точка высокотемпературного $\gamma \leftrightarrow \alpha$ превращения железа
D	1260 1550	6,67	100	Точка плавления чистого цементита (данные разнятся)
E	1147	2,14	32,1	Предельная концентрация углерода в аустените
C	1147	4,3	64,5	Эвтектическая точка сплава
F	1147	6,67	100	Правый конец эвтектической линии ECF
G	911	0	0	Точка низкотемпературного $\gamma \leftrightarrow \alpha$ превращения железа
P	727	0,02	0,3	Предельная концентрация углерода в низкотемпературном феррите
S	727	0,8	12,0	Эвтектоидная точка сплава
K	727	6,67	100	Правый конец эвтектоидной линии PSK
Q	500	0,006	0,09	Минимальная растворимость углерода в низкотемпературном феррите
L	500	6,67	100	Нижний конец вертикали цементита DFKL

Железо и углерод – элементы полиморфные (табл. 2). Fe_γ имеет решетку ГЦК, которая более компактна, чем ОЦК – решетка Fe_α . В связи с этим при превращении $\text{Fe}_\alpha \rightarrow \text{Fe}_\gamma$ объем железа уменьшается приблизительно на 1%, что является причиной возникновения в сплаве **фазовых напряжений**.

Фазы в сплавах $\text{Fe}(\text{C})$ представляют собой: жидкий расплав L, феррит, аустенит, цементит и свободный углерод в виде графита (в чугунах).

Феррит (Φ или α) – твердый раствор углерода в Fe_α

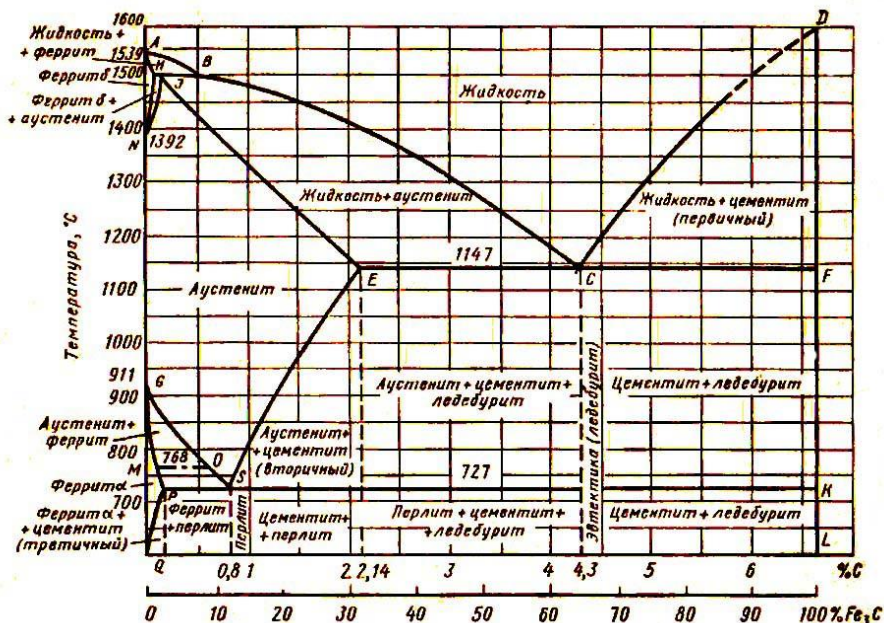
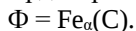
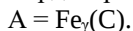


Рис.24. Диаграмма состояния «железо-цементит»

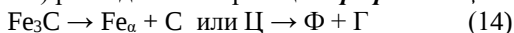
При комнатной температуре феррит содержит 0,006% С. Феррит – мягкая, пластичная фаза со следующими механическими свойствами: $\sigma_B = 28 \dots 30 \text{ кгс/мм}^2$ (280...300 МПа), $\delta = 40 \dots 50\%$, $\psi = 70\%$, $KCU = 25 \text{ кгс}\cdot\text{м/см}^2$ (2,5 МДж/м²).

Аустенит (А или γ) – твердый раствор углерода в Fe_γ



ГКЦ решетка аустенита имеет больше межатомных пор, чем ОЦК решетка феррита, поэтому растворимость углерода в Fe_γ достигает 2,14% при $t = 1147^\circ\text{C}$. Аустенит – пластичная фаза, более прочная (160...200 НВ), чем феррит. В железоуглеродистых сплавах аустенит существует при температурах выше $t = 727^\circ\text{C}$ (линия PSK диаграммы).

Цементит (Ц) – карбид железа Fe_3C , содержит 6,67% С. Твердая (НВ > 800) и хрупкая ($\delta \rightarrow 0$) фаза. При нагреве до высоких температур ($t = 738^\circ\text{C}$) распадается по реакции **графитизации**



Графит (Г) – низкотемпературная модификация углерода, выделяющаяся в $Fe(C)$ сплавах в свободном состоянии при содержании углерода > 2,14 %. Графит электропроводен, химически стоек, малопрочен, мягок.

Железоуглеродистым сплавам присущи следующие изотермические превращения:

Перитектическое ($t = 1499^\circ\text{C}$) – жидкость L_B состава точки **В** взаимодействует с кристаллами феррита Φ_H состава точки **Н** с образованием аустенита A_J состава точки **Ј**.



Эвтектическое ($t = 1147^\circ\text{C}$)



Эвтектика $L = (A_E + Ц)$, представляющая собой механическую смесь аустенита состава точки **Е** и цементита, носит название **ледебурит**.

Эвтектоидное ($t = 727^\circ\text{C}$)



Эвтектоид $\Pi = (\Phi + Ц)$, представляющий собой механическую смесь феррита и цементита, носит название **перлита**.

Перлит (0,8% С) и ледебурит (4,3% С) рассматривается как **самостоятельные структурные составляющие сплавов**. Они оказывают основное влияние на свойства сплавов. Перлит чаще всего имеет пластинчатое строение и является прочной малопластичной структурной составляющей сплава: $\sigma_B = 80 \dots 90 \text{ кгс/мм}^2$ (800...900 МПа); $\sigma_{0,2} = 45 \text{ кгс/мм}^2$ (450 МПа); $\delta = 15\%$; $\psi = 20\%$; 180...200 НВ.

Ледебурит в сплавах присутствует до температур выше линии SK (см. рис. 24), при более низких температурах аустенит, входящий в состав ледебурита, превращается в перлит. При комнатной температуре ледебурит представляет собой смесь цементита и перлита. Цементит образует сплошную матрицу, в которой размещены колонии перлита. Присутствие матрицы цементита служит причиной большой твердости (более 600 HB) и хрупкости ледебуритных сплавов. Их нельзя обрабатывать давлением и трудно обрабатывать резанием.

Описание процессов, протекающих на линиях диаграммы «Fe-Fe₃C» при охлаждении железоуглеродистых сплавов, представлено в табл. 8.

Таблица 8.

Линии диаграммы «Fe – Fe₃C» и соответствующие им процессы в сплавах при охлаждении

Линия	Название (обозначение)	Процессы
1	2	3
ABCD	Ликвидус	Начало кристаллизации (выделение аустенита (при C<4,3%) или первичного цементита (при C>4,3%))
АНJECF	Солидус	Конец кристаллизации
HN	Начало полиморфного превращения	Высокотемпературное $\Phi \rightarrow A$ превращение
JN	Конец полиморфного превращения (A ₄)	
HJB	Изотерма $t = 1499^\circ\text{C}$	Перитектическая реакция $L_B + \Phi_H \rightarrow A_J$
ECF	Изотерма $t = 1147^\circ\text{C}$	Эвтектическая реакция $L_C \rightarrow (A_E + \Pi_F)$
GS	Начало полиморфного превращения (A ₃)	Низкотемпературное $A \rightarrow \Phi$ превращение
GP	Конец полиморфного превращения	
MO	Изотерма	Появление ферромагнитных свойств у

1	2	3
	$t = 768^{\circ}\text{C}$ (A_2)	сплава
ES	Сольвус (A_{cm})	Выделение вторичного цементита
PSK	Изотерма $t = 727^{\circ}\text{C}$ (A_1)	Эвтектоидная реакция $A_S \rightarrow (\Phi_P + \text{Ц}_K)$
PQ	Сольвус	Выделение третичного цементита

1.5.2. Классификация железоуглеродистых сплавов

Железоуглеродистые сплавы подразделяются на две большие группы: стали – сплавы, содержащие до 2,14% С, и чугуны, содержащие более 2,14% С (табл. 9).

Свойства железоуглеродистых сплавов определяются их структурой, которая в свою очередь определяется содержанием в сплаве углерода. Структура сплавов (см. табл. 9) определяет также их область применения.

Таблица 9.

Структурная классификация железоуглеродистых сплавов

Содерж. С, %	Название сплава	Структура при комнатной температуре	Применение сплавов
0,006 – 0,02	Техническое железо	$\Phi + \text{Ц}_{III}$	Сердечники трансформаторов
0,02 – 0,8	Доэвтектоидная сталь	$\Phi + \text{П}$	Детали машин и конструкций
0,8	Эвтектоидная сталь	П	Режущий и мерительный инструмент
0,8 – 2,14	Заэвтектоидная сталь	$\text{П} + \text{Ц}_{II}$	
2,14 – 4,3	Доэвтектический чугун	1. Ферритная – $\Phi + \Gamma$ 2. Ферритно-перлитная $\Phi + \text{П} + \Gamma$ 3. Перлитная – $\text{П} + \Gamma$	Детали машин, получаемые литьем
4,3	Эвтектический чугун		
4,3 – 6,67	Заэвтектический чугун	$(\text{П} + \text{Ц}) + \text{Ц}_I$	Исследовательские сплавы

Примечания:

1. Сокращения: $\Phi = \text{Fe}_a(\text{C})$ – феррит; $\text{П} = (\Phi + \text{П})$ – перлит; Ц_I , Ц_{II} , Ц_{III} – цементит (первичный, вторичный, третичный).

2. Структура конструкционных чугунов характеризуется структурой матрицы и формой графитных включений (пластинчатый, хлопьевидный и шаровидный графит).

1.5.2.1. Классификация сталей

Сталь – сплав железа с углеродом, содержащий до 2,14% углерода.

Стали, как наиболее широко применяемый конструкционный материал, представлены в современной технике наибольшим числом марок (~2000) и классифицируются по следующим главным признакам: по химическому составу, качеству, степени раскисления, структуре и назначению.

По химическому составу (применяется преимущественно для конструкционных сталей) стали разделяются на **углеродистые и легированные**. В зависимости от концентрации углерода те и другие подразделяются на **низкоуглеродистые** ($<0,3\%C$), **среднеуглеродистые** ($0,3-0,7\%C$) и **высокоуглеродистые** ($>0,7\%C$).

Легированные стали в зависимости от введенных элементов подразделяют на **хромистые, марганцовистые, хромоникелевые, хромованадиевые** и др. По суммарному количеству введенных легирующих элементов их разделяют на **низколегированные** (суммарное количество легирующих элементов не превышает 5%), **среднелегированные** (суммарное количество легирующих элементов не превышает 5-10%) и **высоколегированные** (суммарное количество легирующих элементов более 10%). Если в сплаве менее 50% железа (т.е. суммарное количество легирующих элементов более 50%) то такой сплав уже не является легированной сталью и называется **легированным сплавом**.

По качеству стали классифицируют на стали **обыкновенного качества, качественные** и **особо высококачественные**. Под качеством стали понимают совокупность свойств, определяемых металлургическим процессом ее производства.

Однородность химического состава, строения и свойств стали, а также ее технологичность во многом зависят от содержания газов (кислорода, водорода, азота) и вредных примесей – серы и фосфора. Газы являются количественно трудноопределяемыми примесями, поэтому нормы содержания **S** и **P** служат основными показателями для разделения сталей по качеству. Стали обыкновенного качества содержат до **0,050% S** и **0,040% P**, качественные – не более **0,04% S** и **0,035% P**, высококачественные – не более **0,025% S** и **0,025% P**, особо высококачественные – не более **0,015% S** и **0,025% P**.

По степени раскисления и характеру затвердевания стали классифицируют на спокойные, полуспокойные и кипящие.

Раскисление – удаление кислорода из жидкого чугуна при его переработке в сталь, проводимое для предотвращения красноломкости стали.

Спокойные стали раскисляют Mn, Si и Al. Они содержат мало кислорода и затвердевают спокойно без газоотделения.

Кипящие стали раскисляют только Mn. Перед разливкой в изложницы они содержат повышенное количество кислорода, который при затвердевании металла, частично взаимодействуя с углеродом, выделяется в виде пузырьков окиси углерода и создает впечатление кипения металла. Кипящие стали дешевы, их производят низкоуглеродистыми (0,2 - 0,25%) и практически без кремния ($Si \leq 0,07\%$), но с повышенным содержанием газовых примесей, что повышает порог хладноломкости кипящих сталей. В то же время кипящие стали отличаются повышенной пластичностью.

Полуспокойные стали по степени раскисления занимают промежуточное положение между спокойными и кипящими.

Согласно ГОСТ степень раскисления обозначается в конце марки стали двумя строчными буквами русского алфавита: спокойные – «сп», кипящие – «кп», полуспокойные – «пс».

При классификации стали по *структуре* учитывают особенности ее строения в отожженном (классификация по Обергофферу) и нормализованном (классификация по Гийе) состояниях.

По структуре в отожженном (равновесном) состоянии стали разделяют на следующие классы:

- **доэвтектоидные** (в структуре имеют избыточный феррит);
- **эвтектоидные** (структура перлита);
- **заэвтектоидные** (в структуре имеют избыточные (вторичные) карбиды);
- **ледебуритные** или **карбидные** (в структуре имеют первичные карбиды, выделившиеся из жидкой стали);
- **аустенитные** (при введении большого количества Ni, Mn, расширяющих γ - область);
- **ферритные** (при введении Cr, Si, V, W и др., расширяющих α - область).

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

По структуре после нормализации (охлаждение на воздухе из аустенитного состояния) стали подразделяют на следующие основные классы: **перлитный, мартенситный, аустенитный и ферритный**.

Стали **перлитного класса** после нормализации приобретают структуру феррито-цементитных смесей различной дисперсности (**перлит, сорбит или троостит**). В структуре сталей перлитного класса могут присутствовать также избыточные феррит или карбиды. К этому классу относятся углеродистые и низколегированные стали (ГОСТы 380, 1050, 4543, 1435 и др.).

Стали **мартенситного класса** отличаются высокой устойчивостью переохлажденного аустенита; при охлаждении на воздухе приобретают структуру мартенсита. К этому классу относятся средне- и высоколегированные стали (ГОСТы 5950, 5632 и др.).

Структурный класс **аустенитных** и **ферритных** сталей совпадает по классификации как в отожженном, так и нормализованном состояниях.

При **классификации по назначению** стали можно объединить в следующие группы.

Конструкционная сталь, идущая на изготовление деталей машин. Конструкционная (машиноподелочная) сталь (ГОСТы 1050, 4543) у потребителя, как правило, подвергается термической обработке. Поэтому конструкционные стали подразделяют на **цементуемые** (низкоуглеродистые, подвергаемые цементации с последующей термообработкой) и **улучшаемые** (среднеуглеродистые, подвергаемые закалке и отпуску, практически не обязательно высокому).

Стали, близкие по составу к конструкционным, но не предназначенные для термообработки у потребителя, объединяются в группу строительных сталей. **Строительные стали** (ГОСТ 19282) применяются для изготовления металлоконструкций и арматуры. Они должны обладать хорошей свариваемостью и достаточной хладостойкостью, поэтому это низкоуглеродистые низколегированные стали.

Инструментальная сталь, идущая на изготовление режущего, измерительного, штампового и прочего инструмента (ГОСТы 1435, 5950, 19265) подвергается термообработке. Это высокоуглеродистая сталь, может содержать различное количество легирующих элементов.

Специальная сталь (сталь с особыми свойствами), обладающая каким-нибудь одним резко выраженным эксплуатационным свойством или группой свойств: коррозионностойкие, жаропрочные, жаростойкие и т.д.

Стали этой группы в основном высоколегированные. Некоторые специальные стали являются универсальными, т.е. обладают одновременно рядом эксплуатационных свойств. К группе специальных сталей относятся также легированные сплавы, хотя формально сталями они не являются, т.к. содержат менее 50% железа (ХН78Т, Х20Н80 и др.).

1.5.2.2. Маркировка сталей

Стали обыкновенного качества (химический состав по ГОСТ 380, механические свойства горячекатаных сталей ГОСТ 535) маркируются сочетанием букв «Ст» и цифрой (от 0 до 6), показывающей номер марки. Степень раскисления обозначают добавлением букв «сп», «пс» и «кп».

Для этих сталей, кроме Ст0, справедлива следующая эмпирическая формула для определения количества углерода

$$C(\%) \approx 0,07 \times \text{номер марки} \quad (18)$$

Так, в стали Ст3 содержание углерода $C \approx 0,07 \times 3 = 0,21\%$ (фактически 0,14-0,22%).

Содержание кремния в сталях этой группы зависит от способа раскисления: у кипящих сталей – не более 0,05-0,07%, у полуспокойных – не более 0,17%, у спокойных – не более 0,3%.

Содержание серы $\leq 0,05\%$, фосфора $\leq 0,04\%$.

Углеродистые качественные стали (ГОСТ 1050) маркируют двухзначными числами (08, 10, 15, 20, ..., 60), обозначающими среднее содержание углерода в сотых долях процента.

Спокойные стали ($\leq 0,37\% \text{Si}$) маркируются без индекса «сп», полуспокойные (0,05-0,17% Si) и кипящие ($\leq 0,03\% \text{Si}$) с индексами «пс» и «кп», соответственно.

Углеродистые инструментальные стали (ГОСТ 1435) маркируются буквой «У» и числом, указывающим содержание углерода в десятых долях процента: У7, У8, У9, ..., У13. В стали У7 – 0,7% С и т.д.

Легированные стали имеют буквенно-цифровую маркировку, характеризующую примерный химический состав стали.

Маркировка легированной стали включает в себя

- обозначение содержания углерода;

- наименование и количество легирующих элементов;
- специальные обозначения (если таковые имеются).

Содержание углерода указывается в начале марки стали цифрой, отвечающей его среднему содержанию: в сотых долях процента для сталей, содержащих до 0,7% С (это конструкционные стали) и в десятых долях процента для сталей, содержащих >0,7%С (это главным образом, инструментальные стали). При маркировке высокоуглеродистых (более 1%С) легированных инструментальных сталей обозначение содержания углерода в начале марки опускается. Примеры: сталь 10 содержит 0,07-0,14%С, сталь У10 – 0,95-1,05%С, сталь Х12 содержит 2,0-2,2%С.

Легирующие элементы, содержащиеся в стали, обозначаются буквами русского алфавита (табл.10).

Таблица 10.

Обозначение основных легирующих элементов
в сталях и цветных сплавах

Элемент	Символ	Обозначение		Группы стали, сплавы
		сталь	цв.сп.	
1	2	3	4	5
Азот	N	А	-	Кст – 0,015-0,025%; Ск – 0,15-1,0 %
Алюминий	Al	Ю	А	Кст; Сжс – 4-5%; магналии; бронзы; силумины; дуралюмины; КМ; АФМ
Бериллий	Be	-	Б	Бронзы; ФМ
Бор	B	Р	-	К – 0,002-0,005 %; Сжп
Ванадий	V	Ф	-	К - <3%; Кст; И; ИБ
Вольфрам	W	В	-	К – 0,8-1,2%; И – 1-1,5%; ИБ; НМ; ТС
Железо	Fe	основа	Ж	К; И; С; СЛ - <50% бронзы; ФМ
Кадмий	Cd	-	Кд	Припои
Кобальт	Co	К	К	ИБ; Сх; ТС – 3-25%; Бронзы; металлокерамика
Кремний	Si	С	Кр (К)	К - < 2%; Кр; Кст; Ки; И Бронзы, силумины; НМ
Магний	Mg	-	Мг	Магналии; КМ
Марганец	Mn	Г	Мц	К - <1,5%; Кр; И; Си; Ск; Сжс; Сх; дуралюмины; эл.тех. сплавы; НМ

1	2	3	4	5
Медь	Cu	Д	М	Кст– 0,15-0,3%; Ск Бронзы; латуни; мельхиоры; ФМ
Молибден	Mo	М	-	К – 0,2-0,4%; КТ; И; ИБ; СК; СХ
Никель	Ni	Н	Н	К – 1-5%; Сж; Сжс; Сжп; Сх; Бронзы, латуни, мельхиоры; эл.тех. сплавы; КМ; НМ
Ниобий	Nb	Б	-	Кст; Сж
Олово	Sn	-	О	Бронзы, баббиты; припой
Свинец	Pb	-	С	Кпр – 0,15-0,35%; Бронзы, баббиты, припой
Селен	Se	Е	СТ	Кпр – 0,04-0,1%;
Серебро	Ag	-	Ср	Припой
Сурьма	Sb	-	Су	Баббиты; припой
Титан	Ti	Т	-	К - < 0,1%; СК; СХ; СЖС КМ; НМ; ТС
Углерод	C	У	-	К - <0,7%; И – 0,7-2%; Си ТС; НМ – до 4%
Фосфор	P	П	Ф	Кст – 0,07-0,12%; Кпр – 0,05 – 0,15% АФМ
Хром	Cr	Х	Х	К - < 2%; Кт; Ки; И; ИБ; Ск – >13%; Сжс; Сх; Си; НМ
Цинк	Zn	-	Ц	Латуни; бронзы, припой, подш. сплавы

Примечания

Группы (подгруппы) легированных сталей и сплавов:

К – конструкционные стали (**Кст** – строительные низколегированные, **Ки** – износостойкие, **Кр** – рессорно-пружинные; **Кпр** – повышенной обрабатываемости резанием, **Кт** – теплостойкие).

И – инструментальные стали (**ИБ** – быстрорежущие).

С – специальные стали (**Ск** – коррозионностойкие, **Сжс** – жаростойкие, **Сжп** – жаропрочные, **Сх** – хладостойкие, **Си** – износостойкие).

СЛ – легированные сплавы (Fe<50%); **КМ** – композиционные материалы; **ТС** – твердые сплавы; **НМ** – износостойкие наплавочные материалы; **АФМ** – антифрикционные материалы; **ФМ** – фрикционные материалы.

1.5.2.3. Чугуны

Чугун - сплав железа с углеродом, содержащий от 2,14% до 6,67% углерода.

Присутствие эвтектики (ледебурита) в кристаллизующемся чугуне обуславливает его высокие литейные свойства и использование исключительно в качестве *литейного сплава*. Наличие в структуре чугуна первичного цементита, обладающего нулевой пластичностью, делает невозможным обработку чугуна давлением.

Коренное отличие чугуна от стали состоит в том, что свойства чугуна определяются его структурой, а именно структурой металлической матрицы (твердость) и формой графитных включений (пластичность).

В зависимости от условий графитизации (время выдержки, наличие модификаторов) графит в чугуне может выделяться в виде: пластин, хлопьев, шаров. В зависимости от условий их охлаждения отливки металлическая матрица чугуна может состоять из феррита, феррита и перлита и одного перлита (рис. 25).

Первичным продуктом доменного производства является *белый чугун* (см. раздел 2.1). в котором весь углерод содержится в виде цемента. Вследствие нетехнологичности (невозможность обработки резанием) белый чугун самостоятельно не применяется, а используется для передела в сталь и в литейные чугуны (серые, ковкие, высокопрочные).

Литейные чугуны являются конструкционными и служат для изготовления отливок. Ограниченное применение имеют отбеленные чугуны – отливки из серого чугуна со слоем белого чугуна в виде твердой корки на поверхности.. Из них изготавливают прокатные валки, лемеха плугов, тормозные колодки и другие детали, работающие в условиях износа.

В конструкционных чугунах весь углерод или часть его находится в виде графита. Графит обеспечивает пониженную твердость, хорошую обрабатываемость резанием, а также высокие антифрикционные свойства вследствие низкого коэффициента трения. Вместе с тем включения графита снижают прочность и пластичность,

так как нарушают сплошность металлической матрицы сплава. Сочетание структуры матрицы и формы графитных включений определяют свойства сплава (табл. 11).

Серыми называются чугуны с пластинчатой формой графита. Серые чугуны – сплавы сложного состава: 2,2-3,7% С; 1-3% Si; 0,2-1,1% Mn; 0,02-0,3% P; 0,02-0,15% S.

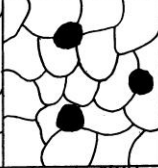
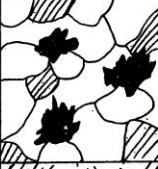
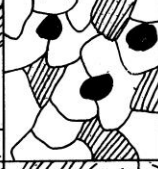
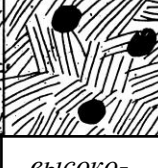
<i>Металлическая основа</i>	<i>Форма графитных включений</i>		
	<i>Пластинчатая</i>	<i>хлопьевидная</i>	<i>Шаровидная</i>
<i>Феррит</i>			
<i>Феррит+Перлит</i>			
<i>Перлит</i>			
<i>Чугун, маркировка</i>	<i>серый, СЧ</i>	<i>ковкий, КЧ</i>	<i>высоко- прочный, ВЧ</i>

Рис.25. Классификация чугунов по структуре металлической матрицы и форме графитных включений (схемы структур)

В небольших количествах в них могут содержаться Cr, Ni, Cu, которые попадают из руды.

Таблица 11.

Механические свойства чугунов

Марка чугуна	σ_B	$\sigma_{0,2}$	НВ	δ , %	Структура матрицы
	кгс/мм ²				
Серые чугуны (ГОСТ 1412)					
СЧ 10	10	-	140-190	-	Ф
СЧ 15	15	-	163-210	-	
СЧ 25	25	-	180-245	-	Ф+П
СЧ 35	35	-	220-275	-	П
Высокопрочные чугуны (ГОСТ 7293)					
ВЧ 35	35	22	140-170	22	Ф
ВЧ 45	45	31	140-225	10	Ф+П
ВЧ 60	60	37	192-227	3	
ВЧ 80	80	49	248-351	2	П
ВЧ 100	100	70	270-360	2	
Ковкие чугуны (ГОСТ 1215)					
КЧ 30-6	30	-	100-163	6	Ф+10%П
КЧ 35-8	35	-	100-163	8	
КЧ 37-12	37	-	110-163	12	
КЧ 45-7	45	-	150-207	7	
КЧ 60-3	60	-	200-269	3	П+20%Ф
КЧ 80-1,5	80	-	270-320	1,5	

Углерод оказывает определяющее влияние на качество чугунов, изменяя количество графита и литейные свойства. Чем выше концентрация углерода, тем больше выделений графита и ниже механические свойства чугуна.

Кремний обладает сильным графитизирующим действием, способствует выделению графита в процессе затвердевания чугунов и разложению выделившегося цементита. Марганец затрудняет графитизацию чугунов, несколько улучшает их механические свойства, особенно в тонкостенных отливках.

В силу наличия концентраторов напряжений в структуре серого чугуна в виде пластинок графита статическая прочность его при изгибе примерно в 2 раза, а при сжатии – в 4 раза выше, чем при растяжении. Они близки к свойствам стали с той же структурой и составом, что и металлическая матрица чугуна.

Поскольку работоспособность чугуна лимитируется долей растягивающих напряжений, поэтому основным показателем механических свойств чугунов является прочность при статическом растяжении (табл. 11).

Марка серого чугуна состоит из букв СЧ (серый чугун) и числа, показывающего предел прочности в кгс/мм².

Прочность чугуна существенно зависит от толщины стенки отливки. Указанное в марке значение σ_B соответствует отливкам с толщиной стенки 15 мм. При увеличении толщины стенки от 15 до 150 мм прочность и твердость чугуна уменьшаются почти в 2 раза.

Номенклатура отливок из серого чугуна и их масса разнообразны: от деталей в несколько граммов (поршневые кольца двигателей) до отливок в 100 т и более (станины станков). Выбор марки чугуна для конкретных условий работы определяется совокупностью его технологических и механических свойств.

Высокопрочными называют чугуны, в которых графит имеет шаровидную форму. Их получают **модифицированием магнием**, который вводят в жидкий чугун в количестве 2,02...0,08%.

Чугун после модифицирования имеет следующий химический состав: 3,0-3,6% С; 1,1-2,9% Si; 0,3-0,7% Mn; до 0,02% S и до 0,1% P.

Шаровидный графит менее сильный концентратор напряжений, чем пластинчатый, поэтому он меньше снижает механические свойства металлической матрицы. Чугуны с шаровидным графитом обладают более высокой прочностью и некоторой пластичностью (табл. 11).

Марка высокопрочного чугуна состоит из букв ВЧ (высокопрочный чугун) и числа, показывающего предел прочности в кгс/мм².

Высокопрочные чугуны применяют в различных отраслях техники, эффективно заменяя сталь во многих изделиях и конструкциях. Из них изготавливают оборудование прокатных станов, кузнечно-прессовое оборудование, детали энергетического оборудования, работающие при высоких циклических нагрузках и в условиях изнашивания.

Ковкими называются чугуны, в которых графит имеет хлопьевидную форму. Их получают длительным обжигом белых доэвтектических чугунов. Такой графит в отличие от пластинчатого меньше снижает механические свойства металлической матрицы,

вследствие чего ковкие чугуны по сравнению с серыми обладают более высокой прочностью и пластичностью.

Отливки из белых чугунов, подвергаемые обжигу на ковкие чугуны, не должны иметь толщину стенки более 50 мм, иначе в сердцевине при кристаллизации выделяется пластинчатый графит и чугун становится непригодным для обжига на ковкий чугун. По этой же причине исходные белые чугуны имеют пониженное содержание углерода и кремния: 2,4-2,9% С; 1,0-1,6% Si; 0,201,0% Mn; до 0,2% S и до 0,18% P.

Отсутствие литейных напряжений, которые полностью снимаются во время обжига, компактная форма и изолированность графитных включений обуславливают высокие механические свойства ковких чугунов (табл. 11).

Марка ковкого чугуна состоит из букв КЧ (ковкий чугун) и чисел, первое из которых указывает значение σ_B в кгс/мм², второе – значение δ в %.

Из ковких чугунов изготавливают детали высокой прочности, работающие в тяжелых условиях износа, способные воспринимать ударные и знакопеременные нагрузки. Большая плотность отливок позволяет делать из ковкого чугуна детали водо- и газопроводных установок, а хорошие литейные свойства исходного белого чугуна – производить отливки сложной формы.

1.6. Термическая обработка

Термическая обработка заключается в нагреве, выдержке и охлаждении сплава по определенным режимам с целью получения заданных свойств металла за счет изменения внутреннего строения при термокинетическом воздействии.

1.6.1. Классификация видов термической обработки

Изменение свойств сплава, которое создается в результате термической обработки должно быть остаточным, т.е. сохраняться после окончания обработки, иначе в термообработке не было бы никакого смысла.

Все виды термической обработки можно разделить на четыре основные группы (по А.А. Бочвару).

Первая группа. В результате предшествующей обработки металл перешел в неустойчивое состояние (наклеп, ликвация, упрочие

искажения кристаллической решетки). Термическая обработка, приводящая металл в более устойчивое состояние, называется **отжигом (отжигом I рода)**.

Вторая группа. В сплаве при нагреве выше некоторой критической температуры происходят фазовые превращения (аллотропическое, растворение второй фазы). При медленном охлаждении из этого состояния в сплаве пройдет полное превращение, и фазовый состав будет соответствовать равновесному состоянию.

Термическая обработка, состоящая в нагреве выше критической температуры и медленном охлаждении, приводящем сплав в равновесное состояние, называется **фазовой перекристаллизацией (полным отжигом или отжигом II рода)**.

Третья группа. В сплаве, в котором произошли фазовые превращения при нагреве выше критической температуры, в результате быстрого охлаждения зафиксировано фазовое состояние, характерное для высоких температур. Такая термическая обработка называется **закалкой**. При закалке сплав переходит в структурно неустойчивое состояние.

Четвертая группа. В закаленном сплаве, имеющем неустойчивое состояние, могут происходить процессы, приближающие его к равновесному состоянию. При повышении температуры закаленный сплав будет все больше приближаться к равновесному состоянию. Термическая обработка, состоящая в нагреве закаленного сплава до температуры ниже критической и медленном охлаждении, называется **отпуском**. Выдержка закаленного сплава при комнатной температуре называется **старением**.

При термической обработке в сплаве происходят фазовые превращения, протекающие во времени, называемые **фазовыми превращениями в неравновесных условиях**. Тем не менее, диаграммы состояния сплавов, построенные для равновесных фазовых превращений, позволяют определить, каким видам термической обработки может быть подвергнут сплав и соответствующие им интервалы концентраций и температур нагрева.

Так сплавы, диаграмма состояния которых представлена на рис. 26 а, могут быть упрочнены термической обработкой за счет выделения вторичной фазы A_nB_m в интервале концентраций FD' .

Сплавы, диаграмма состояния которых представлена на рис. 26 б, могут упрочняться за счет полиморфного превращения $\gamma \rightarrow \alpha$ и выделения вторичной фазы в интервале концентраций SF' .

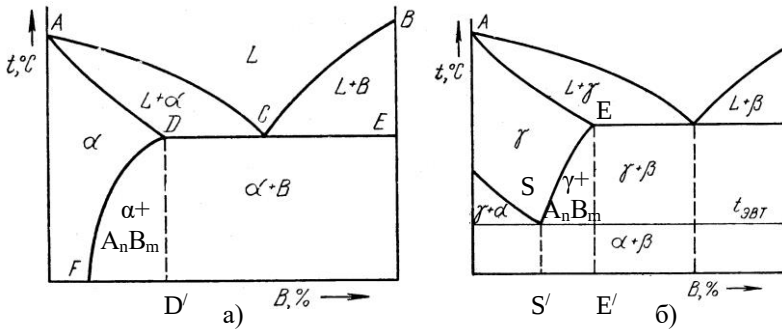


Рис.26. Диаграммы состояния сплавов, для которых возможно термическое упрочнение (схема): а- за счет выделения вторичных фаз A_nB_m ; б- за счет полиморфного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения и выделения вторичных фаз A_nB_m

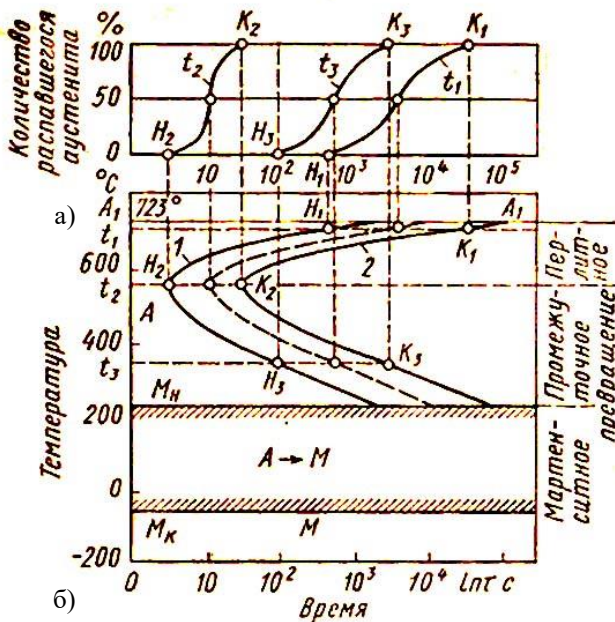


Рис.27. Построение диаграммы изотермического превращения переохлажденного аустенита для стали с 0,8%С:
а- кинетические кривые; б- диаграмма изотермического превращения аустенита (С-кривые)

1.6.2. Изотермическое превращение аустенита

Теоретические основы термической обработки сталей были заложены в работах Д.К. Чернова, который в 1868 г. опубликовал данные по критическим точкам сталей.

Важный вклад в теорию термической обработки стали был сделан Э. Бейном и Э. Давеннортом, которые в 1930 г. впервые построили диаграммы изотермического распада аустенита.

Исследование изотермического превращения переохлажденного аустенита производится в районе $700-200^{\circ}\text{C}$ с интервалами между изотермами $25-50^{\circ}\text{C}$. Исследование состоит в фиксировании времени начала и конца превращения аустенита при разных температурах переохлаждения. Если нанести точки начала и конца превращения для всех температур и соединить их плавными кривыми, то получится диаграмма изотермического превращения аустенита, так называемая **С-диаграмма**. На рис. 27,б представлена С-диаграмма для стали, содержащей 0,8% углерода..

В зависимости от степени переохлаждения аустенита на С-диаграмме различают три температурные области или три ступени превращения: перлитную, область промежуточного превращения и мартенситную.

Перлитное превращение состоит в превращении аустенита в ферритно-цементитную смесь по реакции (17). Это превращение носит кристаллизационный характер и по своему механизму является диффузионным. Ведущей, в первую очередь возникающей фазой, при этом является цементит. Его зародыши, как правило, образуются на границах зерен аустенита (рис. 28).

Продукты перлитного превращения имеют пластинчатое строение. Пластинчатые структуры эвтектоидного типа часто определяют как **перлит, сорбит и троостит** или соответственно грубо, средне- и тонкодифференцированный перлит. Чем больше переохлаждение, тем тоньше получается ферритно-цементитная структура и выше твердость (табл. 12). Однако в отличие от перлита (эвтектоида, содержащего 0,8% С) сорбит и троостит, называемые **квазиэвтектоидами**, не являются равновесными структурами в сталях, поскольку не соответствуют эвтектоидному составу (содержат углерода больше или меньше 0,8%).

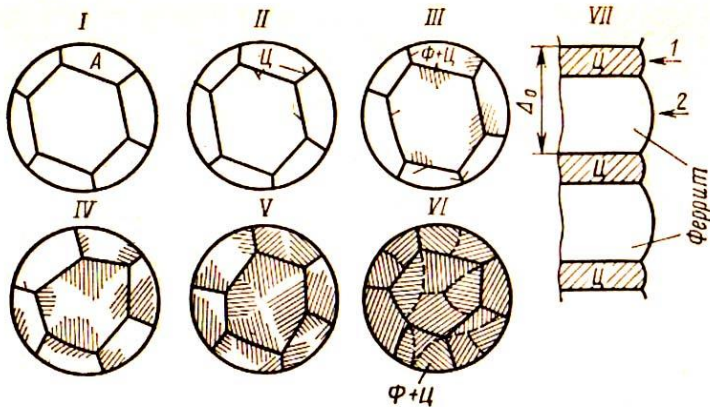


Рис.28. Схема возникновения и роста перлитного зерна: I – аустенит; II – образование зародыша цементита на границе зерна аустенита; III – образование пластин цементита и феррита; IV – VI – рост и образование новых пластин цементита и феррита (перлита); VII – перераспределение углерода при образовании перлита; 1- цементит 6,67%С; 2- феррит 0,006%С; Δs – межпластиночное расстояние в перлите

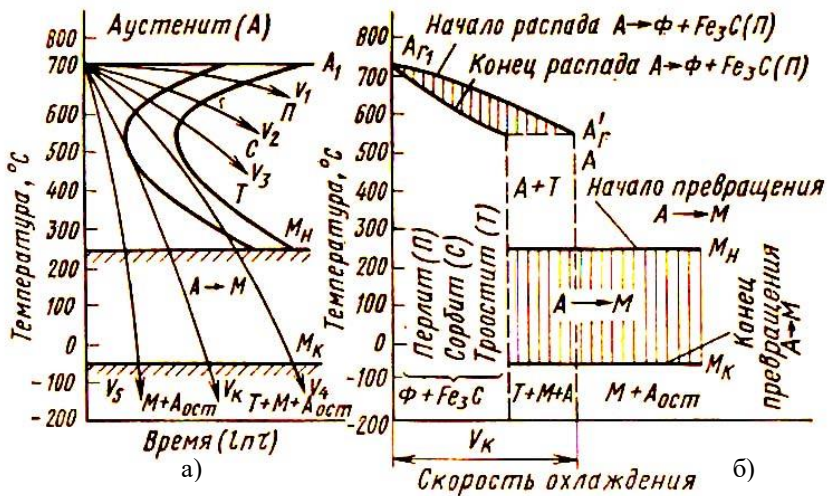


Рис.29. Наложение кривых охлаждения (а) на диаграмму изотермического распада аустенита, схема влияния скорости охлаждения на температуру превращения аустенита (б)

Таблица 12.

Условия образования и свойства ферритно-цементитных смесей, образующихся при изотермическом распаде аустенита

Структура	Температура превращения, °С	Межпластиночное расстояние Δ_0 , мм	Твердость НВ
Перлит	700	0,60-1,0	180-250
Сорбит	600	0,25-0,30	250-350
Троостит	500	0,10-0,15	350-450

Мартенситное превращение – происходит только в случае, если быстрым охлаждением аустенит переохлажден до температуры *М_н* **начала мартенситного превращения** (рис. 27), при которой диффузионные процессы становятся невозможными. Мартенситное превращение носит **бездиффузионный характер**, т.е. оно не сопровождается диффузионным перераспределением атомов углерода и железа в решетке аустенита.

Результатом такого превращения является **мартенсит** – пересыщенный твердый раствор углерода в Fe_α с концентрацией углерода как в исходном аустените.

Мартенсит имеет тетрагональную решетку и обладает высокой твердостью, зависящую от содержания углерода в стали: 0,3% - HRC 49; 0,5% - HRC 59; 0,7% - HRC 63; 1% С – HRC 65.

Чтобы мартенситное превращение развивалось, необходимо непрерывно охлаждать сталь ниже температуры M_n . Эта особенность мартенситного превращения резко отличает его от диффузионного перлитного, которое полностью протекает в изотермических условиях при температуре ниже критической точки A_1 .

По достижении определенной для каждой стали температуры превращение аустенита в мартенсит прекращается. Эту температуру обозначают *М_к* и называют **температурой окончания мартенситного превращения** (рис. 27). Для инструментальных сталей ($> 0,7\%$ С) точка M_k лежит в области отрицательных температур.

Промежуточное (бейнитное) превращение протекает в температурной области между перлитным и мартенситным превращениями (рис. 27). В результате промежуточного превращения образуется **бейнит**, представляющий собой структуру, состоящую из твердого раствора Fe_α , претерпевшего мартенситное превращение и несколько пересыщенного углеродом, и частиц карбида железа.

Бейнитное превращение переохлажденного аустенита сочетает в себе элементы перлитного и мартенситного превращений:

диффузионное перераспределение углерода в аустените между продуктами распада и бездиффузионное превращение аустенита в мартенсит.

Изотермическое превращение аустенита в легированных сталях имеет особенности, связанные с увеличением устойчивости переохлажденного аустенита в области перлитного и бейнитного превращений. Поэтому С-кривые для легированных сталей сдвигаются вправо (исключение составляет легирование стали кобальтом). Особенно повышается устойчивость переохлажденного аустенита при одновременном введении в сталь нескольких легирующих элементов, например, Cr и Ni, Cr и Mn и т.д.

1.6.3. Превращение аустенита при непрерывном охлаждении

На практике термическая обработка стали проводится при непрерывном охлаждении. Схематические диаграммы, показывающие влияние скорости охлаждения на температуру распада аустенита и на количество структурных составляющих после охлаждения углеродистой эвтектоидной стали приведены на рис. 29.

Скорости V_1 , V_2 , V_3 приводят к перлитному превращению аустенита с образованием перлита, сорбита и троостита. При охлаждении стали со скоростью V_4 она будет иметь структуру троостита, мартенсита и остаточного аустенита.

При скорости охлаждения V_K , V_5 структура стали будет состоять из мартенсита. Минимальная скорость охлаждения, при которой сталь приобретает структуру мартенсита, называется **критической скоростью заковки V_K** .

Критическая скорость заковки зависит от состава стали и величины зерна аустенита. Углеродистые стали имеют критическую скорость заковки порядка 800-200⁰С в секунду. Наименьшей величиной V_K обладает эвтектоидная сталь. Легирующие элементы в стали, повышая устойчивость аустенита, значительно снижают критическую скорость заковки до 20-30⁰С в секунду и ниже.

1.6.4. Превращения при отпуске стали

Термическую обработку, заключающуюся в нагреве закаленной стали до температуры ниже точки A_1 , называют **отпуском**.

Типичная структура закаленной стали – мартенсит и остаточный аустенит, которые являются неравновесными фазами. При нагреве закаленной стали неравновесные фазы переходят в ферритно-цементитные смеси. Распад мартенсита и остаточного аустенита при отпуске идет по диффузионному механизму, т.е. связан с

перераспределением углерода, и поэтому скорость процесса и структура ферритно-цементитной смеси отпуска в основном обусловлена температурой нагрева.

Распад мартенсита (первое превращение при отпуске) состоит в уменьшении содержания углерода в отпущенном мартенсите, что приводит к уменьшению тетрагональности мартенсита. Легирующие элементы оказывают незначительное влияние на распад мартенсита только при температурах ниже 150°C . При более высокой температурах введение в сталь Cr, Mo, W, V, Si, Ti сильно тормозит процессы распада мартенсита, образования и роста частиц карбида. В углеродистой и низколегированной стали отпущенный мартенсит сохраняет высокую твердость до температур нагрева $250\text{--}350^{\circ}\text{C}$, в высоколегированных сталях мартенсит сохраняет твердость до $450\text{--}500^{\circ}\text{C}$ и выше.

Превращение остаточного аустенита (второе превращение при отпуске) в высокоуглеродистых и многих легированных среднеуглеродистых сталях происходит при $200\text{--}300^{\circ}\text{C}$ и состоит в **бейнитном превращении**. Большинство легирующих элементов не только увеличивает количество остаточного аустенита в закаленной стали из-за снижения температуры M_n , но и повышают температурный интервал его распада при отпуске. В быстрорежущих сталях P18, P6M5 и др., например, содержащих 25–35% остаточного аустенита, распад его протекает после многократного отпуска при $500\text{--}600^{\circ}\text{C}$.

Карбидное превращение (третье и четвертое превращения при отпуске) представляет собой процесс формирования ферритно-цементитных смесей, именуемых **трооститом отпуска** ($t_{\text{отп}} = 350\text{--}400^{\circ}\text{C}$), **сорбитом отпуска** ($t_{\text{отп}} = 500^{\circ}\text{C}$) и **зернистым перлитом** ($t_{\text{отп}} = 650^{\circ}\text{C}$).

Частицы карбидов в структурах отпуска в отличие от троостита и сорбита, полученных в результате распада переохлажденного аустенита, имеют зернистое, а не пластинчатое строение. Образование зернистых структур улучшает многие свойства стали. При одинаковой прочности (H_B , σ_B) и пластичности (δ) сталь с зернистой структурой имеет более высокий уровень сопротивления деформации (σ_T) и вязкости (KCU).

1.6.5. Влияние отпуска на механические свойства стали

Распад мартенсита при отпуске влияет на все свойства стали. При $t_{\text{отп}} = 200 \dots 250^{\circ}\text{C}$ (**низкий отпуск**) уменьшается склонность стали к хрупкому разрушению. В случае низкотемпературного отпуска твердость закаленной и отпущенной стали не зависит от содержания в ней

легирующих элементов и определяется в основном содержанием углерода в феррите.

Прочность и вязкость стали при низком отпуске несколько возрастают вследствие уменьшения макро- и микронапряжений и изменения структурного состояния. Повышение температуры отпуска до $t_{\text{отп}} = 500\text{-}600^{\circ}\text{C}$ заметно снижает HB , σ_{T} , $\sigma_{\text{В}}$ и повышает ψ , КСЧ (рис. 30, а).

Формирование свойств при отпуске легированных сталей имеет особенности, обусловленные явлением отпускной хрупкости, состоящим в резком снижении ударной вязкости при определенных температурах отпуска (рис. 30, б).

Первый вид отпускной хрупкости, называемой **необратимой отпускной хрупкостью**, или **хрупкостью I рода**. Она наблюдается у закаленных легированных сталей при $t_{\text{отп}} = 250\text{-}400^{\circ}\text{C}$. Снижение ударной вязкости вызвано охрупчиванием стали из-за неоднородного распада мартенсита. В связи с этим для легированных сталей отпуск в районе температур $250\text{-}400^{\circ}\text{C}$ не проводят.

Второй вид отпускной хрупкости, называемой **обратимой отпускной хрупкостью**, или **хрупкостью II рода**, наблюдается в сталях определенной легированности (30ХГС, 35ХГСА, 35Г2 и др.), если они после отпуска медленно охлаждаются (в печи или на воздухе).

Отпускная хрупкость II рода не возникает, если охлаждение изделия с температуры отпуска проводят в воде. Для массивных изделий обеспечить быстрое охлаждение водой не удастся. В этом случае для избежания отпускной хрупкости II рода применяют стали, дополнительно легированные Мо или W в небольших количествах.

1.6.6. Технология термической обработки стали

Упрочнению термической обработкой подвергаются до 8-10% общей выплавки стали в стране. В машиностроении объем термического передела составляет до 40% стали, потребляемой этой отраслью. Номенклатура упрочняемых деталей велика – от деталей приборов, разнообразных деталей машин до крупных элементов металлургического, транспортного, энергетического оборудования.

Термическую обработку стали можно разделить на одинарную (отжиг, нормализация, закалка) и двойную (закалка + отпуск) обработку (табл. 13).

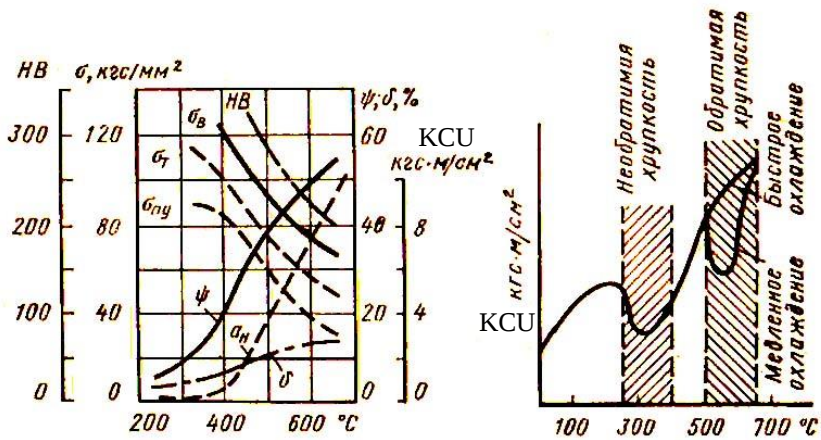


Рис.30. Влияние температуры отпуска на механические свойства закаленной стали с 0,45% С (а) и явления отпускной хрупкости легированных сталей (схема) (б)

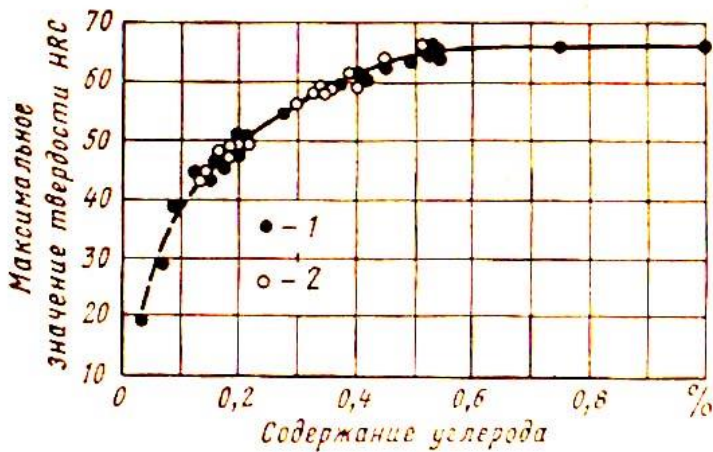


Рис.31. Твердость мартенсита в зависимости от содержания в нем углерода: 1- углеродистая сталь; 2- легированная сталь

Таблица 13.

Технологические параметры термической обработки стали

Наименование	Технологические параметры		Назначение
	Температура, °C	Охлаждение	
1	2	3	4
Одинарная обработка			
Диффузионный отжиг (гомогенизация)	1000-1100	С печью	Устранение дендритной неоднородности (ликвации)
Отжиг I рода	Ниже A_1		Снятие наклепа
Отжиг II рода	Ниже A_3		Перекристаллизация, снятие внутренних напряжений
Нормализация	Выше A_3 или $A_{ст}$	На воздухе	Измельчение структуры
Закалка	$A_3 + 30-50$ $A_1 + 30-50$	Скорость выше критической	Получение структуры мартенсита
Двойная обработка			
Закалка + низкий отпуск	150-200	На воздухе	Снятие закалочных напряжений, стабилизация размеров изделия
Закалка + средний отпуск	300-400		Повышение вязкости при сохранении упругости
Закалка + высокий отпуск (улучшение)	450-650	На воздухе или в воде	Оптимальное сочетание прочности и вязкости

Отжиг применяется для перевода металла изделия в равновесное (химическое или физическое) состояние. При этом облегчается обрабатываемость резанием, снимаются остаточные напряжения разной природы (структурные, сварочные и пр.), стабилизируются размеры изделия. При отжиге изделие охлаждается с печью.

Нормализация заключается в нагреве стали выше критической температуры (A_3 или $A_{сг}$), непродолжительной выдержке для прогрева садки и завершения фазовых превращений и охлаждения на воздухе. Нормализация вызывает полную фазовую перекристаллизацию стали и устраняет крупнозернистую структуру, полученную при литье, прокатке, ковке, штамповке.

Ускоренное охлаждение на воздухе приводит к распаду аустенита при более низких температурах, что повышает дисперсность ферритно-цементитной структуры и увеличивает количество перлита или, точнее, квазиэвтектоида типа сорбита или троостита. Для некоторых высоколегированных сталей мартенситного класса (40Х13 и др.) охлаждение на воздухе по существу является закалкой.

Назначение нормализации различно в зависимости от состава стали. Для низкоуглеродистых сталей нормализацию применяют вместо отжига. При повышении твердости металла нормализация повышает его обрабатываемость резанием и способствует получению более чистой обработанной поверхности.

Для отливок из среднеуглеродистой стали нормализацию или нормализацию с высоким отпускком применяют вместо заковки и высокого отпуска. Механические свойства в этом случае будут несколько ниже, но изделия подвергнутся меньшим термическим напряжениям, чем это имеет место при закалке, и вероятность появления закалочных трещин практически исключается.

Закалка – термическая обработка, заключающаяся в нагреве стали до температуры выше критической (A_3 для доэвтектоидных сталей $C < 0,8\%$ или A_1 для заэвтектоидных сталей $C > 0,8\%$), выдержке и последующем охлаждении со скоростью, превышающей критическую для данной марки стали.

Закалка не является окончательной операцией термической обработки. Чтобы уменьшить хрупкость и напряжения, вызванные закалкой, и получить требуемые механические свойства, сталь после закалки обязательно подвергают отпуску.

Инструментальную сталь ($C > 0,7\%$) в основном подвергают закалке и отпуску для повышения твердости, износостойкости и прочности, а конструкционную сталь ($C < 0,7\%$) – для повышения прочности, получения достаточно высокой прочности и вязкости, а для деталей из цементуемых сталей также и высокой износостойкости.

В зависимости от назначения по температуре нагрева различают три вида отпуска (см. табл.13).

1.6.7. Закаливаемость и прокаливаемость стали

Под **закаливаемостью** понимают способность стали повышать твердость в результате закалки. Закаливаемость стали определяется в первую очередь содержанием в стали углерода (рис. 31). Легирующие элементы оказывают относительно небольшое влияние на закаливаемость стали.

Под **прокаливаемостью** понимают способность стали получать закаленный слой с мартенситной или троосто-мартенситной (полумартенситной) структурой и высокой твердостью на ту или иную глубину. Прокаливаемость стали существенно зависит от состава стали, она повышается при легировании стали (все легирующие элементы, кроме кобальта), поскольку легирующие элементы смещают С-кривые стали вправо, увеличивая тем самым устойчивость аустенита и снижая критическую скорость закалки.

Закаленная зона стали идентифицируется по величине так называемой **полумартенситной твердости** $HRC_{\text{пм}}$, которая зависит от содержания углерода в стали (0,2%С – $HRC_{\text{пм}}32$; 0,3%С – $HRC_{\text{пм}}36$; 0,4%С – $HRC_{\text{пм}}40$; 0,5%С – $HRC_{\text{пм}}43$; 0,6%С – $HRC_{\text{пм}}47$; 0,7%С – $HRC_{\text{пм}}51$; 0,8%С – $HRC_{\text{пм}}53$; 0,9%С – $HRC_{\text{пм}}55$).

Существует несколько методов определения прокаливаемости стали. Наиболее распространенными среди них являются методы пробных закалок и торцевой закалки.

Метод пробных закалок заключается в изготовлении из данной стали серии цилиндров различного сечения, их последующей закалке, разрезке и измерении твердости в сечении, перпендикулярном оси цилиндра. Глубину проникновения закаленного слоя определяют по $HRC_{\text{пм}}$, зная содержание углерода в исследуемой стали.

Неудобство метода пробных закалок при определении прокаливаемости связано с необходимостью изготовления из данной стали нескольких образцов различного сечения и последующей разрезки закаленных цилиндров.

Простотой и универсальностью отличается определение прокаливаемости методом торцевой закалки. Этот метод был впервые предложен акад. Н.Т. Гудцовым в 1924 г. и в настоящее время гостирован (ГОСТ 5657). Сущность метода состоит в закалке с торца исследуемого образца струей воды. После закалки производят измерение твердости HRC по образующей цилиндра. Измерение твердости начинают на расстоянии 1,5 мм от закаливаемого торца, потом через каждые 1,5 мм выполняют 16 замеров, а затем замеры ведут, пока значение твердости не стабилизируется.

Характеристикой прокаливаемости при таком способе ее определения является расстояние $X_{лм}$ от торца до зоны с полумартенситной твердостью $HRC_{лм}$, названное **характеристическим расстоянием**. После замера распределения твердости по глубине закаленного слоя строят график $HRC(x)$, здесь x – расстояние от закаливаемого торца образца рис. 32, из которого определяют характеристическое расстояние.

Диаметр наибольшего сечения, в котором получается сквозная закалка называется **критическим диаметром** D_k (приводится в марочнике стали). Практическое значение D_k заключается в том, что зная его численное значение возможно определить наибольшее сечение детали, изготовленной из данной стали, которая может быть закалена насквозь. Зная D_k , можно правильно выбрать сталь для деталей определенных размеров и назначения.

Для каждого охладителя существует свой критический диаметр: для воды $D_{кв}$, для масла $D_{км}$, причем $D_{кв} > D_{км}$. Чтобы не ставить прокаливаемость в зависимость от способа охлаждения, вводят понятие **идеальный критический диаметр** D_{∞} . D_{∞} представляет собой диаметр максимального сечения, прокаливающегося насквозь в «идеальной» жидкости, отнимающей тепло с поверхности с бесконечно большой скоростью $V_{охл} \rightarrow \infty$.

Переход от характеристического расстояния $X_{лм}$ к критическим диаметрам D_{∞} , $D_{кв}$, $D_{км}$ осуществляется по **номограмме М.Е.Блантера** (рис.33).

Номограмма прокаливаемости представляет собой сетчатую номограмму, по осям которой откладываются следующие параметры:

- на оси абсцисс – значения идеального критического диаметра D_{∞} в мм.
- на оси ординат – значения скорости охлаждения $V_{охл}$ в град/с (логарифмическая ось).

Номограмма прокаливаемости имеет дополнительные оси:

- в верхней части номограммы параллельно оси абсцисс расположены оси характеристических расстояний: I – расстояние от закаливаемого торца до конца мартенситной зоны X_m (пределы 1-70 мм), II- расстояние от закаливаемого торца до конца полумартенситной зоны – 50% мартенсита + 50% троостита $X_{лм}$ (пределы 0,5-80 мм). На рис. 33 показана только полумартенситная ось.

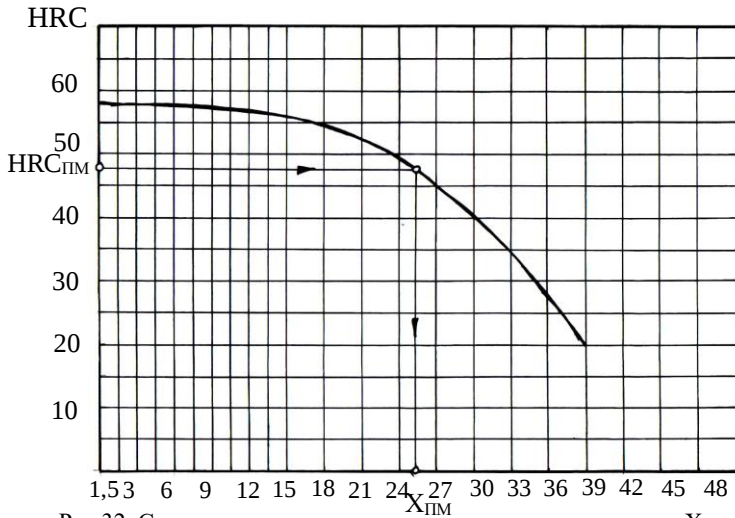


Рис.32. Схема определения характеристического расстояния $X_{ПМ}$ по полумартенситной твердости $HRC_{ПМ}$

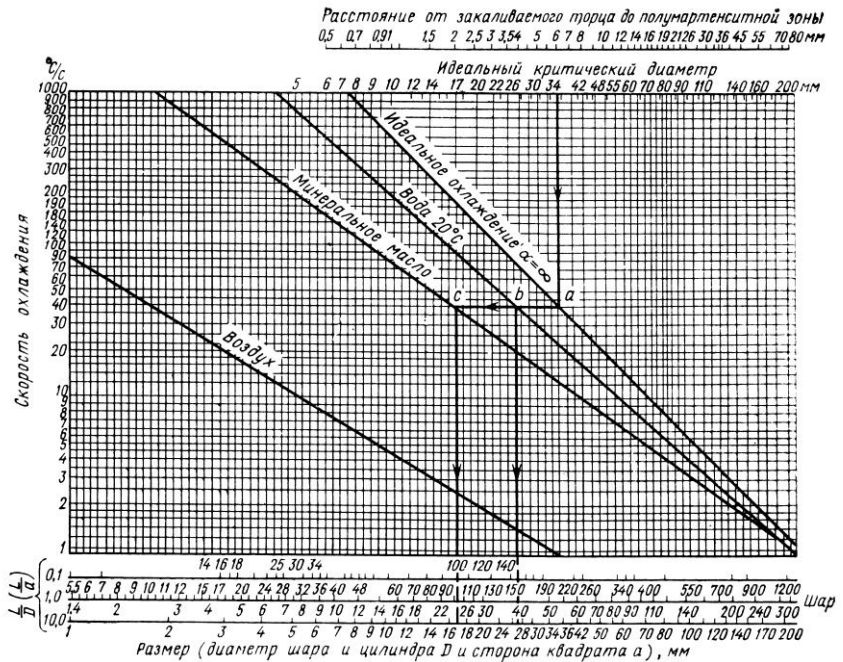


Рис.33. Номограмма М.Е. Блангера для определения прокаливаемости стали по результатам торцевой пробы

- в нижней части номограммы параллельно оси абсцисс расположены оси критических диаметров тел простейшей формы (шара, цилиндра, параллелепипеда с квадратным основанием). Цилиндры и параллелепипеды рассматриваются с разными отношениями L/D , L/a (L , D – высота и диаметр цилиндра, a – сторона основания параллелепипеда).

На номограмме нанесены линии, позволяющие значение идеального критического диаметра $D_{\kappa\infty}$ перевести в критические диаметры $D_{\kappa B}$, $D_{\kappa M}$, $D_{\kappa B\text{возд}}$ для тел, указанных выше геометрических форм. Этот переход в виде шагов 1→2→3 выполняется по номограмме графически (см. ключ номограммы)

$$\left. \begin{matrix} (1) X_M \\ (1') X_{ПМ} \end{matrix} \right\} \rightarrow (2) D_{\kappa\infty} \rightarrow \left\{ \begin{matrix} D_{\kappa B}(3') \\ D_{\kappa M}(3'') \\ D_{\kappa B\text{возд}}(3''') \end{matrix} \right. , (18)$$

где шаг **1**, **1'** - X_M , $X_{ПМ}$ –определяется по данным торцевой закалки (X_M на дополнительной оси I, $X_{ПМ}$ – II);

шаг **2** - $D_{\kappa\infty}$ определяется по номограмме перенесением значений X_M , $X_{ПМ}$ на ось $D_{\kappa\infty}$;

шаг **3'**, **3''**, **3'''** - $D_{\kappa B}$, $D_{\kappa M}$, $D_{\kappa B\text{возд}}$ определяются по номограмме для тел заданной геометрической формы.

1.7. Цветные металлы и сплавы

Физико-механические свойства металлов изменяются в широких пределах. Металлы, обладающие близкими свойствами, объединяются в группы (табл. 14). Основным свойством **железных металлов** Fe, Ni является **ферромагнетизм**. **Легкие металлы** имеют малую плотность. **Тугоплавкие металлы** имеют температуру плавления выше, чем у железа. **Благородные металлы** имеют **положительный электрохимический потенциал**.

Таблица 14.

Физико-механические свойства металлов

Сим вол	Названи е	Физические свойства			Механические свойства		
		t _{пл} , °C	ρ, г/см ³	α, 10 ⁻⁶	σ _B	HB	δ, %
					кгс/мм ²		
1	2	3	4	5	6	7	8
Железные							
Fe	Железо	1539	7,9	11,5	24	70	24

1	2	3	4	5	6	7	8
Co	Кобальт	1494	8,9	12,5	13	50	13
Ni	Никель	1455	8,9	13,5	43	80	43
Mn	Марганец	1246	7,4	22,1	-	200	-
Легкие							
Mg	Магний	649	1,7	25,7	18	30	16
Be	Бериллий	1289	1,8	12,2	57	140	16
Al	Алюминий	660	2,7	23,1	9	20	30
Легкоплавкие							
Sn	Олово	232	7,3;5,8	46,6	2,75	5	40
Bi	Висмут	271	9,8	-	2,4	9	26
Tl	Таллий	302	11,8	-	1,0	2	40
Cd	Кадмий	321	8,65	31,5	7	22	50
Pb	Свинец	328	11,3	28,1	1,4	4	31
Zn	Цинк	420	7,13	32,5	7-10	35	10-20
Sb	Сурьма	631	6,7	-	11	30-58	-
Тугоплавкие							
W	Вольфрам	3387	19,3	4,3	87	300	12
Ta	Тантал	3014	16,6	-	45-55	140	23-30
Mo	Молибден	2623	10,2	4,9	70	150	23
Nb	Ниобий	2470	8,6	7,2	40	80	31
Hf	Гафний	2222	13,4	-	42	190	35
V	Ванадий	1920	6,1	8,3	20-41	80	33-44
Zr	Цирконий	1860	6,45	6,23	22	100	45
Cr	Хром	1890	7,2	6,2	42	100	44
Ti	Титан	1668	4,5	7,14	45-60	80	25
Благородные							
Pt	Платина	1772	21,45	9,0	14	48	30-50
Au	Золото	1064	19,3	14,2	12	19	50
Ag	Серебро	962	10,5	18,9	25	15	65
Cu	Медь	1084	8,9	16,5	23	35	60
Примечание: ρ – плотность; α - коэффициент термического расширения.							

Применение металлов и сплавов на их основе определяется комплексом физико-механических, технологических и экономических факторов.

В настоящее время в технике используются разнообразные сплавы как конструкционные сплавы, применяемые для силовых элементов технических устройств, воспринимающие нагрузки, так и специальные сплавы, обладающие выраженными эксплуатационными свойствами

(жаропрочность, антифрикционность и др.). Некоторые специальные сплавы представлены в табл. 15.

Таблица 15.

Специальные сплавы

Группа	Система	Наименование, марка
1	2	3
Жаропрочные	Ni-Cr-Al-Ti	Нимоник
	Аустенитная сталь	1X14H16Б; 4X12H8Г8МФБ
	Сильхромы	X6C; X9C2; X6CM
	Ni-Cr-Fe-Al-Ti	Инконель
Реостатные	Cu-Ni-Mn	Манганин МНМц 3-12
		Константан МНМц 40-1,5
		Копель МНМц 43-0,5
Жаростойкие	Ni-Cr-Co	Хромель
	Fe-Cr-Al	Хромаль Х23Ю5Т
		Фехраль Х13Ю4
	Ni-Cr	Нихром Х20Н80; Х15Н60
Коррозионно-стойкие	Ni-Cu-Fe-Mn	Монель-металл
	Cu-Ni	Мельхиор МН19
	Cu-Ni-Zn	Нейзильбер МНЦ 15-20
Магнитно-твердые	Углеродистая сталь	У10; У12
	Хромистая сталь	ЕХ; ЕХ3
	Кобальтовая сталь	ЕХ5К5; ЕХ9К15М
	Fe-Ni-Al	Альнико
Магнитно-мягкие	Техническое железо	Э; ЭА; ЭАА
	Электротехническая сталь	Э11; Э43; Э1100
	Ni-Fe	Пермаллой 79НМ
		Гайперник 45Н
	Fe-Al-Si	Альсифер
	Fe-Ni-Co	Перминвар 45НК
Немагнитная сталь	Аустенитная	55Г9Н9Х3; 45Г17Ю3
Сплавы с заданным значением теплового расширения	Fe-Ni	Инвар Н36
		Платинит Н48
	Fe-Ni-Co	Суперинвар Н31К6
Сплавы с постоянным модулем упругости	Fe-Ni-Cu	Элинвар ЭИ25
	Fe-Ni-Cu-W-Mo	Элинвар Н25ХМВ
Антифрикционные	Sn-Sb-Cu	Баббит Б83; Б89
	Pb-Sn-Sb-Cu	Баббит Б6; Б16
	Zn-Al-Cu	Баббит ЦАМ-10-5

1	2	3
	Cu-Pb	Бронза БС30
	Fe-Cu-графит	Железографит
	Cu-Sn-Pb- графит	Бронзографит

1.7.1. Алюминий и сплавы на его основе

Алюминий относится к легким металлам (табл. 14). Обладает высокой электропроводностью ($2,65 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$), составляющей 65% от электропроводности меди, и теплопроводностью $0,57 \text{ кал}/\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{град}$ (54% от теплопроводности меди).

В зависимости от чистоты различают алюминий особой чистоты: А999 (99,999% Al); высокой чистоты А995 (99,995% Al); А99; А97; А95 и технической чистоты: А85 (99,85% Al), А8, А7, А6, А5, АО (99% Al). Разница в стоимости А999 и АО достигает 500 раз.

Технический алюминий изготавливается в виде листов, профилей, прутков проволоки и других полуфабрикатов и маркируется АДО и АД1. Алюминий обладает высокой коррозионной стойкостью вследствие образования на его поверхности тонкой прочной пленки окисла Al_2O_3 . Алюминий легко обрабатывается давлением, сваривается всеми видами сварки, но обработка резанием его затруднена.

Технический алюминий АДО и АД1 применяют для изготовления элементов конструкций и деталей, не несущих нагрузки, когда требуется высокая пластичность, хорошая свариваемость, сопротивление коррозии и высокие электро-и теплопроводность.

Из алюминиевых сплавов наибольшее распространение получили сплавы Al-Cu, Al-Si, Al-Mg, Al-Cu-Mg, Al-Cu-Mg-Si, Al-Mg-Si, а также Al-Zn-Mg-Cu.

Все сплавы алюминия можно разделить на две группы:

- **деформируемые**, предназначенные для получения давлением полуфабрикатов (листов, плит, прутков, специальных профилей, труб и т.д.), а также поковок и штамповок путем прокатки, прессования,ковки и штамповки (табл. 16, 17);
- **литейные**, предназначенные для фасонного литья (табл. 18).

Деформируемые сплавы в свою очередь подразделяются на сплавы, упрочняемые термообработкой (табл. 16), и сплавы, не упрочняемые термообработкой (табл. 17).

Таблица 16.

Химический состав и типичные механические свойства * некоторых деформируемых алюминиевых сплавов после закалки и старения

Марка сплава**	Содержание элементов, %					Механические свойства		
	Cu	Mg	Mn	Si	Другие	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	σ_B , кгс/мм ²	δ , %
Дуралюмин								
Д1	3,8-4,8	0,4-0,8	0,4-0,8	-	-	32	49	14
Д16	3,8-4,9	1,2-1,8	0,3-0,9	-	-	40	54	11
Сплав авиаль								
АВ	0,1-0,5	0,45-0,9	0,15-0,35	0,5-1,2	-	20	26	15
Высокопрочные алюминиевые сплавы								
В95	1,4-2,0	1,8-2,8	0,2-0,6	-	5-7 Zn 0,1-0,25 Cr	53-55	56-60	8
В96	2,2-2,8	2,5-3,2	0,2-0,5	-	7,6-8,6 Zn 0,1-0,25 Cr	63	67	7
Ковочные алюминиевые сплавы								
АК6	1,8-2,6	0,4-0,8	0,4-0,8	0,7-1,2	-	30	42	12
АК8	3,9-4,8	0,4-1,0	0,4-1,0	0,6-1,2	-	38	48	10
Жаропрочные алюминиевые сплавы								
АК4-1	1,9-2,5	1,4-1,8	-	0,35	0,8-1,4 Fe 0,8-1,4 Ni 0,02-0,1 Ti	28	43	13
Д20	6-7	-	0,4-0,8	-	0,1-0,2 Ti 0,2 Zr	25	40	12
* Механические свойства даны для прессованных прутков и профилей после закалки и старения. ** Буква Д обозначает сплав типа дуралюмин, буква А в начале марки – технический алюминий (АД, АД1); АК – алюминиевый ковочный сплав.								

Таблица 17.

Химический состав и типичные механические свойства сплавов алюминия, не упрочняемых термической термообработкой

Марка сплава*	Содержание элементов, %		Механические свойства**		
	Mn	Mg	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %
АМц	1,0-1,6	-	13 (17)	5 (13)	23 (10)
АМг2	0,2-0,6	1,8-2,8	20 (25)	10 (20)	23 (10)
АМг3	0,3-0,6	3,2-3,8	22	11	20
АМг5	0,3-0,6	4,8-5,8	30	15	20
АМг6	0,5-0,8	5,8-6,8	34 (40)	17 (30)	18 (10)
* Сплав АМг3 дополнительно содержит 0,5-0,8% Si, улучшающего свариваемость; сплавы АМг5, АМг6 легируют 0,02-0,1% Ti и 0,0002-0,005% Be, уменьшающими склонность к коррозии под напряжением.					
** Без скобок – свойства сплавов в отожженном состоянии, в скобках – в полунгагартованном (наклепанном) состоянии.					

Таблица 18.

**Химический состав и типичные механические свойства
некоторых литейных алюминиевых сплавов**

Марка сплава	Содержание элементов, %					Вид ТО*	Механические свойства		
	Mg	Si	Mn	Cu	Другие		σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сплавы Al-Si (силумины)									
Ал2	-	10-13	-	-	-	T2	18	9	5
Ал4	0,17-0,4	8-10,5	0,25-0,5	-	0,15Ti 0,1Be	T1 T6	18 26	14 20	2 4
АЛ9	0,2-0,4	6-8	-	-	0,15Ti 0,1Be	T4 T5	20 22	14 16	5 3
Сплавы Al-Cu									
Ал7	-	-	-	4-5	0,2Ti	T4 T5	24 26	20 13	7 6
АЛ19	-	-	0,6-1,0	4,-5,3	0,15- 0,35Ti	T4 T5	32 36	18 25	9 5
Сплавы Al-Mg (магналии)									
АЛ8	9,5-11,5	-	-	-	0,07Ti 0,07Be 0,2Zr	T5	35	17	10
АЛ27	9,5-11,5	-	-	-	0,05-0,15Ti 0,05-0,15Be 0,05-0,22Zr	T4	36	18	18
Жаропрочные сплавы									
Марка	Mg	Mn	Cu	Другие	Вид ТО	Механические свойства			
АЛ1	1,25-1,75	-	3,75-4,5	1,75-2,25Ni 0,15-0,25Cr	T5 T7	26 22	20 18	0,6 1,2	
АЛ21	0,8-1,3	0,15-0,25	4,6-6	0,1-0,25Cr 2,6-3,6Ni	T2 T7	21 22	- 20	1,2 1,5	
Виды термообработки: T1 – искусственное старение при 175-180°C, 5-20 часов; T2 – отжиг 300°C, 5-10 часов; T3, T4 – закалка + естественное старение; T5 – закалка + кратковременное искусственное старение; T6 – закалка + полное искусственное старение; T7 – закалка + стабилизирующий отпуск.									

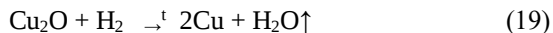
1.7.2. Медь и сплавы на ее основе

В зависимости от чистоты медь имеет следующие марки: МОО (99,99% Cu), МО (99,95% Cu), М1 (99,9% Cu), М2 (99,7% Cu), М3 (99,5% Cu). Наличие примесей резко снижает электропроводность меди (рис. 34), поэтому для проводников тока применяют медь марок МО и М1.

Вреднейшие примеси в меди Вi, Pb, O₂. Вi и Pb образуют с медью низкоплавкие эвтектики (температура плавления 270⁰С и 327⁰С соответственно). Эвтектики располагаются по границам зерен и

вызывают **красноломкость** меди (разрушение по границам зерен при горячей обработке сплава, т.к. $t_{обр} > t_{пл\ эвт}$).

Медь, загрязненная окислами, при нагреве подвержена «водородной болезни»



Выделяющиеся в результате реакции пары воды скапливаются в микронесплошностях металла и вызывают трещины и разрывы, которые могут привести к разрушению детали.

Медь хорошо сопротивляется коррозии в обычных атмосферных условиях, в пресной и морской воде и в других агрессивных средах, но обладает плохой устойчивостью в сернистых газах и аммиаке.

Медь легко обрабатывается давлением, но плохо резанием и имеет невысокие литейные свойства из-за большой усадки. Медь плохо сваривается, но легко паяется. Ее применяют в виде листов, прутков, труб и проволоки.

В качестве конструкционных материалов применяются сплавы меди. Различают две основные группы сплавов на основе меди:

- **латуни** – сплавы меди, в которых основным компонентом наряду с медью является цинк;
- **бронзы** - сплавы меди с другими элементами (Sn, Si, Pb и др.), среди которых может быть и цинк.

Медные сплавы обладают высокими механическими и технологическими свойствами, хорошо сопротивляются износу и коррозии.

Сплавы обозначают буквой **Л** (латуни) и буквами **Бр** (бронзы), после чего следует обозначение легирующих элементов (см. табл. 10) и их содержание в целых процентах. Например, сплав ЛЖМЦ 59-1-1 представляет собой легированную латунь, содержащую 59% Cu, 1% Fe и 1% Mn, остальное (49%) Zn; сплав БрОФ 6,5-0,15 представляет собой бронзу, содержащую 6,5% Sn, 0,15% P, остальное ($\approx 93\%$) медь.

Латуни по технологическому признаку подразделяют на две группы: **деформируемые**, из которых изготовляют листы, ленты, трубы, проволоку и другие полуфабрикаты, и **литейные** – для фасонного литья (табл. 19).

По химическому составу бронзы делятся на оловянные (табл. 20) и безоловянные (табл. 21), которые в свою очередь бывают деформируемые и литейные.

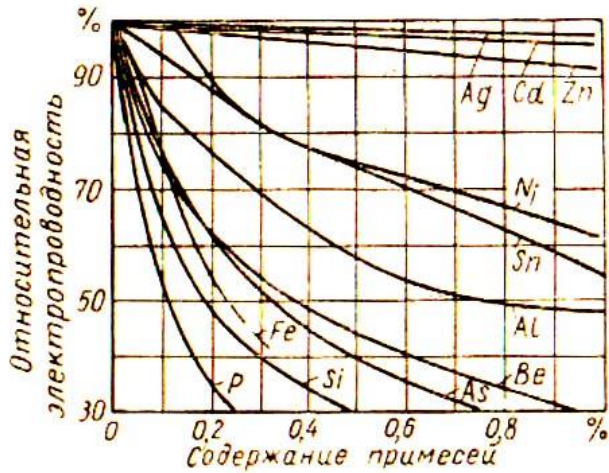


Рис.34. Зависимость электропроводности меди от содержания примесей

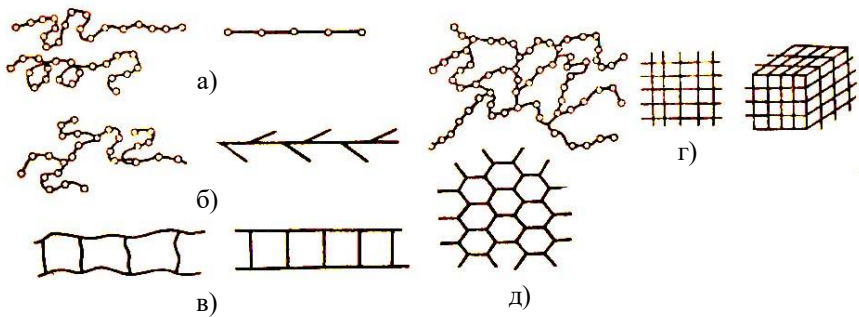


Рис.35. Формы макромолекул полимеров: а – линейная; б- разветвленная; в- лестничная; г- пространственная, сетчатая; д- паркетная

Таблица 19.

**Назначение и типичные механические свойства
некоторых латуней**

Марка латуни	σ_B^1 , кгс/мм ²	δ^1 , %	Назначение
Деформируемые латуни ²			
Томпак Л96	24/45	50/2	Изделия с высокой теплопроводностью, несклонные к коррозионному растрескиванию
Томпак Л90	26/48	45/4	
Л80	32/64	52/3	Ювелирные и декоративные изделия
Деформируемые специальные латуни ³			
ЛАЖ 60-1-1	45/75	45/8	Трубы, прутки, полоса, проволока, лист
ЛЖМц 59-1-1	45/70	50/7	
ЛС 59-1	40/65	45/5	
Литейные специальные латуни ^{3,4}			
ЛК 80-3Л	25/30	10/15	Арматура, детали приборов
ЛАЖМц 66-6-3-2	60/65	7/7	Червячные винты, гайки нажимных винтов
ЛКС 80-3-3	25/30	7/15	Втулки, вкладыши подшипников
ЛМцЖ 52-4-1	-/50	-/15	Арматура, детали ответственного назначения
Примечания: 1 – в числителе механические свойства после отжига, в знаменателе – после наклепа; 2 – в марке цифра обозначает содержание Cu, остальное Zn; 3 – расшифровку легирующих элементов см. табл. 10; 4 – в числителе – механические свойства при литье в песчаную форму, в знаменателе – при литье в кокиль.			

Таблица 20.

**Механические свойства и назначение
деформируемых и литейных оловянных бронз**

Марка бронзы	Свойства*		Область применения
	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	
1	2	3	4
Деформируемые бронзы (типичные свойства)			
БрОФ6,5-0,15	40 (75)	65 (10)	Пружины барометрические коробки, мембраны, антифрикционные детали
БрОЦ4-3	33 (55)	40 (4)	Плоские и круглые пружины
БрОЦС4-4-2,5	35 (65)	35 (2)	Антифрикционные детали
Литейные бронзы (минимальные свойства)			

1	2	3	4
БрОЦСНЗ-7-5-1	18 (21)	8 (5)	Арматура, работающая в условиях морской и пресной воды, а также пара при давлении до 2,5 МПа
БрОЦС3-12-5	18	8	Арматура, работающая в условиях пресной воды, а также пара при давлении до 2,5 МПа
БрОЦС5-5-5	15 (18)	6 (4)	Антифрикционные детали и арматура
БрОЦС4-4-17	15 (20)	6 (4)	Антифрикционные детали (втулки, вкладыши, червячные колеса)
* В скобках – свойства после наклепа или после отливки в кокиль			

Таблица 21.

**Типичные механические свойства и назначение
безоловянных бронз**

Марка бронзы	Механические свойства*			Область применения
	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	НВ	
Алюминиевые бронзы				
БрАЖ9-4	60 (85)	40 (5)	110 (180)	Прутки, поковки
БрАЖ9-4Л	55	10	130	Фасонное литье
БрАЖН10-4-4**	65 (80)	35 (9)	150 (225)	Прутки, трубы, поковки
БрАЖН10-4-4Л	65	5	190	Фасонное литье
Кремнистая бронза				
БрКМц3-1	38 (70)	55 (7)	80 (180)	Прутки, проволока, ленты для пружин, сеток; простые отливки.
Бериллиевая бронза				
БрБ2	50 (95)	45 (1-2)	100 (250)	Прутки, проволока, ленты для пружин, мембраны; детали, работающие на износ; безыскровой инструмент.
Свинцовая бронза				
БрС30	6-8	4-6	40	Для заливки вкладышей подшипников дизельных двигателей

* В скобках даны свойства в нагартованном (твердом состоянии).

** Подвергается термической обработке.

1.7.3. Электротехнические сплавы

Электротехнические сплавы — это сплавы, для которых основным эксплуатационным свойством является электросопротивление и его температурная стабильность. Эти сплавы делятся на две группы: проводниковые сплавы и сплавы с высоким электрическим сопротивлением.

Проводниковые сплавы отличаются высокой проводимостью и применяются для проводов, обмоток электрических машин, кабелей и т.п. К этим проводниковым материалам предъявляются следующие эксплуатационные требования:

- малое электрическое сопротивление для уменьшения потерь при передаче электроэнергии;
- достаточная механическая прочность для предохранения от провисания проводов;
- высокая пластичность, т.е. способность к холодному деформированию для получения волочением длинных проводников равного сечения;
- хорошая коррозионная устойчивость в атмосферных условиях;
- легкость пайки и сварки, что особенно важно для электромонтажных работ.

Этим требованиям в разной степени удовлетворяют Cu, Al, Fe, которые применяются в качестве проводниковых материалов в чистом виде и в сплавах (табл. 22).

Таблица 22.

Применение и свойства проводниковых сплавов

Сплав	Свойства			Применение
	Электропроводность, %	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	
1	2	3	4	5
Медь ММ	100	25-28	18-55	Проводниковые жилы
Медь МТ	98	34-39	0,5-2,5	Контактные провода, шины
Бр Кд 0,9	83-90	73	4	Токопроводящие пружины
БрОКд 0,6-0,8	50-55	73	4	
БрОА 2-2,5	15-18	87	4	
Л70	25	88	5	Фасонные токопроводящие детали
Альдрей	54	35	8	Провода для

1	2	3	4	5
(0,4%Mg, 0,6%Si, 0,25%Fe, Al-ост.)				воздушных линий передач
Сталь (0,1-0,15% C)	14-16	70-75	-	Шины и рельсы электрических железных дорог

Проводниковые сплавы с высоким электросопротивлением применяются для двух целей. Во-первых, для изготовления реостатов, образцовых сопротивлений и в электрических приборах - это, так называемые, **реостатные сплавы**; во-вторых, для **нагревательных элементов** (см. табл. 15).

Общими требованиями для этих двух подгрупп электротехнических сплавов является высокое электрическое сопротивление и малый температурный коэффициент электросопротивления. Различие в других требованиях связано с температурными условиями эксплуатации. Сплавы для нагревательных элементов работают при температурах выше 800⁰С, поэтому к ним предъявляются дополнительные требования жаростойкости (окалиностойкости) и, в ряде случаев, жаропрочности.

1.7.4. Антифрикционные сплавы

Антифрикционные сплавы применяют для изготовления деталей, работающих в опорах трения скольжения. Эти материалы должны отвечать следующим эксплуатационным требованиям: низкий коэффициент трения, высокая износостойкость и хорошая прирабатываемость к валу.

В связи с этим структура антифрикционных сплавов должна обеспечивать работоспособность сплава при трении. Наилучшим образом зарекомендовали себя двухфазные сплавы с мягкой пластичной основой и равномерно распределенными мелкими твердыми частицами.

В процессе приработки мягкая составляющая сплава истирается, образуя на поверхности трения специфический рельеф, способствующий удержанию смазки на поверхности трения.

В качестве подшипниковых сплавов используются бронзы, антифрикционные чугуны и баббиты.

Баббиты являются специальными сплавами, применяющимися только в качестве подшипниковых.

Подшипниковые сплавы имеют оловянную или свинцовую основу (табл. 23), они легкоплавки и технологически удобны для изготовления вкладышей для подшипников скольжения.

Таблица 23.

Марки и состав баббитов								
Марка	Содержание элементов, %							
	Sn	Pb	Sb	Cu	Ca	Cd	As	Другие
Оловянные								
Б83	Основа	0,35	10-12	5,5-6,6	-	-	0,1	-
Б89	Основа	0,35	7,25-8,25	2,5-3,5	-	-	0,1	-
Свинцовые								
Б16	15-17	Основа	15-17	1,5-2,0	-	-	0,3	-
Б6	5-6	Основа	14-16	2,5-3,0	-	1,75-2,25	0,6-1,0	-
БН	9-11	Основа	13-15	1,5-2,0	-	1,25-1,75	0,5-0,9	0,75-1,25 Ni
БТ	9-11	Основа	14-16	0,7-1,1	-	-	-	0,05-0,20 Te
Кальциевые								
БКА	-	Основа	-	-	0,85-1,15	-	-	0,6-0,9 Na 0,05-0,20 Al
БК2	1,5-2,5	Основа	-	-	0,35-0,55	-	-	0,25-0,50 Na 0,04-0,09 Mg

1.7.5. Припой

Припой – сплавы, применяемые для образования паяного соединения, которое обеспечивает механически прочное (иногда герметичное) соединение деталей или обеспечивают получение хорошего электрического контакта между соединяемыми деталями.

Припой имеют температуру плавления значительно более низкую, чем температура плавления материалов соединяемых пайкой деталей. При нагреве припоя плавится, в то время как соединяемые детали только нагреваются в твердом состоянии. Между расплавленным припоем и соединяемым металлом происходят физико-химические процессы, которые заключаются в смачивании металла припоем, растекании по нему и заполнении зазоров, диффузии компонентов припоя в твердый металл и растворении соединяемого металла в припое. После охлаждения припоя образуется **паяный шов**, обеспечивающий плотное и прочное соединение.

Припои делятся на **мягкие и твердые**. Признаком разделения является температура плавления.

Припои с температурой плавления ниже 400⁰С относятся к мягким; предел прочности этих припоев не превышает 5-7 кг/мм². Припои, плавящиеся выше 500⁰С, относятся к твердым; их прочность достигает в отдельных случаях $\sigma_B = 50$ кг/мм². Некоторые типы припоев и области их применения представлены в табл. 24.

Таблица 24.

Марки, состав и назначение припоев

Тип припоя	Марка	Состав	$t_{пл},$ °С	Применение
Мягкие припои				
Sn-Pb-Sb	от ПОС-18 до ПОС-90	18-90% Sn 2,5% Sb Pb - остальное	190-277	Медь и ее сплавы, серебро, оцинкованное железо
Sn-Pb-Cd	ПОСК-47	47-50% Sn 32-36% Pb 17-18% Cd	145-180	Медь и ее сплавы, серебро
Sn-Pb-Ag-Cd	ПСрК	30%Sn 63%Pb 5%Cd, 2%Ag	225	
Sn-Cd-Zn	-	40-55%Sn 20%Cd 25%Zn	200-250	Алюминий и его сплавы
Sn-Pb-Cd-Bi	Сплав Вуда	12,5%Sn 26%Pb 11,5%Cd 50%Bi	60,5	Низкотемперату рная пайка, пробки противопожарн ых устройств
Sn-Zn	ПОЦ-40 ПОЦ-90	40-90%Sn Zn-остальное	198-400	Алюминий, магний и их сплавы
Твердые припои				
Cu-Zn	ПМЦ-36 ПМЦ-50	36-54%Cu Zn-остальное	825-860	Сталь, медь
Ag-Cu-Zn	ПСр-10 ПСр-70	54-27%Cu 39-0%Zn Ag-остальное	660-850	Сталь, медь и ее сплавы, Ag, Pt, W

1.8. Пластические массы

Пластмассы (пластики) представляют собой искусственные материалы, получаемые на основе органических полимерных связующих веществ. Эти материалы способны при нагревании размягчаться, становиться пластичными, и тогда под давлением им можно придать заданную форму, которая затем сохраняется.

В зависимости от природы связующего вещества переход от формованной массы в твердое состояние совершается или при дальнейшем ее нагревании, или при последующем охлаждении.

1.8.1. Классификация полимеров

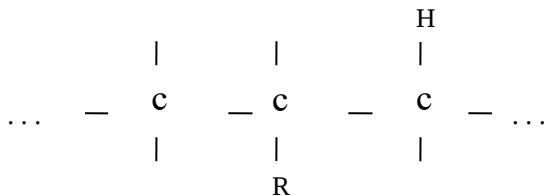
Полимерами называют вещества, макромолекулы которых состоят из многочисленных элементарных звеньев (**мономеров**) одинаковой структуры. Молекулярная масса их составляет от 5000 до 1000000. При таких больших размерах макромолекул свойства веществ определяются не только химическим составом этих молекул, но и их взаимным расположением и строением.

Полимеры встречаются в природе: натуральный каучук, целлюлоза, слюда, асбест, природный графит. Однако ведущей группой являются синтетические полимеры, получаемые в процессе химического синтеза из низкомолекулярных соединений. Возможности создания новых полимеров и изменения свойств уже существующих очень велики. Синтезом можно получать полимеры с разнообразными свойствами и даже создавать материалы с заранее заданными характеристиками.

По составу все молекулы подразделяют на **органические, элементоорганические, неорганические**.

Органические полимеры составляют наиболее обширную группу соединений.

Если основная молекулярная цепь таких соединений образована только углеродными атомами, то они называются **карбоцепными полимерами**. Углеродные атомы соединены с атомами водорода или органическими радикалами



В *гетероцепных* полимерах атомы других элементов, присутствующие в основной цепи кроме углерода, существенно изменяют свойства полимера. Так в полимерах атомы кислорода способствуют повышению гибкости цепи, что приводит к увеличению пластичности полимеров (например, для волокон, пленок), атомы фосфора и хлора повышают огнестойкость, атомы серы придают газонепроницаемость (для герметиков, резин), атомы фтора, даже в виде радикалов, сообщают полимеру высокую химическую стойкость и т.д.

По форме макромолекул полимеры делятся на *линейные* (цеповидные), *разветвленные*, *лестничные*, *пространственные*, *сетчатые*, *паркетные* (рис. 35).

Органическими полимерами являются смолы и каучуки.

Элементоорганические соединения содержат в составе основной цепи неорганические атомы Si, Ti, Al и других элементов, которые сочетаются с органическими радикалами (метильный, фенильный, этильный). Органические радикалы придают материалу прочность и пластичность, а неорганические атомы сообщают повышенную теплостойкость. В природе таких соединений не встречается. Представителями этой группы полимеров является *кремнийорганические соединения*, разработанные российским ученым К.А. Андрияновым.

К *неорганическим полимерам* относятся силикатные стекла, керамика, слюда, асбест. В основе этих соединений углеродного скелета нет. Основу неорганических полимеров составляют окислы SiO₂, Al₂O₃, MgO, CaO и др.

В силикатах существует два типа связей: атомы в цепи соединены ковалентными связями (Si – O), а цепи между собой – ионными связями. Свойства этих веществ можно изменять в широких пределах, получая, например, из минерального стекла волокна и эластичные пленки.

Неорганические полимеры отличаются более высокой пластичностью, высокой длительной теплостойкостью. Однако стекла и керамика хрупкие, плохо переносят динамические нагрузки. К

неорганическим полимерам относится также графит, представляющий собой карбоценный полимер.

Все полимеры по отношению к нагреву подразделяются на термопластичные и термореактивные.

Термопластичные полимеры (термопласты) при нагревании размягчаются, даже плавятся, при охлаждении затвердевают. Этот процесс обратим, т.е. никаких химических превращений материал не претерпевает и может при повторном нагревании вновь быть переведен в пластичное состояние. Структура макромолекул таких полимеров линейная или разветвленная. Представителями термопластов являются капрон, полиэтилен, полистирол, полиамиды и др.

Термореактивные полимеры (реактопласты) на первой стадии образования имеют линейную структуру и при нагревании размягчаются, затем вследствие протекания химических реакций затвердевают (образуется пространственная структура) и в дальнейшем остаются твердыми. Отвержденное состояние полимера называется термостабильным.

Примером реактопластов могут служить фенолформальдегидная, шифталева и другие смолы.

Полимеры могут находиться в трех физических состояниях: в стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем.

Стеклообразное состояние – твердое, аморфное; характеризуется тем, что атомы, входящие в состав молекулярной цепи, совершают колебательное движение около положения равновесия; движения звеньев и перемещения макромолекул не происходит.

Высокоэластическое состояние присуще только высокополимерам, характеризуется способностью материала к большим обратимым изменениям формы при небольших нагрузках (колеблются звенья и макромолекула приобретает способность изгибаться).

Вязкотекучее состояние напоминает жидкое состояние, но отличается от него очень большой вязкостью вещества (подвижна вся макромолекула).

С изменением температуры линейный или разветвленный полимер может переходить из одного физического состояния в другое. Переход полимера из одного состояния в другое происходит в некотором диапазоне температур.

Средние температуры переходных областей называются **температурами перехода**: t_c , t_k , t_T на рис. 36. Область I является областью стеклообразного состояния полимера, область II – высокоэластического состояния, III – вязкотекучего состояния.

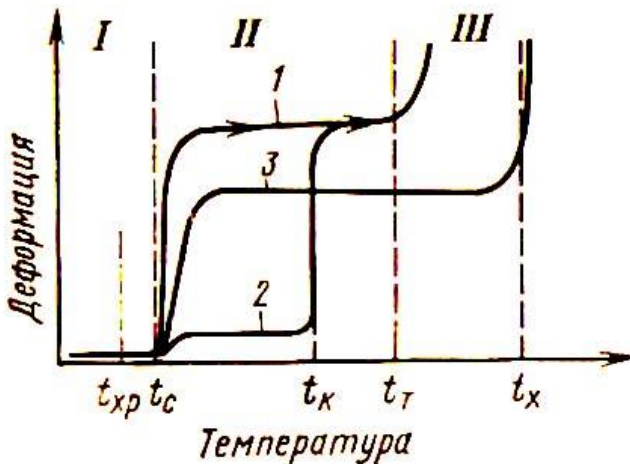


Рис.36. Термомеханические кривые полимеров

(1- некристаллический; 2- кристаллический; 3- редкосетчатый)

Температуры: t_{xp} – хрупкости; t_c – стеклования; t_k – кристаллизации;

t_T – начала вязкого течения; t_x – начала химического разложения.

I – III – участки соответственно стеклообразного, высокоэластического и вязкотекучего состояний

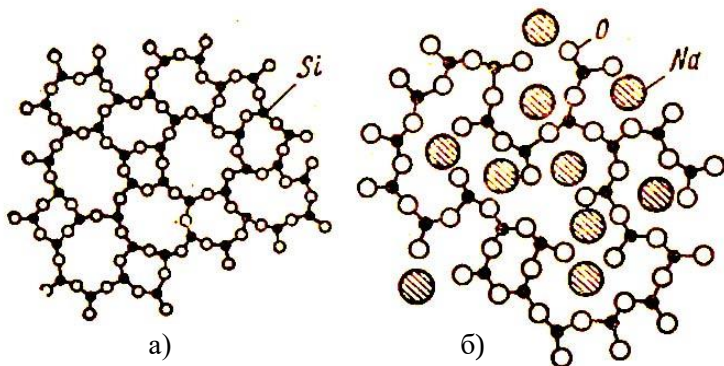


Рис.37 Структура неорганического стекла: а – кварцевого; б - натрийсиликатного.

Точка t_{xp} , лежащая ниже точки t_c , является температурой хрупкости. При температуре ниже t_{xp} полимер становится хрупким, т.е. разрушается при очень малой величине деформации.

Температурные переходы (t_c и t_T) являются одними из основных характеристик полимера и имеют большое значение. Например, при использовании волокон, пленок, лаков в промышленности, где необходима высокая прочность, лежащие в их основе полимеры должны находиться в стеклообразном состоянии. Резиновой промышленности необходимы высокоэластические полимеры, сохраняющие свои свойства в широком диапазоне температур. Процесс технологической переработки полимеров происходит в области вязкотекучего состояния.

1.8.2. Состав и свойства пластмасс

Обязательным компонентом пластмассы является связующее вещество. В качестве связующих для большинства пластмасс используются синтетические смолы, реже применяются эфиры целлюлозы. Многие пластмассы, главным образом термопластичные, состоят из одного связующего вещества, например полиэтилен, органические стекла и др.

Другим важным компонентом пластмасс является **наполнитель** (порошкообразные, волокнистые и другие вещества как органического, так и неорганического происхождения). После пропитки наполнителя связующим получают полуфабрикат, который спрессовывают в монолитную массу. Наполнители повышают механическую прочность, снижают усадку при прессовании и придают материалу те или иные специфические свойства (фрикционные, антифрикционные и т.д.).

Для повышения пластичности в полуфабрикат добавляют **пластификаторы** (органические вещества с высокой температурой кипения и низкой температурой замерзания, например, олеиновую кислоту, стеарин, дибутилфталат и др.). Пластификатор сообщает пластмассе эластичность, облегчает ее обработку.

Наконец, исходная композиция может содержать **отвердители** (различные амины) или **катализаторы** (перекислые соединения) процесса отверждения термореактивных связующих, **ингибиторы**, предохраняющие полуфабрикаты от их самопроизвольного отверждения, а также **красители** (минеральные пигменты и спиртовые растворы органических красок, служащие для декоративных цепей).

Свойства пластмасс зависят от состава отдельных компонентов, их сочетания и количественного соотношения, что позволяет изменять характеристики пластиков в достаточно широких пределах.

По характеру связующего вещества пластмассы подразделяют на термопластичные (**термопласты**), получаемые на основе термопластичных полимеров, и термореактивные (**реактопласты**) – на основе термореактивных смол.

Термопласты удобны для переработки в изделия, дают незначительную усадку при формовании (1-3%). Материал отличается большой упругостью и малой хрупкостью. В последние годы нашли применение термопласты с наполнителями в виде минеральных и синтетических волокон (органопласты).

Термореактивные полимеры после отверждения и перехода связующего в термостабильное состояние (пространственная структура) хрупки, часто дают большую усадку (до 10-15%) при их переработке, поэтому в их состав вводят усиливающие наполнители.

По виду наполнителя пластмассы делят на следующие группы:

- **порошковые** (пресс-порошки) с наполнителями в виде древесной муки, сульфитной целлюлозы, графита, талька, измельченного стекла, мрамора, асбеста, слюды, пропитанных связующими (часто их называют **карболитами**);

- **волоконистые** с наполнителями в виде очесов хлопка и льна (волокониты), стеклянного волокна (стекловолокониты), асбеста (**асбоволокониты**);
- **слоистые**, содержащие листовые наполнители (листы бумаги в гетинаксе, хлопчатобумажные, стеклянные, асбестовые ткани в текстолите, стеклотекстолите и асботекстолите, древесный шпон в древеснослоистых пластиках);
- **крошкообразные** (наполнитель в виде кусочков ткани или древесного шпона, пропитанных связующим);
- **газонаполненные** (наполнитель – воздух или нейтральные газы). В зависимости от структуры последние подразделяют на **пенопласты** и **поропласты**.

По применению пластмассы можно подразделить на следующие группы:

- **силовые** (конструкционные, фрикционные и антифрикционные, электроизоляционные и др.);
- **несиловые** (оптически прозрачные, химически стойкие, электроизоляционные, теплоизоляционные, декоративные, уплотнительные, вспомогательные и др.).

Однако это деление условно, так как одна и та же пластмасса может обладать разными свойствами.

Пластмассы по комплексу физико-механических и технологических свойств являются наиболее прогрессивными и часто незаменимыми конструкционными материалами для машиностроения.

Преимуществом пластмасс по сравнению с металлами является малая плотность (для большинства пластмасс плотность колеблется от 1 до 2 г/см³, а для газопламенных пенопластов – от 0,015 до 0,8 г/см³), которая сочетается с высокой механической прочностью (для силовых пластиков $\sigma_B = 3 - 100$ кгс/мм² и выше) и хорошими технологическими свойствами (легко формуются, прессуются, их можно склеивать и сваривать, обрабатывать на станках).

Недостатками пластмасс являются невысокая теплостойкость, низкие модуль упругости и ударная вязкость по сравнению с металлами и сплавами, а для некоторых пластмасс существенным недостатком является склонность к старению.

1.9. Резиновые материалы

Резиной называется продукт специальной обработки (**вулканизации**) смеси каучука и серы с различными добавками.

Резина как технический материал отличается от других материалов высокими эластическими свойствами, которые присущи каучуку – главному исходному компоненту резины. Она способна к очень большим деформациям (относительное удлинение достигает 1000%), которые почти полностью обратимы. При комнатной температуре резина находится в высокоэластическом состоянии и ее эластические свойства сохраняются в широком диапазоне температур. Для резиновых материалов характерны высокая стойкость к истиранию, газо- и водонепроницаемость, химическая стойкость, электроизолирующие свойства и небольшая плотность.

В результате перечисленной совокупности эксплуатационных свойств резиновых материалов их применяют для амортизации и демпфирования, уплотнения и герметизации в условиях воздушных и жидкостных сред, химической защиты деталей машин, в производстве тары для хранения масел и горючего, различных трубопроводов (шлангов), покрышек и камер колесного транспорта, самолетов и для многого другого.

1.9.1. Состав резин

Основой всякой резины служит **каучук** натуральный (НК) или синтетический (СК), который и определяет основные свойства резинового материала. Для улучшения физико-механических свойств каучуков вводятся различные добавки (ингредиенты). Таким образом, резина состоит из каучука и ряда ингредиентов:

1. **Вулканизирующие вещества** (агенты) участвуют в образовании пространственно-сеточной структуры **вулканизата**. Обычно в качестве таких веществ применяют серу и селен, для некоторых каучуков перекиси. Для резины электротехнического назначения вместо элементарной серы (которая взаимодействует с медью) применяют органические сернистые соединения – тиурам (тиурамовые резины).

Ускорители процесса вулканизации (полисульфиды, окислы свинца, магния и др.) влияют как на режим вулканизации, так и на физико-механические свойства вулканизатов. Ускорители проявляют свою наибольшую активность в присутствии окислов некоторых металлов (цинка и др.), называемых применительно к компонентам резиновой смеси активаторами.

2. **Противостарители** (антиоксиданты) замедляют процесс старения резины, которое ведет к ухудшению ее эксплуатационных свойств. Существуют противостарители химического и физического действия. Действие первых заключается в том, что они задерживают окисление каучука в результате окисления их самих или за счет разрушения образующихся перекисей каучука (применяются альдолы, неозон Д и др.) Физические противостарители (парафин и воск) образуют поверхностные защитные пленки, они применяются реже.

3. **Мягчители** (пластификаторы) облегчают переработку резиновой смеси, увеличивают эластические свойства каучука, повышают морозостойкость резины. В качестве мягчителей вводят парафин, вазелин, стеариновую кислоту, битумы, дибутилфталат, растительные масла. Количество мягчителей достигает 8-30% от массы каучука.

4. **Наполнители** по действию на каучук подразделяют на активные (усиливающие) и неактивные (инертные). Усиливающие наполнители (углеродистая и белая сажа – кремнекислота, окись цинка и др.) повышают механические свойства резин (прочность, сопротивление истиранию, твердость). Неактивные наполнители (мел, тальк, барит) вводятся для удешевления стоимости резины.

Часто в состав резиновой смеси вводят **регенерат** – продукт переработки старых резиновых изделий и отходов резинового производства. Кроме снижения стоимости регенерат повышает качество резины, снижая ее склонность к старению.

5. **Красители** минеральные или органические вводят для окраски резин. Некоторые красящие вещества (белые, желтые, зеленые) поглощают коротковолновую часть солнечного спектра и этим защищают резину от светового старения.

По своим свойствам каучуки напоминают термопластичные полимеры. Наличие в молекулах каучука неопределенных связей (двойная химическая связь между углеродными атомами в элементарных звеньях макромолекулы) позволяет при определенных условиях переводить его в термостабильное состояние. Для этого по месту двойной связи присоединяется двухвалентная сера (или другое вещество), которое образует в поперечном направлении как бы «мостики» между нитевидными молекулами каучука, в результате чего получается пространственно-сетчатая структура, присущая резине (вулканизату). Процесс химического взаимодействия каучука с серой в технике называется **вулканизацией**.

В зависимости от количества вводимой серы получается различная частота сетки полимера, и резина приобретает различные свойства. При введении 1-5% серы образуется редкая сетка, резина получается высокоэластичной, мягкой. При максимально возможном ($\approx 30\%$) насыщении каучука серой образуется твердый материал, называемый *эбонитом*.

1.9.2. Классификация и применение резин

По назначению резины подразделяют на резины общего назначения и резины специального назначения (специальные).

К группе *резин общего назначения* относятся вулканизаты неполярных каучуков – НК, СКБ, СКС, СКИ.

НК – натуральный каучук является полимером изопрена (C_5H_8)_n. Резины на основе НК отличаются высокой эластичностью, прочностью, водо- и газонепроницаемостью, высокими электроизоляционными свойствами.

СКБ –синтетический каучук бутадиеновый (дивинильный) получают по методу С.В. Лебедева. Формула полибутадиена (C_4H_6)_n. Для повышения прочности в него вводятся усиливающие наполнители (сажа, окись цинка и др.). СКБ имеет морозостойкость $-40...-45^{\circ}C$. Кроме СКБ выпускают каучуки СКБ и СКБМ, отличающиеся повышенной морозостойкостью, а также стереорегулярный каучук СКД, который по основным техническим свойствам приближается к НК.

СКС – синтетический бутадиен стирольный каучук получается при совместной полимеризации бутадиена (C_4H_6) и стирола ($CH_2 = CH - C_6H_5$). Свойства СКС зависят от содержания стирольных звеньев. Чем больше стирола, тем выше прочность, но ниже морозостойкость каучука.

СКИ – синтетический каучук изопреновый является продуктом полимеризации изопрена (C_5H_8) с применением в качестве катализатора лития. По строению, химическим и физико-механическим свойствам СКИ близок к НК.

Резины общего назначения могут работать в среде воды, воздуха, слабых растворов кислот и щелочей. Интервал рабочих температур от -70 до $+130^{\circ}C$.

Из этих резин изготавливают шины, ремни, рукава, транспортные ленты, изоляцию кабелей, различные резинотехнические изделия, работающие в указанных условиях.

Специальные резины подразделяются на несколько видов: маслостойкие, теплостойкие, светоозоностойкие, износостойкие, электротехнические, стойкие к гидравлическим жидкостям и др.

1.10. Неорганические материалы

Основой неорганических материалов являются главным образом окислы и бескислородные соединения металлов. Поскольку большинство неорганических материалов содержит различные соединения кремния с другими элементами, эти материалы объединяют общим названием **силикатные**.

В настоящее время применяют не только соединения кремния, но и чистые окислы алюминия, магния, циркония и др., обладающие более ценными эксплуатационными свойствами, чем обычные силикатные материалы.

Неорганические материалы подразделяют на неорганическое стекло, стеклокристаллические материалы – ситаллы и керамику.

1.10.1. Неорганическое стекло

Неорганическое стекло следует рассматривать как особого вида затвердевший раствор – сложный расплав высокой вязкости кислотных и основных окислов.

Стеклообразное состояние является разновидностью аморфного состояния вещества. При переходе стекла из расплавленного жидкого состояния в твердое аморфное в процессе быстрого охлаждения и нарастания вязкости беспорядочная структура, свойственная жидкому состоянию, как бы «замораживается». В связи с этим неорганические стекла характеризуются неупорядоченностью и неоднородностью внутреннего строения.

В состав неорганических стекол входят стеклообразующие окислы кремния, бора, фосфора, германия, мышьяка, образующие структурную сетку (рис. 37). Помимо названных окислов в неорганических стеклах присутствуют также и модифицирующие окислы натрия, калия, лития, кальция, магния, бария, изменяющие физико-химические свойства стекломассы.

Кроме того, в состав стекла вводят окислы алюминия, железа, свинца, титана, бериллия и др., которые самостоятельно не образуют структурный каркас, но могут частично замещать стеклообразующие окислы и этим сообщать стеклу нужные эксплуатационные характеристики. В связи с этим промышленные стекла являются сложными многокомпонентными системами.

Для промышленных силикатных стекол температура стеклования $t_c = 425 - 600^\circ\text{C}$, температура размягчения составляет $t_p = 600 - 800^\circ\text{C}$. В интервале температур ($t_p - t_c$) стекла находятся в высокоэластическом пластическом состоянии. При температурах $1000 - 1100^\circ\text{C}$ проводятся все технологические процессы переработки стекломассы в изделия.

Свойства стекла, как и всех аморфных тел, изотропны. Плотность колеблется от 2,2 до $6,5 \text{ г/см}^3$ (с окислами свинца и бария до 8 г/см^3).

Механическая прочность и термостойкость стекла могут быть повышены путем закалки и термохимического упрочнения.

Стекла классифицируются по ряду признаков:

- по **стеклообразующему веществу** (силикатные SiO_2 , алюмосиликатные $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$, боросиликатные $\text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$, алюмоборосиликатные $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$, алюмофосфатные $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{P}_2\text{O}_5$ и др.);
- по **содержанию модификаторов** (щелочные Na_2O , K_2O ; бесщелочные и кварцевые);
- по **назначению** подразделяются на **технические** (оптические, светотехнические, электротехнические, химико-лабораторные, приборные, трубные); **строительные** (оконные, витринные, армированные, стеклоблоки) и **бытовые** (стеклотара, посудные, бытовые зеркала и т.п.).

Технические стекла в большинстве своем относятся к алюмосиликатной группе и отличаются разнообразием входящих окислов. Стекла выпускаются промышленностью в виде готовых изделий, заготовок или отдельных деталей.

1.10.2. Стеклокристаллические материалы

Стеклокристаллические материалы (ситаллы) получают на основе неорганических стекол путем их полной или частичной управляемой кристаллизации. По структуре и технологии получения ситаллы занимают промежуточное положение между обычным стеклом и керамикой. От неорганических стекол они отличаются кристаллическим строением, а от керамических материалов более мелкозернистой и однородной микрокристаллической структурой.

Ситаллы получают путем сплавления **стекольной шихты** специального состава с добавкой **нуклеаторов** (катализаторов), охлаждения расплава до пластического состояния и формования из него изделий методами стекольной технологии и последующей **ситаллизации** (кристаллизации). Ситалловые изделия получают также порошковым методом спекания.

Ситаллы подразделяют на фотоситаллы, термоситаллы и шлакоситаллы.

Фотоситаллы получают из стекол литиевой системы с нуклеаторами – коллоидными красителями. Фотохимический процесс протекает при облучении стекла ультрафиолетовыми или рентгеновскими лучами, при этом внешний вид стекла не изменяется. Процесс кристаллизации происходит при повторном нагревании изделия.

Термоситаллы получают из стекол системы $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$, $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ и др. с нуклеаторами в виде TiO_2 , FeS и т.п. Кристаллическая структура термоситалла создается только в результате повторной термообработки предварительно отформованных изделий.

Шлакоситаллы получают на основе доменных шлаков и катализаторов (сульфатов, порошка железа и др.). В состав шихты вводятся соединения фтора для усиления ситаллизации.

В отличие от обычного стекла, свойства которого определяются в основном его химическим составом, для ситаллов решающее значение имеет структура и фазовый состав. Причина ценных свойств ситаллов (твердость порядка 700-1050 HV, высокая химическая устойчивость к кислотам и щелочам, жаростойкость, газонепроницаемость, нулевое водопоглощение) заключается в их исключительной мелкозернистости, почти идеальной поликристаллической структуре и отсутствии пористости.

Из ситаллов изготавливают подшипники, детали для двигателей внутреннего сгорания, трубы для химической промышленности, оболочки вакуумных электронных приборов, детали радиоэлектроники. Ситаллы применяют и в других случаях, когда для

изделия необходимо сочетание твердости, химической стойкости и жаростойкости с низкой плотностью материала (плотность ситаллов $2,4 - 2,95 \text{ г/см}^3$).

1.10.3. Керамические материалы

Керамика – неорганический материал, получаемый из отформованных минеральных масс в процессе высокотемпературного обжига. В результате обжига при температуре $1200-2500^\circ\text{C}$ формируется структура материала (спекание), и изделие приобретает необходимые физико-механические свойства.

Традиционно керамические материалы изготавливаются из глины. Глина в смеси с водой дает пластическую, способную формоваться массу и после обжига приобретает значительную механическую прочность.

Современная техническая керамика включает искусственно синтезированные керамические материалы различного химического и фазового состава, поэтому она обладает специфическими комплексами свойств. Такая керамика содержит минимальное количество или совсем не содержит глины. Основными компонентами технической керамики являются окислы и бескислородные соединения металлов. Любой керамический материал является многофазной системой. В керамике могут присутствовать кристаллическая, стекловидная и газовая фазы.

Кристаллическая фаза представляет собой химические соединения (корунд Al_2O_3 , окислы ZrO_2 , MgO , CaO , BeO , ThO_2 и др.) или твердые растворы. Эта фаза составляет основу керамики и определяет значения механической прочности, термостойкости и других ее основных свойств.

Стекловидная фаза находится в керамике в виде прослоек стекла, связывающих кристаллическую фазу. Обычно керамика содержит от 1 до 40% стеклофазы, которая снижает механическую прочность и тепловые показатели керамического материала. Однако стеклообразующие компоненты (глинистые вещества) облегчают технологию изготовления изделий.

Газовая фаза представляет собой газы, находящиеся в порах керамики; по этой фазе керамику подразделяют на плотную, без открытых пор и пористую. Наличие даже закрытых пор нежелательно, т.к. снижает механическую прочность материала.

Большинство видов специальной технической керамики обладает плотной спекшейся структурой поликристаллического строения, для ее получения применяют специфические технологические приемы.

Техническая керамика применяется в качестве огнеупорного и химически стойкого *футеровочного материала*. **Огнеупорность** – способность материала противостоять высоким температурам, не расплавляясь при определенных условиях испытаний (испытание т.н. конуса Зейгера на размягчение). Огнеупорность некоторых футеровочных материалов представлена в табл. 25.

Таблица 25.

Огнеупорность некоторых видов футеровочных материалов

Название кирпича	Содержание основы	Огнеупорность, °С (дополнительные свойства)
Динасовый	93-95% SiO ₂	1690-1720
Магнезитовый	86-80% MgO	>2000
Магнезитохромитовый	60% MgO 8-13% Cr ₂ O ₃	>2000 (шлакоустойчивость)
Доломитовый	32-36% MgO 50-56% CaO	>2000
Смолодоломитомagneзитовый	50% MgO 38-54% CaO до 4% SiO ₂	>2000 (химическая стойкость)
Шамотный	50-60% SiO ₂ 30-42% Al ₂ O ₃	1580-1730
Высокоглиноземистый	72-95% Al ₂ O ₃	1820-1920

Каменное литье получается путем переплавки при 1350-1550°C базальтов, диабазов и др. горных пород, отличается высокой химической стойкостью и износостойкостью, выпускается в виде футеровочных плит и изделий несложной формы. Его применяют в химической, горно-обогатительной и других отраслях промышленности

1.11. Композиционные материалы

Композиционными называют сложные материалы, в состав которых входят сильно отличающиеся по свойствам нерастворимые или малорастворимые один в другом компоненты, разделенные в материале ярко выраженной границей.

Композиционные материалы (композиты) по удельным показателям свойств (прочности, жесткости, жаропрочности, сопротивлению усталостному разрушению и др.) значительно, в 2-3 раза, превосходят все известные конструкционные сплавы.

Принцип создания композитов заимствован из природы. Примером естественных композитов могут служить стволы и стебли растений, кости живых существ. В дереве волокна целлюлозы соединены пластичным **лигнином**, в костях тонкие прочные нити фосфатных солей – пластичным **коллагеном**.

Свойства композитов в основном зависят от физико-механических свойств компонентов и прочности связи между ними. Отличительной особенностью композитов является то, что в них проявляются достоинства компонентов, а не их недостатки. Вместе с тем композитам присущи свойства, которыми не обладают отдельно взятые компоненты, входящие в их состав.

Композиционные материалы – материалы будущего. В настоящее время они наиболее широко применяются при создании космических аппаратов, самолетов, ракет, глубоководных аппаратов и в других случаях, когда технические устройства эксплуатируются в экстремальных условиях при жестких ограничениях по массе.

Композиты обычно подразделяют на три основные группы (рис. 38):

1. **Волокнистые композиты**, состоящие из волокон одного компонента, распределенных в другом компоненте (матрице) см. рис. 38, а. По виду матрицы бывают **металлические, полимерные, керамические**. По виду волокон: армированные проволокой, различными волокнами (углеродными, борными, стеклянными и др.). Волокна могут иметь различные размеры и ориентировку.

2. **Дисперсные композиты**, состоящие из частиц одного или более компонентов, распределенных в матрице и образующие механическую смесь см. рис. 38, б.

К этому классу композитов относятся **дисперсно-упрочненные композиционные материалы**. Это металлы и сплавы, которые содержат равномерно распределенные частицы окислов или других соединений (нитридов, карбидов, боридов и т.д.), сохраняющих достаточную устойчивость при температурах, близких к температуре плавления матрицы. При механическом нагружении таких материалов матрица несет основную нагрузку, а дисперсные частицы действуют как препятствия, задерживающие движение дислокаций и тем самым упрочняющие материал, затрудняя его деформацию.

Степень дисперсного упрочнения зависит от размера, формы и модуля сдвига частиц, расстояния между ними и характера связи между частицами и матрицей. Оптимальные свойства обычно получают при содержании частиц в пределах 2-15% (объемн.), размере частиц 0,01-0,1 мкм и расстоянии между частицами 0,1-1 мкм. Такие материалы получают в основном методами **порошковой металлургии**, включающими изготовление тонких порошков или порошковых смесей и их последующее прессование, спекание и обработку давлением.

В настоящее время в промышленных масштабах производят дисперсно-упрочненные материалы на основе алюминия (САП – спеченная алюминиевая пудра, $Al+Al_2O_3$), никеля (ВДУ-1, $Ni + ThO_2$, $Ni + HfO_2$), вольфрама (торированный вольфрам, $W + ThO_2$).

3. **Слоистые композиты**, состоящие из двух или более слоев различных компонентов см. рис. 38, в. К данной группе композиционных материалов относятся, например, **биметаллы**, которые состоят из двух или трех слоев различных металлов (рис. 39).

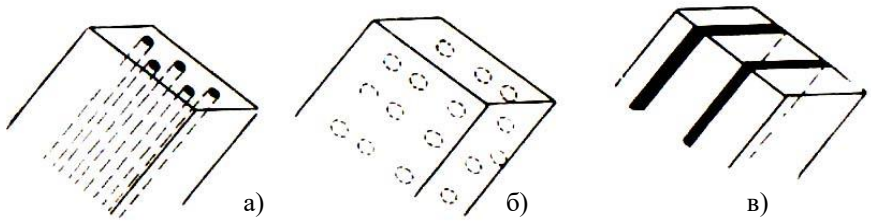


Рис.38. Схемы композиционных материалов: а- волокнистые;
б- дисперсные; в- слоистые

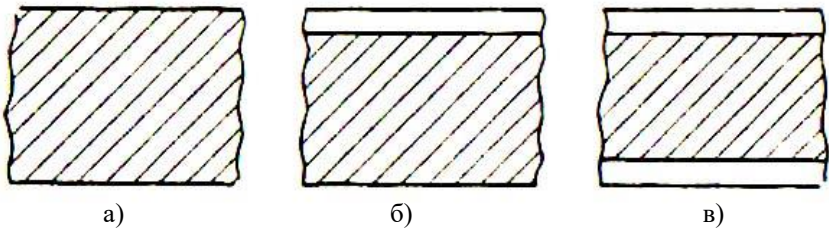


Рис.39 Монометалл (а), двухслойный (б) и
трехслойный (в) биметаллы

Биметаллы получают или заливкой, или сборкой в пакет, а потом совместной пластической деформацией, в процессе которой поверхностные слои *плакирующего* (защищающего) и основного металла привариваются друг к другу.

Широкое применение получили биметаллы из существенно различных материалов. Основой при этом является углеродистая сталь марок Ст3 или 20, а плакирующим слоем – нержавеющая сталь (12Х18Н10Т, 08Х17Н13М2Т, 06Х23Н28М3Д3Т и т.д.) никель, монель-металл (НМЖМц -28-2,5-1.5) это так называемый *коррозионностойкий биметалл* или инструментальная сталь (Х6Ф1) – это *износостойкий биметалл*. Изготавливают также биметаллическую проволоку с медным или алюминиевым покрытием.

При получении биметалла толщина плакирующего слоя составляет 10-20% от общей толщины, но не менее 1,5-2 мм. В процессе получения биметалла возможно образование хрупких фаз или перераспределение элементов, например углерода, между слоями. Во избежание этих явлений применяют промежуточные прослойки.

Применение биметаллов в химическом, сельскохозяйственном машиностроении и других отраслях техники позволяет экономить дорогие материалы при изготовлении широкой номенклатуры деталей.

2. Технология конструкционных материалов

В настоящее время в промышленности используются разнообразные методы формообразования заготовок и деталей машин, наиболее употребительные из них рассматриваются в данном разделе учебного пособия.

2.1. Производство чугуна и стали

Из металлов особое значение имеет железо: в общемировом производстве металлов свыше 90% приходится на железо и его сплавы, называемые *черными металлами*.

Широкое применение черных металлов в различных областях техники объясняется разнообразием их эксплуатационных свойств (прочность, жаропрочность, коррозионная стойкость, износостойкость и др.), а также тем, что железные руды широко распространены в природе, а производство чугуна и стали сравнительно дешево и просто.

2.1.1. Материалы для производства чугуна и стали

Для производства чугуна и стали используют руду, флюсы, топливо и огнеупорные материалы.

Руда – минеральные образования с таким содержанием и такими формами нахождения (крупность, характер соединений и др.) металлов или полезных минералов, которые обеспечивают технологическую возможность и экономическую целесообразность ее извлечения.

Железная руда содержит до 30-50% Fe окислов Fe_2O_3 , Fe_3O_4 и **пустую породу** (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO и др.). Бедные руды ($\text{Fe} < 30\%$) специально обрабатывают – обогащают. Обогащение состоит в удалении из руды части пустой породы. В результате получают **концентрат** – продукт с повышенным содержанием железа по сравнению с рудой. Использование концентрата позволяет улучшить технико-экономические показатели работы металлургических печей.

Флюсы. Флюсом называется материал, загружаемый в плавильную печь для образования легкоплавкого соединения с пустой породой руды, концентрата, золой топлива. Это соединение называют **шлаком**. При производстве чугуна в шлак переводят пустую породу руды, концентрата, топлива-кокса. При производстве стали шлак образуется из флюса, окислов, сульфидов и других соединений Fe, Si, Mn, образующихся при плавке.

Обычно шлак имеет меньшую плотность, чем металл, поэтому он располагается в печи над расплавом металла и может быть удален в процессе плавки. Во многих случаях шлак служит также для защиты расплавленного металла от взаимодействия с печными газами и воздухом.

Шлак называют **кислым**, если в его составе преобладают кислотные окислы (SiO_2 , P_2O_5) и **основным**, если в его составе преобладают основные окислы (CaO , MgO , FeO и т.д.). Кислотность шлака должна соответствовать кислотности футеровки печи.

При плавке в печах с **кислой футеровкой** используют в качестве флюса кварцевый песок, состоящий из SiO_2 , а в печах с **основной футеровкой** – известняк (CaCO_3) или доломитизированный известняк ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$).

Топливо. Основными видами топлива, применяемого в металлургических печах, являются кокс, природный газ, мазут, а также доменный или колошниковый газ. Из перечисленных видов топлива основным является кокс.

Кокс – продукт сухой перегонки каменного угля специальных сортов. Коксование проводится в специальных печах (**коксовых батареях**) при $t = 1000^\circ\text{C}$ без доступа воздуха в течение 14-16 часов, затем кокс выталкивают из печи и тушат водой. В коксе содержится:

80-88% углерода; 8-12% золы; 2-5% влаги; 0,5-1,8% S; 0,02-0,2% P и до 1,2% летучих продуктов. Теплота сгорания кокса составляет обычно $q = 29,3$ МДж/кг.

Огнеупорные материалы. В современных металлургических агрегатах процессы плавки происходят при высоких температурах (до 2500°C). Поэтому внутреннюю облицовку (футеровку) металлургических печей и ковшей для разливки металла делают из огнеупорных материалов, способных выдерживать нагрузки при высоких температурах, противостоять резким изменениям температур, химическому воздействию шлака и печных газов. Огнеупорность футеровочных материалов см. в табл. 25.

Огнеупорные материалы, содержащие большое количество кремнезема SiO_2 , называют кислыми (*динасовые, кварцевглинистые*); содержащие основные окислы (CaO , MgO) – основными (*магнезитовые, магнезитохромитовые, доломитовые*); содержащие большое количество Al_2O_3 и Cr_2O_3 – нейтральными (*хромомагнезитовые, высокоглиноземные, шамотные*).

Огнеупорные материалы применяют в виде кирпичей разных размеров и форм, а также порошков и растворов, необходимых для заполнения швов между кирпичами при кладке печей.

2.1.2. Выплавка чугуна

Чугун выплавляют в металлургических печах шахтного типа – **доменных печах** или **домнах**. Сущность металлургического процесса получения чугуна в доменных печах заключается в восстановлении окислов железа, входящих в состав руды окисью углерода, водородом и твердым углеродом, выделяющимся при сгорании топлива в печи.

Доменная печь (рис. 40) имеет полезную высоту H до 35 м. и полезный объем V до $2000\text{--}5000 \text{ м}^3$.

В верхнюю часть домны через загрузочное устройство подаются **шихтовые материалы**, состоящие из *агломерата* (предварительно спеченная руда и флюс) и кокса. Через фурменные устройства в печь подается воздух, нагретый в воздухонагревателях до $1000\text{--}1200^{\circ}\text{C}$.

Рабочее пространство печи включает *колошник* 6, *шахту* 5, *распар* 4, *запечники* 3, *горн* 1 и *лежачь* 15 (см. рис. 40).

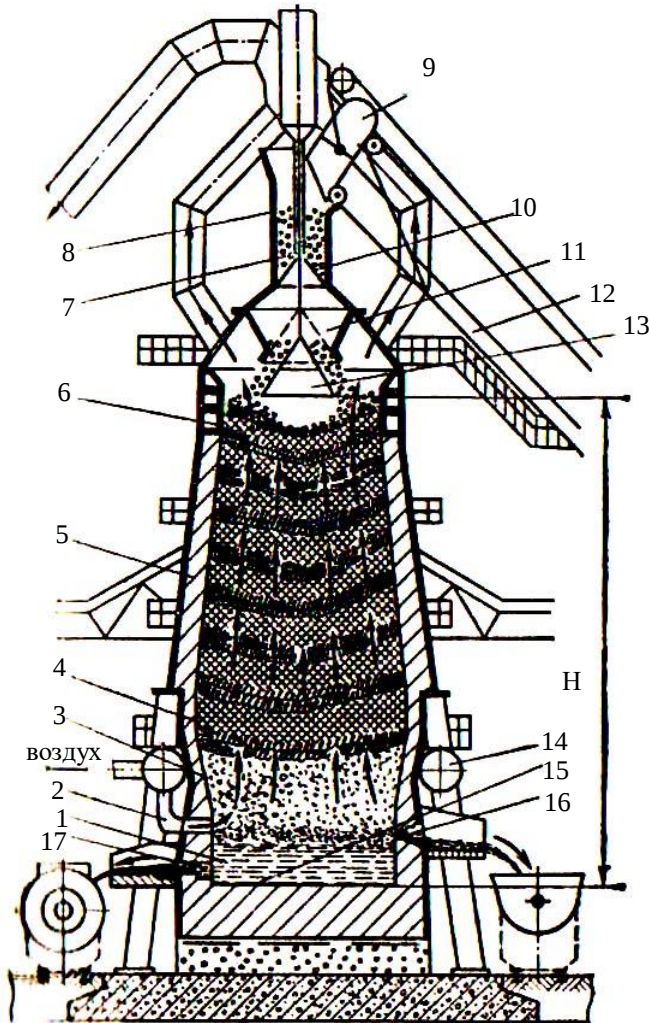
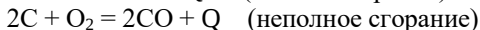


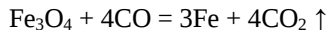
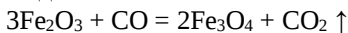
Рис.40. Доменная печь для выплавки чугуна: 1-горн; 2- фурма;
 3- заплечики; 4- распор; 5- шахта; 6- колошник; 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 –
 элементы, обеспечивающие подъем шихты и ее засыпку в печь;
 14- фурменные устройства; 15- лещадь (под, дно); 16- шлаковая летка;
 17- чугунная летка

Шихтовые материалы под собственной тяжестью перемещаются в нижнюю часть печи, расплавленный металл скапливается на лещади печи и периодически (через 3-4 часа) выпускается через **чугунную лещу** 7. Шлак, находящийся над расплавленным чугуном, периодически (через 1-1,5 часа) выпускается через **шлаковую лещу** 16.

Кокс в печи является источником тепла и восстановителем для окислов железа

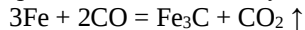


В средней части рабочего пространства печи при температуре $\approx 600^\circ\text{C}$ происходит восстановление железа из окислов.



В реакциях восстановления железа участвуют также сажастый углерод и водород, особенно при введении в доменную печь природного газа.

По мере опускания шихта достигает зоны в печи, где температура составляет $1000-1100^\circ\text{C}$. При этих температурах восстановленное из руды твердое железо, взаимодействуя с окисью углерода, коксом и сажаемым углеродом, интенсивно науглероживается



При насыщении углеродом температура плавления железа понижается до $1150-1200^\circ\text{C}$ и на уровне распара и заплечиков оно расплавляется. Расплавленное железо насыщается углеродом (до 4% и более), а также марганцем, кремнием, фосфором, которые восстанавливаются из руды, а также серой, содержащейся в коксе. В результате этих процессов получается сплав железа с названными металлами, именуемый **чугуном**.

В нижней части печи образуется шлак в результате сплавления окислов пустой породы, руды, флюсов и золы топлива. В условиях доменного процесса окислы Al_2O_3 , CaO , MgO , содержащиеся в пустой породе руды, полностью переходят в шлак. В шлаке содержится также часть невосстановившихся окислов SiO_2 , MnO , FeO и CaS .

Продукты доменной плавки. Основным продуктом доменного процесса является жидкий чугун. Чугун сливают по желобам, проложенным по литейному двору доменного цеха, в **чугуновозные ковши**, установленные на железнодорожных платформах. Емкость чугуновозных ковшей 90-140 т. В них чугун транспортируют в сталеплавильные цехи для передела в сталь. Чугун, не используемый в жидком виде, поступает на **разливочные машины**, из которых он

разливается в открытые сверху формы – *изложницы (мульды)*, где затвердевает в виде *чушек*-слитков массой до 45 кг.

Чугун, получаемый в доменной печи, имеет различный химический состав в зависимости от его назначения.

Передельный чугун (до 80% выплавки) предназначен для передела его в сталь. Он содержит: 4,0-4,4% С; до 0,6-0,8% Si; до 0,25-1,0% Mn; 0,15-0,3% Р и 0,03-0,07% S.

Литейный чугун используют для переплава его на машиностроительных заводах при производстве фасонных отливок. Он содержит повышенное количество кремния (до 2,75-3,25%).

Доменные ферросплавы – сплавы железа с кремнием, марганцем и другими металлами (табл. 26). Их применяют при выплавке чугуна в *вагранке* - шахтной печи, служащей для расплавления и перегрева чугуна в литейном цехе.

Таблица 26.

Состав доменных ферросплавов

Ферросплав		Содержание элементов, %				
Название	Марка	Si	Mn	P	S	C
				не более		
1	2	3	4	5	6	7
Ферросилиций доменный чушковой	Си 15	> 13	3	0,2	0,04	
	Си 10	9-13				
Зеркальный чугун	ЗЧ 1	2,0	20-25	0,22	0,03	
	ЗЧ 2		15-20	0,20		
	ЗЧ 3		10-15	0,18		
Ферромарганец доменный	Mn 5	2,0	> 75	0,35	0,03	6,0
	Mn 6		70-75	0,45		5,5-6,5
Примечание: Fe – остальное						

Побочными продуктами доменной плавки являются *жидкий шлак и колошниковый газ*. Из шлака производят шлаковату, шлакоблоки и цемент, а колошниковый газ после очистки от пыли используют как топливо для нагрева воздуха, вдуваемого в доменную печь.

2.1.3. Выплавка стали

Для передела чугуна в сталь необходимо в сплаве снизить содержание углерода и примесей Si, Mn и особенно P и S. Поэтому сущностью металлургического процесса передела чугуна в сталь является снижение содержания углерода и примесей путем их избирательного окисления и перевода в шлак и газы в процессе выплавки стали.

Однако в полной мере окислить примеси в чугуне не удастся, так как, несмотря на значительно большее сродство к кислороду Si, Mn, P, чем у Fe, по мере снижения содержания примесей в сплаве в соответствии с законом действующих масс начинает растворяться железо. Окислы железа (FeO) растворяются в металле, насыщая его кислородом.

Сталь, содержащая кислород, непригодна для обработки давлением –ковки, прокатки, так как в ней образуются трещины при деформации в нагретом состоянии.

Для уменьшения содержания кислорода в стали в процессе плавки ее **раскисляют**, т.е. вводят в нее элементы – **раскислители**. Раскислители, обладая большим сродством к кислороду, чем у железа, взаимодействуют с FeO, образуя нерастворимые окислы, частично всплывающие в шлак. В качестве раскислителей используют **электротермические ферросплавы (ферросилиций, табл. 27, силикокальций, табл. 28)**, а также высокопроцентный **ферромарганец** (см. табл. 26) и алюминий.

Чугун переделывают в сталь в различных по принципу действия металлургических агрегатах. Основными из них являются **кислородные конвертеры, мартеновские печи и дуговые электропечи**.

В электрических печах выплавляют в основном высококачественные легированные стали. Мартеновский способ выплавки стали постепенно вытесняется более производительным способом выплавки в кислородном конвертере.

Таблица 27.

Состав ферросилиция, %							
Марка	Si	C	S	P	Al	Mn	Cr
		не более					
1	2	3	4	5	6	7	8
ФС 90	< 89	-	0,02	0,03	3,0	0,2	0,2
ФС 75ч	74-80	0,1	0,02	0,03	1,3	0,3	0,2
ФС 75	74-80	-	0,03	0,05	2,5	0,4	0,4

1	2	3	4	5	6	7	8
ФС 65	63-68	-	0,03	0,05	2,0	0,4	0,4
ФС 45	41-47	-	0,03	0,05	2,0	0,6	0,5
ФС 25	22-29	0,6	0,03	0,06	1,0	0,9	-
ФС 18	17-22	1,3	0,4	0,10	1,0	1,0	-
Примечание: Fe – остальное							

Таблица 28.

Состав силикокальция, %

Марка	Ca	Fe	Al	Углерод класса		P
				А	Б	
Ск 10	10-15	< 25	1,0	0,2	0,5	0,02
Ск 15	15-20	< 20				
Ск 25	25-30	до 10	2,0	0,5	1,5	0,4
Ск 30	> 30	до 6				
Примечание: Si - остальное						

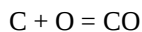
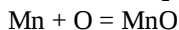
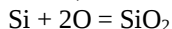
Кислородный конвертер (рис. 41) представляет собой стальной сосуд грушевидной формы, футерованный изнутри основным кирпичом емкостью 130-350 тонн жидкого чугуна.

Шихтовыми материалами для кислородно-конвертерного процесса являются: жидкий передельный чугун, стальной лом (*скрап*), флюс (известь, боксит, железная руда, плавленый шпат).

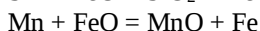
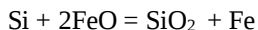
Чугун для переработки в кислородных конвертерах должен содержать: 3,7-4,4% C; 0,7-1,1% Mn; 0,4-0,8% Si; 0,03-0,08% S; 0,15-0,3% P.

Последовательность технологического процесса выплавки стали в кислородном конвертере показана на рис. 42.

Окислительный период получения стали. Струи кислорода, поступающие под давлением из фурмы, проникают в металл, вызывают его циркуляцию в конвертере и перемешивание со шлаком. Температура металла при взаимодействии с кислородом в зоне под фурмой достигает 2400°C. Составляющие чугуна окисляются газообразным кислородом



Часть примесей окисляется на границе металл-шлак окислами железа, содержащимися в шлаке



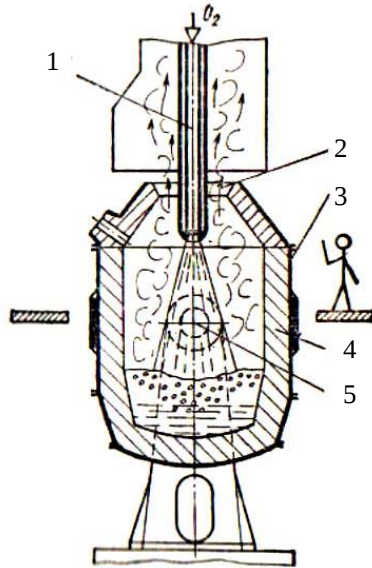


Рис.41. Схема устройства кислородного конвертера: 1- охлаждаемая фурма для кислородного дутья; 2- горловина; 3- стальной корпус; 4- футеровка; 5- поворотная цапфа

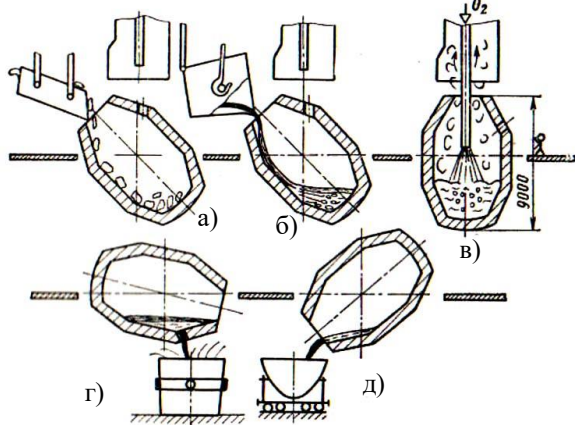
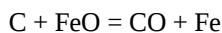
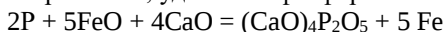


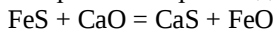
Рис.42. Последовательность технологических операций при выплавке стали в кислородном конвертере: а- загрузка скрапа и флюса; б- заливка жидкого чугуна; в- продувка кислородом; г- выпуск стали в ковш; д- слив шлака в шлаковую чашу



В кислородном конвертере, благодаря присутствию шлаков с большим содержанием CaO и FeO, интенсивному перемешиванию металла и шлака из расплава, удаляется фосфор



Удаление серы из расплава происходит по реакции



Подачу кислорода заканчивают при достижении заданного содержания углерода в стали, которое автоматически контролируется по ходу плавки. После этого фурму поднимают, конвертер поворачивают и производят выпуск стали в ковш (рис. 42).

При выпуске стали из конвертера в ковш ее раскисляют вначале ферромарганцем, затем ферросилицием и алюминием.

В кислородных конвертерах помимо углеродистых выплавляют также низколегированные стали, содержащие до 2-3% легирующих элементов. Легирующие элементы вводят в ковш, предварительно расплавив их в электропечи. Или легирующие ферросплавы вводят в ковш перед выпуском в него стали. Плавка в конвертерах емкостью 130-300 т заканчивается через 25-50 минут.

2.2. Получение заготовок литьем

При дальнейшей переработке расплавленного металла из него получают или слитки или отливки.

Слиток – металл, затвердевший при кристаллизации в чугуновой форме – *изложнице*. Слитки служат полуфабрикатом для дальнейшей переработки давлением в прокатные профили или поковки. Слитки получают из *деформируемых сплавов* в прокатных цехах металлургических предприятий.

Отливка – металл, затвердевший при кристаллизации в *литейной форме*, полость которой имеет конфигурацию, близкую очертаниям готового изделия. В дальнейшем отливки обрабатываются в основном резанием. Отливки получают из *литейных сплавов* в литейных цехах металлургических или машиностроительных заводов.

2.2.1. Получение стальных слитков

Выплавленную сталь выпускают из плавильной печи в разливочный ковш, из которого ее разливают в изложницы или кристаллизаторы установок для непрерывной разливки стали.

В зависимости от сорта заливаемой стали и назначения слитка конфигурация сечения изложниц бывает различной (рис. 43). Слитки квадратного сечения используют для получения *блумов*, которые в дальнейшем перерабатываются в сортовой прокат (двутавровые балки,

швеллеры, уголки и т.д.). Слитки прямоугольного сечения используют для получения **слябов**, которые затем перерабатываются в листовой прокат. Из слитков крупного сечения изготавливают трубы, а многогранные слитки используют для получения поковок.

Для прокатки отливают слитки массой 0,2-25 тонн, для поковок – массой до 250 тонн.

После кристаллизации слиток имеет неоднородное строение (рис. 44). Относительное распределение в объеме слитка зоны столбчатых и равноосных кристаллов определяет свойства проката. В верхней части слитка, где металл затвердевает в последнюю очередь, находится **усадочная раковина**. В этой части слитка металл является рыхлым, пронизан газовыми пузырями, здесь концентрируются примеси.

Для уменьшения глубины усадочной раковины изложницы для разливки спокойной стали имеют **прибыльные надставки**, футерованные изнутри огнеупором. Благодаря этому усадочная раковина спокойной стали вся локализована в прибыльной части слитка. В кипящей стали усадочная раковина незначительная, и пустоты распределены по объему слитка (рис. 45).

Прибыльная часть слитка спокойной стали удаляется, поэтому спокойная сталь имеет более высокие механические свойства. Большая часть пустот в слитках кипящей стали завариваются при прокатке.

2.2.2. Получение отливок

В машинах и промышленном оборудовании $\approx 50\%$ всех деталей изготавливается литьем. Литьем можно получать изделия сложной формы (корпуса, станины и др.), когда другие методы изготовления неприменимы. Стоимость литой детали обычно ниже, чем стоимость аналогичной детали, изготовленной другими способами.

Отливка получается в результате заполнения полости **литейной формы** расплавленным жидким металлом. После заливки жидкий металл охлаждается в форме и затвердевает, образуя **отливку**.

В настоящее время до 75% отливок получают в **песчаных формах**; порядка 20% - в металлических формах (**кокилях**) и 5% - другими способами литья (**под давлением, центробежное, по выплавляемым моделям** и др.)

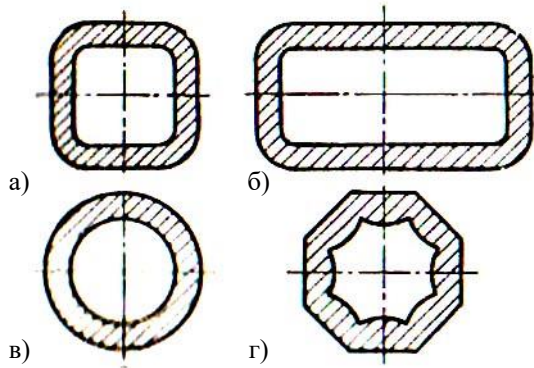


Рис.43. Поперечные сечения изложниц для разливки стали:
а- квадратное; б-прямоугольное; в- круглое; г- многогранное

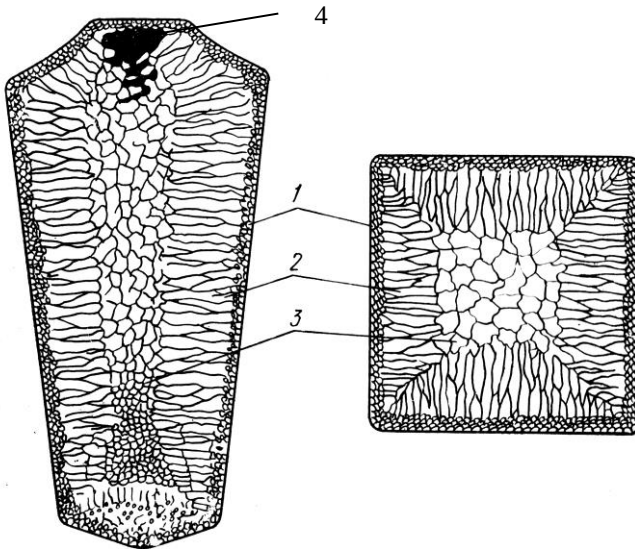


Рис.44. Схема строения стального слитка: 1- мелкозернистая корка;
2- зона столчатых кристаллов; 3- зона равноосных кристаллов;
4 – усадочная раковина

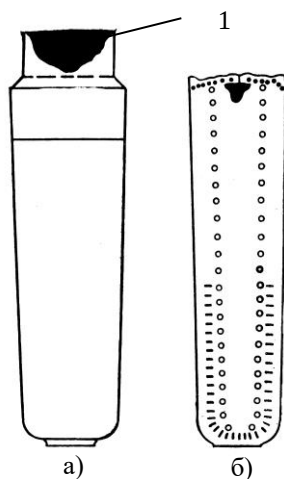


Рис.45. Распределение усадочной раковины и пустот в спокойной (а) и кипящей (б) сталях: 1- прибыльная часть слитка

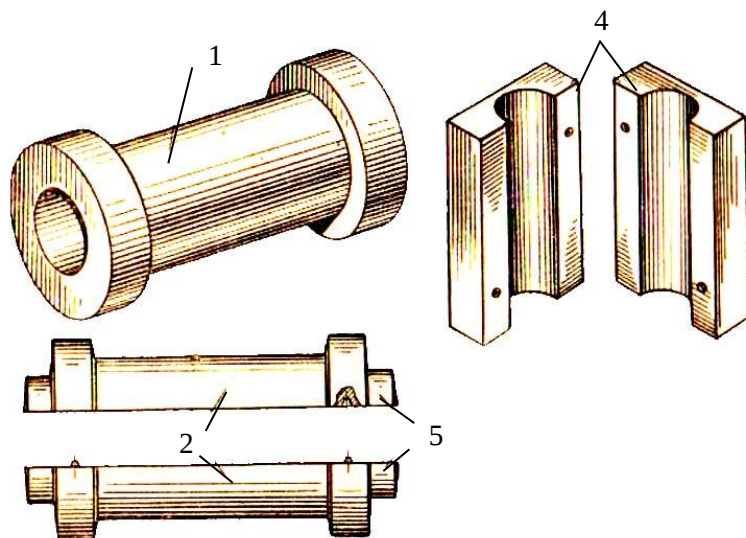


Рис.46.1.Последовательность технологического процесса изготовления отливки

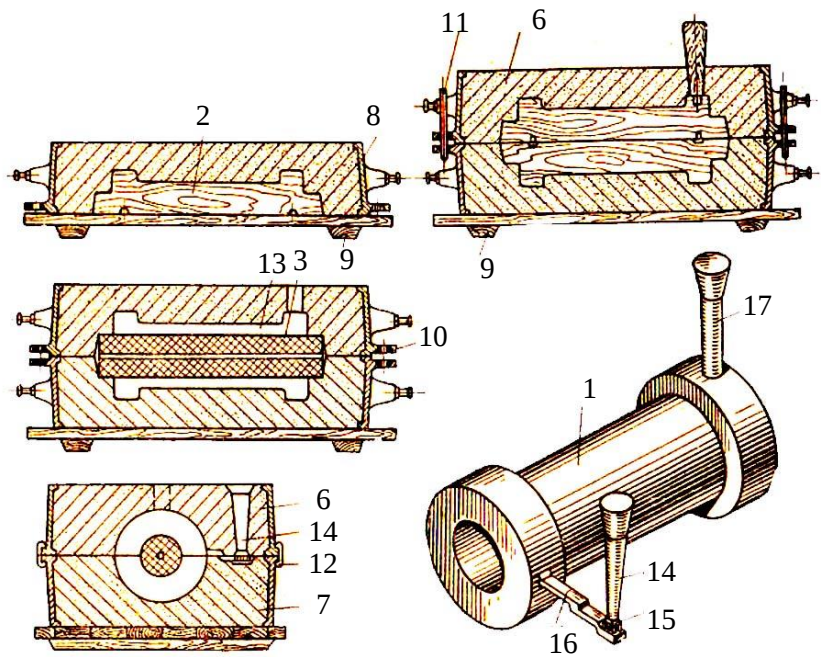


Рис.46.2. Последовательность технологического процесса изготовления отливки чугунной втулки:

1- втулка; 2- модель со знаками; 3- стержень;
4- стержневой ящик

Литейный цех машиностроительного завода имеет следующие участки: модельный, формовочный, плавильный и очистной.

Последовательность технологического процесса изготовления отливки чугуновой втулки представлена на рис. 46. Сначала на *подоночном щитке* 9 в *опоке* 8 формуют нижнюю половину *модели* 2 (рис. 46а). Затем опоку с нижней полумodelью переворачивают на 180°, устанавливают вторую половину модели литниковой системы 14-17, засыпают *формовочную смесь* в верхнюю опоку и уплотняют ее (рис. 46 б). При изготовлении литейной формы применяется разнообразный *формовочный инструмент* (рис. 47).

После этого снимают верхнюю опоку, извлекают половины модели, устанавливают *стержень* 3 и соединяют полумформы 6,7 (рис. 46 в, г). Опоки соединяют скобами 12. Для точной сборки формы опоки 8 имеют специальные втулки 10, в которые входят центрирующие штыри 11.

При заливке жидкий металл поступает в полость 13 формы по литниковым каналам. *Литниковая система* состоит из *стояка* 14 (вертикальный канал конической формы), *шлакоуловителя* 15 и *питателя* 16 (горизонтальные каналы трапециевидальной формы). К литниковой системе относится также *выпор* 17 (рис. 46 д), который служит для выхода из формы воздуха и газов.

По мере остывания объем металла, залитого в форму, уменьшается. Функции выпоров при больших размерах их поперечного сечения - дополнять форму жидким металлом в процессе остывания и затвердевания металла отливки. В этом случае устраняется опасность появления в отливке *усадочных раковин*, что особенно важно при литье сплавов, имеющих большую усадку, таких как сталь, бронза и другие сплавы. В этих случаях вместо выпоров устраивают *прибыли* – особые придатки с большими размерами сечения, где сплав затвердевает в последнюю очередь.

Размеры элементов литниковой системы зависят от размеров формы, рода заливаемого металла и других факторов. Поэтому размеры элементов литниковой системы рассчитывают при проектировании отливки.

После затвердевания и охлаждения металла форму разрушают и выбивают отливку, удаляют из нее стержень. Чугунные отливки выбивают при температуре 400-600°C, стальные – 600-800°C. Ответственные отливки с затрудненной усадкой выбивают при температуре 200°C.

От отливки механическим или иным способом отделяют элементы литниковой системы, места отломов, отпилов и неровности по-

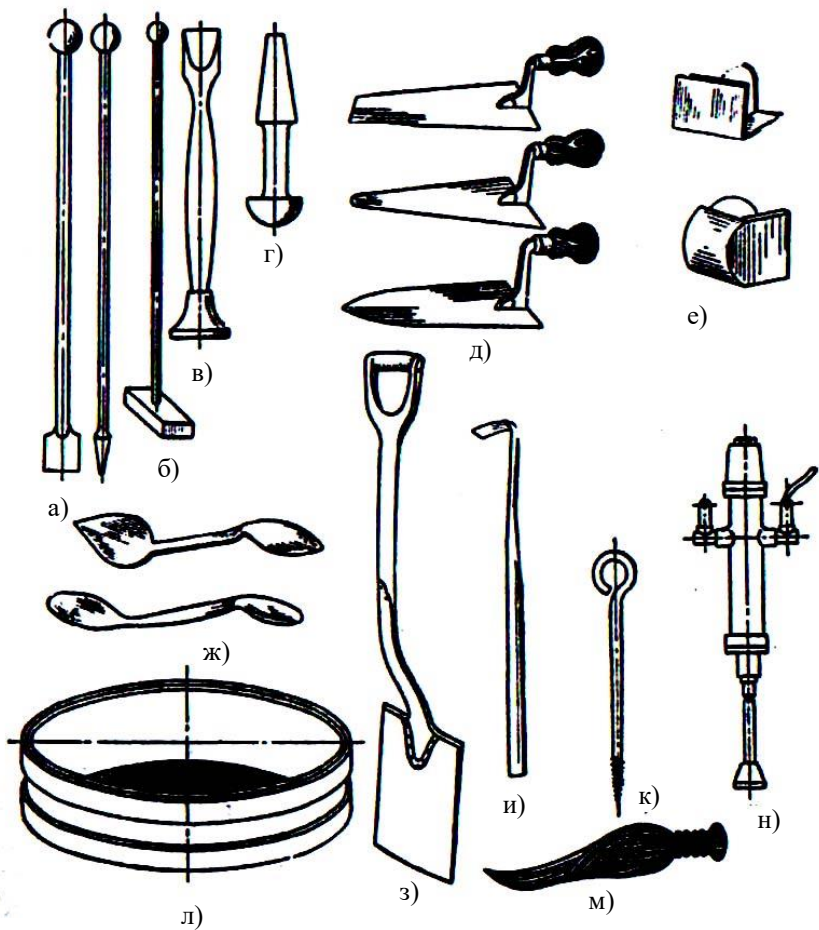


Рис.47. Формовочные инструменты: а – г- ручные трамбовки;
 д – плоские гладилки; е- фасонные гладилки; ж – ланцеты-ложки;
 з – лопата; и – крючок; к- подъем; л- сито; м- кисть;
 н- пневматическая трамбовка

верхности зачищают. Литники и бракованные отливки поступают на переплавку. Годные отливки поступают на склад или в механический цех для дальнейшей обработки.

2.3. Обработка металлов давлением

Обработка металлов давлением (ОМД) основана на способности металлов изменять без разрушения форму (пластически деформироваться) под действием сил давления или удара и сохранять измененную форму после устранения деформирующего воздействия.

2.3.1. Деформационная способность металла

При ОМД металл деформируется без разрушения до достижения им **предельной $\epsilon_{\text{пред}}$ деформации**

$$\epsilon_{\text{деф}} < \epsilon_{\text{пред}} \quad (20)$$

Величина $\epsilon_{\text{пред}}$ зависит от пластичности металла ($\psi \uparrow$), температуры ($t_{\text{деф}} \uparrow$), скорости ($\epsilon_{\text{деф}} \downarrow$) деформации и напряженного состояния металла при обработке давлением ($\alpha \uparrow$).

$$\epsilon_{\text{пред}} = f(\psi, t_{\text{деф}}, \epsilon, \alpha) \quad (21)$$

Напряженное состояние металла при обработке давлением характеризуется соотношением касательных τ_{max} и нормальных σ_{max} напряжений, возникающих в материале при деформирующем воздействии.

Для количественной оценки «мягкости» схемы напряженного состояния Я.Б. Фридман предложил использовать специальный **коэффициент мягкости напряженного состояния**

$$\alpha = \frac{\tau_{\text{max}}}{\sigma_{\text{max}}} \quad (22)$$

Смысл отношения $\tau_{\text{max}}/\sigma_{\text{max}}$ как характеристики «мягкости» схемы напряженного состояния сводится к следующему. Величина τ_{max} определяет легкость начала пластической деформации, а σ_{max} - наступление хрупкого разрушения.

Из теории пластической деформации известно

$$\begin{aligned} \tau_{\text{max}} &= 0,5 (\sigma_1 - \sigma_3) \\ \sigma_{\text{max}} &= \sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3), \end{aligned} \quad (23)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - главные напряжения; ν - коэффициент Пуассона.

Для большинства металлов коэффициент Пуассона можно принять $\nu \approx 0,25$, тогда

$$\alpha = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2\sigma_1 - 0,5(\sigma_2 + \sigma_3)} \quad (24)$$

Таким образом деформационная способность металла при обработке давлением характеризуется соотношением главных напряжений, реализуемых в металле при ОМД. Значения коэффициента α для некоторых видов ОМД представлены в табл. 29.

Таблица 29.

Коэффициент мягкости напряженного
состояния α для некоторых видов ОМД

Вид ОМД	Главные нормальные напряжения			Величина α^*
	наибольшее σ_1	среднее σ_2	наименьшее σ_3	
Прокатка	> 0	> 0	$= 0$	0,67
Волочение	> 0	> 0	$= 0$	0,67
Листовая штамповка	> 0	> 0	$= 0$	0,67
Ковка	$= 0$	$= 0$	< 0	2
Объемная штамповка	$= 0$	$= 0$	< 0	2
Прессование	< 0	< 0	< 0	4
Примечание: Значение α ориентировочное.				

По температуре $t_{\text{деф}}$, при которой происходит обработка давлением, различают холодную и горячую деформацию. Границей между ними является температурный порог рекристаллизации $t_{\text{пр}}$, определяемый по формуле А.А. Бочвара (см. 1.3.)

Холодная деформация сопровождается упрочнением или наклепом металла: $\sigma_B \uparrow$, $HV \uparrow$, $\psi \downarrow$.

Для снятия наклепа металла применяется специальная термическая обработка, именуемая **рекристаллизационным отжигом** (см. 1.6)

$$t_{\text{отж}} > t_{\text{пр}} \quad (25)$$

При горячей обработке должно соблюдаться условие, чтобы скорость деформации $V_{\text{деф}}$ была меньше скорости рекристаллизационных процессов в металле $V_{\text{рекп}}$

$$V_{\text{деф}} < V_{\text{рекп}} \quad (26)$$

При соблюдении условия (26) после ОМД структура металла будет равноосная без следов упрочнения.

Горячую обработку металла применяют для получения крупных заготовок, что позволяет обойтись менее мощным оборудованием (деформирующее усилие при горячей обработке составляет 10% от

усилия при холодной обработке), а также при обработке слитков для измельчения структуры и улучшения механических свойств металла.

Холодная обработка металла является предпочтительной по ряду преимуществ:

- высокая точность размеров и чистота поверхности заготовок (нет окалины);
- возможность достижения наилучших эксплуатационных свойств деталей (получение нагартованного металла);
- возможность получения волокнистой структуры металла для обеспечения максимальной нагрузочной способности детали.

2.3.2. Нагрев металла и нагревательные устройства

Температурный интервал при ОМД (интервал ковочных температур) является технологическим свойством сплава. Для сталей интервал температур ОМД составляет $t_{\text{ОМД}} = 1200-800^{\circ}\text{C}$; для алюминиевых сплавов $t_{\text{ОМД}} = 470-350^{\circ}\text{C}$; для бронз $t_{\text{ОМД}} = 900-750^{\circ}\text{C}$.

При нагреве поверхность металла окисляется. Происходит *угар металла*, составляющий $\approx 3\%$ от массы нагреваемого металла и $\approx 1,5\%$ при каждом подогреве до ковочных температур.

На машиностроительных заводах для уменьшения окисления заготовки нагревают до температуры начала ОМД в *контролируемых атмосферах*: нейтральная (N_2) или восстановительная (CO).

Нагревательные устройства для горячей ОМД подразделяются на электронагревательные устройства и нагревательные печи. В печах теплота к заготовке поступает из окружающего ее рабочего пространства нагретой печи, в электронагревательных устройствах теплота выделяется в самой заготовке.

Печи, в свою очередь, разделяют на *пламенные*, в которых теплота получается за счет сжигания жидкого (мазут) или газообразного топлива, и *электрические*, в которых источником нагрева рабочего пространства печи является электрическая энергия. В печах передача теплоты металлу заготовок происходит *конвекцией и излучением*.

По характеру распределения температур в рабочем пространстве печи могут быть разделены на две группы (рис. 48): печи с одинаковой температурой по всему рабочему пространству (*камерные*) и печи, у которых температура в рабочем пространстве повышается в направлении от места загрузки заготовок к месту их выдачи (*методические печи*).

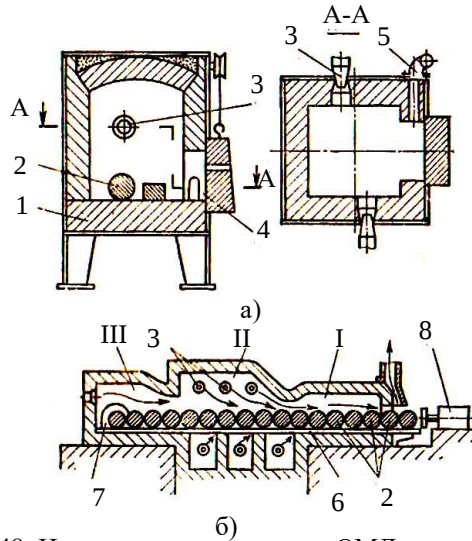


Рис.48. Нагревательные печи для ОМД: а- камерная;
б-методическая (I – подогревательная зона $t = 600-800^{\circ}\text{C}$, II – зона
максимального нагрева $t = 1250 - 1350^{\circ}\text{C}$; III – зона выравнивания
температуры)

На рисунке: 1- под; 2- заготовки; 3- горелки; 4- загрузочное окно;
5- дымоход; 7- окно выгрузки; 8- толкатель

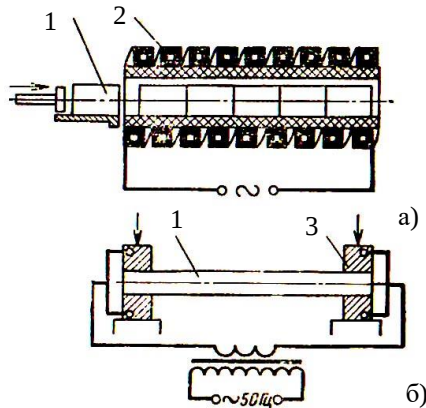


Рис.49. Схемы электронагревательных устройств для ОМД:
а- индукционные; б- контактные. На рисунке 1- заготовка; 2-
многовитковый соленоид (индуктор); 3- медные контакты

Камерные печи широко распространены главным образом в
мелкосерийном производстве ввиду наибольшей среди нагревательных

устройств для ОМД универсальности и для нагрева очень крупных заготовок.

В электрических печах в стенах монтируются металлические (см. 1.7.) или карборундовые (силитовые) элементы сопротивления, подключающиеся к силовой электрической сети.

Электронагревательные устройства разделяют на индукционные и контактные (рис. 49). **В индукционных электронагревательных устройствах** теплота в нагреваемом металле выделяется в основном вследствие действия вихревых токов (токов Фуко). **В контактных нагревательных устройствах** теплота в металле заготовки выделяется при прохождении через нее электрического тока. Электронагревательные устройства для заготовок при ОМД применяются лишь в условиях крупносерийного производства заготовок давлением.

2.3.3. Прокатка

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

Прокатке подвергаются $\approx 90\%$ всей выплавляемой стали и значительная часть сплавов цветных металлов. В зависимости от формы и расположения валков и заготовок по отношению к ним различают следующие основные виды прокатки: продольная, поперечная и поперечно-винтовая (рис. 50).

При **продольной прокатке** заготовка 1 деформируется между двумя валками 2, вращающимися в разные стороны, и перемещается в направлении, перпендикулярном осям валков.

При **поперечной прокатке** валки 2 вращаются в одном направлении, а заготовка 1, имеющая форму тела вращения, перемещается параллельно осям валков 2 и обжимается по образующей.

При **поперечно-винтовой** прокатке валки 2, расположенные под углом друг к другу, вращаются в одну сторону и при обжатии заготовки сообщают ей вращательное и поступательное движение.

Заготовка втягивается между валками силами трения T , нормальная сила N обжимает заготовку, уменьшая площадь сечения и увеличивая длину.

Количественной характеристикой деформации металла при прокатке является **вытяжка μ**

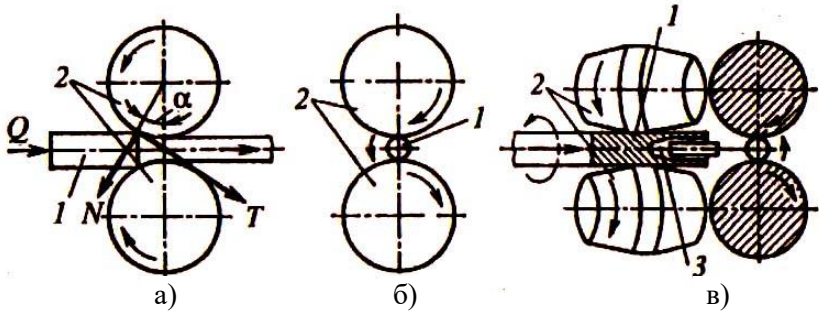


Рис.50. Схема основных видов прокатки: а – продольная; б – поперечная; в – поперечно-винтовая.

1 – заготовка; 2 – валки; 3 – оправка

T – сила трения; N – нормальная сила; α – угол захвата

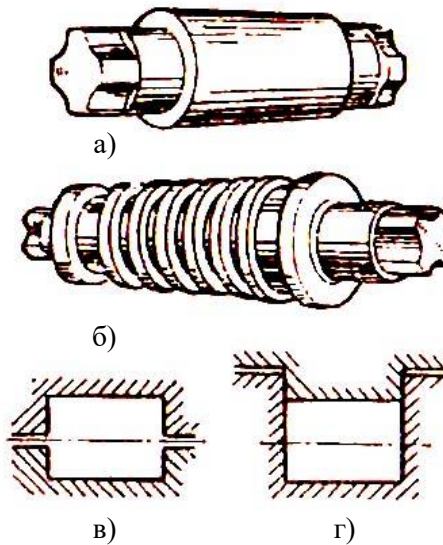


Рис.51. Прокатные валки и калибры: а – валок гладкий; б- валок ручьевой; в – калибр открытый; г – калибр закрытый

$$\mu = \frac{F_o}{F_k}, \quad (27)$$

где F_o , F_k - сечение заготовки до и после обжатия, соответственно.

За один проход при прокатке допустимая вытяжка составляет $[\mu] = 1,1 - 1,6$

Для соблюдения условий захвата и перемещения заготовки в направлении прокатки необходимо, чтобы

$$N \cdot \sin \alpha < T \cos \alpha \quad \text{или}$$

$$N \cdot \sin \alpha < N \cdot f \cdot \cos \alpha,$$

где f – коэффициент трения между поверхностями вала и заготовки

$$\alpha < \operatorname{arctg} f. \quad (28)$$

При горячей прокатке стали гладкими вальками $\alpha = 15-24^0$, при холодной - $\alpha = 5-8^0$.

Инструментом прокатки являются валки, которые могут быть **гладкими** (рис. 51,а) для проката листов, полос и т.д. либо с фигурными вырезами – **ручьями** (рис. 51,б). Совокупность соответствующих вырезов в верхнем и нижнем вальках образует **калибр**. Пара валков обычно имеет несколько калибров. Калибры могут быть открытыми или закрытыми (рис. 51, в, г).

Валки вращаются в опорах, которые у одного из валков могут перемещаться специальным механизмом. Вследствие этого изменяется расстояние между осями деформирующей пары валков и соответственно изменяется абсолютная величина обжатия.

Комплект прокатных валков со станиной называется **рабочей клетью**. Совокупность привода, одной или нескольких рабочих клетей образует **прокатный стан**.

Прокатные станы подразделяют по числу и расположению валков в клетях на **дуо** (двухвалковые), **трио** (трехвалковые), **кварто** (четырёхвалковые), **многовалковые** и **универсальные** (рис. 52).

Форму поперечного сечения продукции, получаемой при прокатке, называют **профилем**. Совокупность форм и размеров профилей, получаемых прокаткой, называют **сортаментом**. Сортамент проката подразделяется на группы: **сортовой прокат**, **листовой**, **трубы** и **профили специального назначения**.

В свою очередь, сортовой прокат по форме сечения разделяют на простой (круг, квадрат, шестигранник и др.), фасонный (уголок, тавр,

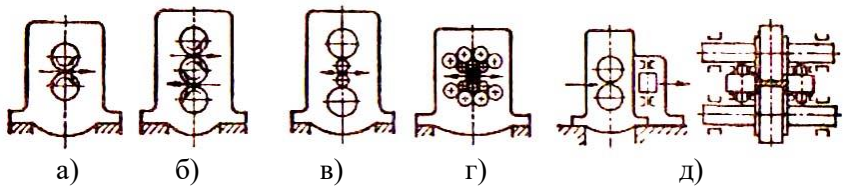


Рис.52. Схемы рабочих клеток прокатных станов: а – дуо; б – трио;
в – кварто; г – многовалковая; д – универсальные

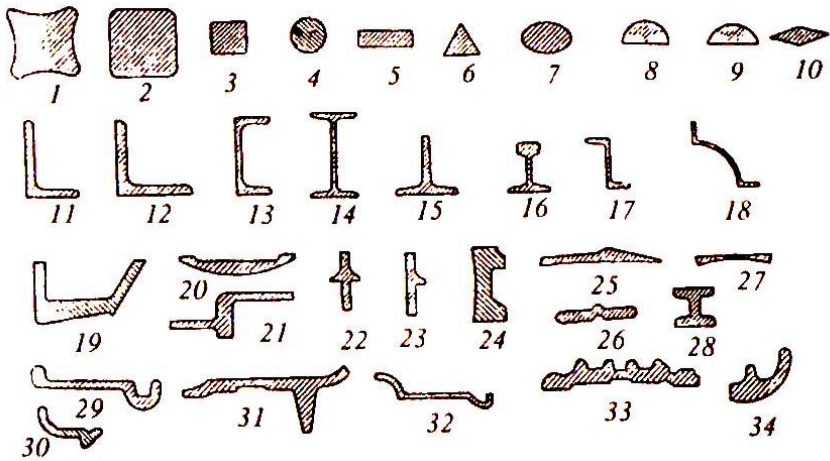


Рис.53. Профили сортового проката: 1-10 – простые;
11-17 – фасонные; 18-34 – сложные специальные

двутавр и др.), а также сложные специальные (рис. 53). Цветные металлы прокатывают обычно на простые профили.

Листовой прокат условно подразделяется на толстолистовой (от 4 мм и более) и тонколистовой (менее 4 мм). Листовую сталь подразделяют на автотракторную, трансформаторную, кровельное железо, жести, листовую сталь со специальными покрытиями, биметаллический лист и т.д. Листовой прокат толщиной менее 0,2 мм называется **фольгой**.

Толстолистовую сталь получают только горячекатаной. Тонколистовую – прокатывают в горячем (толщина более 1,25 мм) и холодном состоянии. Современная технология позволяет получать непрерывной холодной прокаткой листы толщиной менее 0,1 мм с суммарным обжатием до 80-90% без промежуточной термообработки.

Трубы. Подразделяют на **бесшовные и сварные**. Бесшовные трубы прокатывают диаметром 30-650 мм с толщиной стенки 2-160 мм, сварные – диаметром 5-2500 мм. Трубы изготавливают из углеродистых, легированных сталей и цветных сплавов.

В качестве заготовки для производства бесшовных труб применяют круглые или граненые слитки, а также круглые катаные прутки большого диаметра. Основной операцией является **прошивка** заготовки, т.е. получение в заготовке сквозного отверстия. Перед прошивкой заготовку нагревают в методической печи до соответствующей температуры и направляют на **прошивочный стан** с двумя бочкообразными валками (см. рис. 50 в).

Стальные сварные трубы получают из полосовой заготовки (**штрипс**). Сварной шов бывает продольный (параллельный образующей трубы) и спиральный.

По отношению наружного диаметра d трубы к толщине S стенки различают трубы: особотонкостенные $d/S > 40$; тонкостенные $d/S = 12,5 - 40$; толстостенные $d/S = 6 - 12,5$; особотолстостенные $d/S < 6$.

2.3.4 Ковка

Ковка - вид горячей обработки металлов давлением, при котором металл деформируется с помощью универсального инструмента – **бойков**. Ковка является наиболее распространенным видом ОМД в единичном и мелкосерийном производстве, а также при ремонте оборудования.

При ковке нагретую до ковочной температуры заготовку укладывают на нижний боек и последовательно деформируют на отдельных участках верхним бойком. В результате заготовка – **поковка** приобретает форму, приближающуюся к форме готовой

детали. Одновременно с этим при ковке улучшаются механические свойства литого металла исходной заготовки.

Ковка бывает *машинная и ручная*. Ручная ковка применяется для получения мелких поковок при единичном производстве и при ремонтных работах.

Машинную ковку производят на *ковочных молотах и ковочных гидравлических прессах*.

Молоты – машины динамического, ударного действия. Продолжительность деформации на них составляет доли секунды. Металл деформируется за счет энергии, накопленной подвижными (падающими) частями молота к моменту их соударения с заготовкой (рис. 54).

В ковочных молотах не вся энергия, накопленная *падающими частями* (2, 3, 5 на рис. 54), расходуется на деформирование заготовки. Коэффициент полезного действия (использование энергии падающих частей) молота зависит от соотношения массы шабота 8 и массы падающих частей молота. Практически масса шабота бывает в 15 раз больше массы падающих частей, что обеспечивает к.п.д. удара $\eta_{уд} = 0,8 - 0,9$.

Ковочные паровоздушные молоты строят с массой падающих частей 1000 – 8000 кгс. На этих молотах изготавливают поковки средней массы (20 – 350 кг) преимущественно из прокатанных заготовок.

Гидравлические прессы являются машинами статического действия, продолжительность деформации у них составляет от единиц до десятков секунд. В гидравлическом прессе деформирующее усилие создается с помощью жидкости (водной эмульсии или минерального масла) высокого давления (20-30 МПа), подаваемой в рабочий цилиндр прессы.

Ковочные гидравлические прессы строят усилием 5-100 МН (500 – 10000 тс) для получения крупных поковок в основном из слитков и нержавеющей стали.

Производственный процесс, содержащий целенаправленные действия по изменению состояния предмета производства называется *технологическим процессом*.

Технологические процессы - термическая обработка, получение чугуна, получение стали, получение отливок, прокатных профилей, поковок, сварных изделий и др.

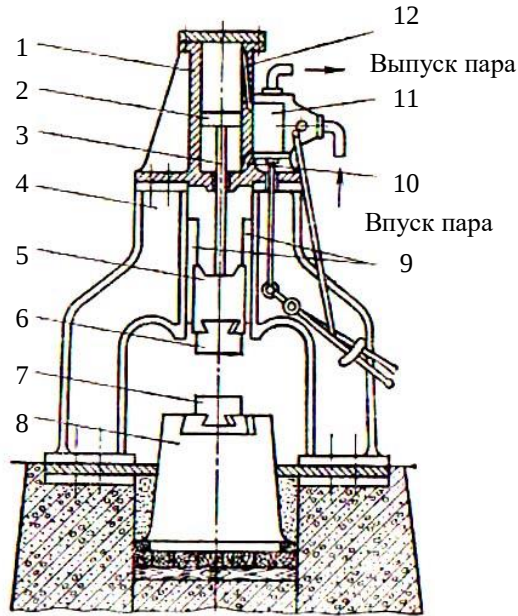


Рис.54. Схема паровоздушного молота арочного типа: 1- рабочий цилиндр; 2- поршень; 3- шток; 4- станина; 5- баба; 6, 7- байки; 8- шабот; 9- направляющие; 10, 11, 12 – газораспределительные устройства

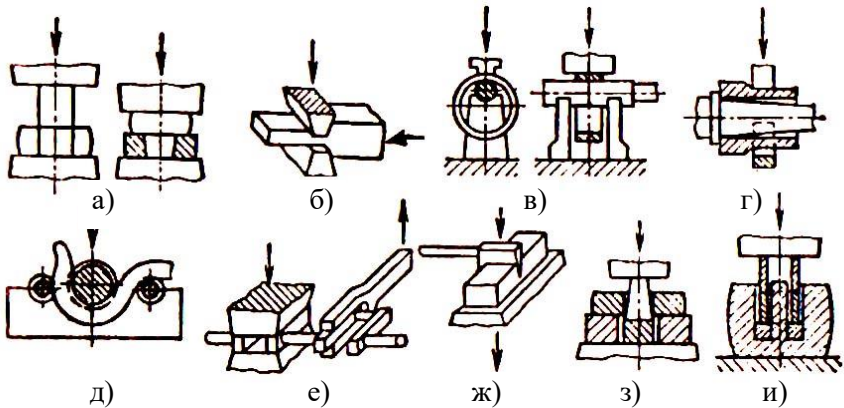


Рис.55. Технологические переходыковки: а- осадка; б- протяжка; в- раскатка; г – протяжка на оправке; д- гибка; е- скручивание; ж- отрубка; з, и- прошивка

Технологическая операция – законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте. Технологические операции могут состоять из переходов.

Технологический переход – законченная часть технологической операции, выполняемая одними и теми же средствами технологического оснащения при постоянных технологических режимах и установке.

Основные переходыковки – осадка, протяжка, пробивка, прошивка, гибка, скручивание, отрубка и кузнечная сварка (рис. 55).

Осадка – уменьшение высоты заготовки при увеличении площади ее поперечного сечения. Это наиболее энергоемкий переходковки, по которому производится выбор ковочного оборудования. Осадку с применением подкладного кольца называют **высадкой**. Осадку производят плоскими бойками.

Деформация при осадке может быть выражена величиной **уковки**

$$У = \frac{F_1}{F_2}, \quad (29)$$

где F_1 – начальная площадь поперечного сечения поковки;

F_2 – конечная площадь поперечного сечения поковки.

Очевидно, чем больше уковка, тем лучше прокован металл (измельчена структура), тем выше его механические свойства.

Протяжка – удлинение заготовки или ее части за счет уменьшения площади поперечного сечения. Она осуществляется последовательными обжатиями отдельных, примыкающих друг к другу участков заготовки при ее подаче вдоль оси. Протяжкой получают поковки с удлиненной осью (валы, рычаги, тяги и т.п.).

Разновидностями протяжки является раскатка и протяжка на оправке.

Раскатка – увеличение диаметра кольцевой заготовки при вращении за счет уменьшения ее толщины с помощью бойка и оправки. **Протяжка на оправке** – увеличение длины проштампованной или просверленной заготовки за счет обжатия ее по обе стороны оправки двумя бойками (нижним вырезанным и верхним плоским или обоими вырезанными бойками). Раскаткой изготавливают поковки колец, а протяжкой на оправке – поковки сосудов высокого давления, стволов орудий и др.

Гибка – придание заготовке изогнутой формы по заданному контуру. Гибкой получают угольники, скобы, крюки, кронштейны

и т.п. Гибку осуществляют с применением различных приспособлений в виде опор и в *подкладных итампах*.

Скручивание – поворот части заготовки вокруг продольной оси. Применяется при развороте колен коленчатых валов, при изготовлении спиральных сверл и т.п. При скручивании обычно одну часть заготовки зажимают между бойками (фиксируют), другую разворачивают на требуемый угол с помощью различных приспособлений – *воротков, ключей, лебедок*.

Отрубка – отделение части заготовки по незамкнутому контуру путем внедрения в заготовку деформирующего инструмента – *топора*. Применяют для разделения длинных заготовок на части, для удаления излишков металла на концах поковок, а также прибыльной и донной части слитка.

Прошивка – получение в заготовке отверстий (сквозная прошивка или полостей (глухая прошивка) за счет вытеснения металла. Инструментом для прошивки являются *прошивки* сплошные (рис. 55, з) и пустотелые (рис. 55, и).

2.3.5. Холодная листовая штамповка

Операцией *листовой штамповки* называется процесс пластической деформации, обеспечивающий характерное изменение формы определенного участка заготовки.

Листовой штамповкой изготавливают разнообразные плоские и пространственные детали в различных отраслях промышленности, особенно в таких как авто- и тракторостроение, самолето- и ракетостроение, приборостроение, электротехническая промышленность, химическое машиностроение и др.

Для деталей, получаемых листовой штамповкой, незначительны различия толщины стенки детали и исходной заготовки. При изготовлении листовой штамповкой пространственных деталей заготовка обычно испытывает значительные местные пластические деформации, поэтому к материалу заготовки при листовой штамповке предъявляются достаточно высокие требования по пластичности.

В качестве заготовки при листовой штамповке используют прокатный лист, полосу или ленту, свернутую в рулон. Толщина заготовки при холодной штамповке обычно не более 10 мм и лишь в редких случаях – более 20 мм.

Наиболее распространенными материалами при листовой штамповке являются низкоуглеродистая сталь, пластичные легированные стали, деформируемые сплавы меди, алюминия, магния, сплавы титана.

При листовой штамповке различают *разделительные операции*, в которых этап пластического деформирования обязательно завершается разрушением материала заготовки, и *формоизменяющие операции*, в которых заготовка не должна разрушаться в процессе деформирования.

При изготовлении деталей листовой штамповкой необходимо рационально раскроить лист металла и выбрать последовательность формоизменяющих операций (если их несколько) таким образом, чтобы получить деталь требуемой формы с меньшими затратами труда и минимальными отходами металла.

Основными разделительными операциями листовой штамповки являются: отрезка, вырубка, пробивка.

Отрезка – отделение части заготовки по незамкнутому контуру на специальных машинах – ножницах и в штампах.

Основными типами ножниц (рис.56) являются: *гильотинные ножницы*, имеющие поступательное движение режущих кромок ножа и *дисковые ножницы*, у которых кромки ножа совершают вращательное движение.

Качество поверхности среза ножницами зависит от правильного выбора и установки зазора z между режущими кромками ($z = 0,03-0,05$ s, мм) и отсутствия притупления режущих кромок.

Вырубка и пробивка – отделение заготовки по замкнутому контуру с помощью *пуансона* и *матрицы*. Вырубкой оформляют наружный контур детали, а пробивкой получают отверстие в детали.

При вырубке размеры отверстия матрицы равны размерам детали, а размеры пуансона на $2z$ меньше их (рис. 57). При пробивке картина обратная: размеры пуансона равны размерам отверстия, а размеры матрицы на $2z$ больше их. **Зазор** z при этом назначается в зависимости от толщины и механических свойств заготовки и составляет $z = 0,05-0,1$ s мм.

Основными формоизменяющими операциями листовой штамповки являются: гибка, вытяжка, отбортовка.

Гибка – операция, изменяющая кривизну заготовки практически без изменения ее линейных размеров.

Гибкой получают, например, трубные заготовки или *обечайки* (с диаметром более 500 мм) из листа на *гибочных вальцах*. Листовая заготовка деформируется между тремя или четырьмя валками (рис. 58).

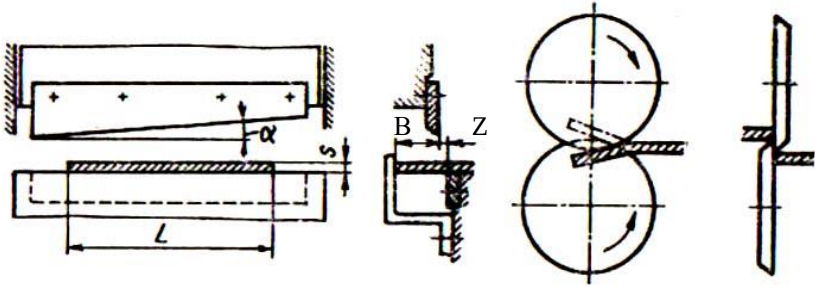


Рис.56. Ножницы для отрезки (схема): а- гильотинные; б- дисковые
 На рисунке: Вх L- размеры заготовки, отрезаемой гильотинными ножницами; S – толщина листа; Z – зазор между режущими кромками

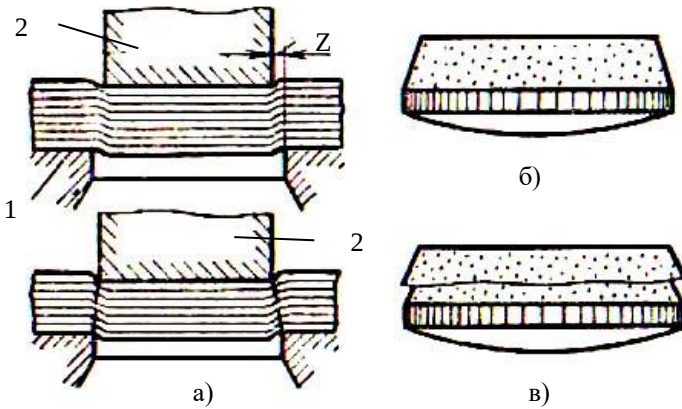


Рис.57. Последовательность деформирования металла при вырубке (а)
 и характер среза при нормальном (б) и при малом (в) зазорах:
 1- матрица; 2- пуансон

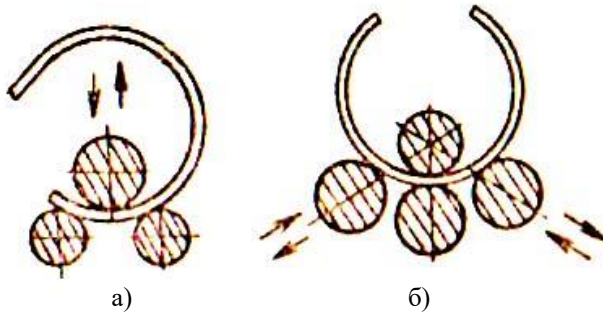


Рис.58. Схема получения обечайки на гибочных вальцах:
а- трехвалковые вальцы; б- четырехвалковые вальцы

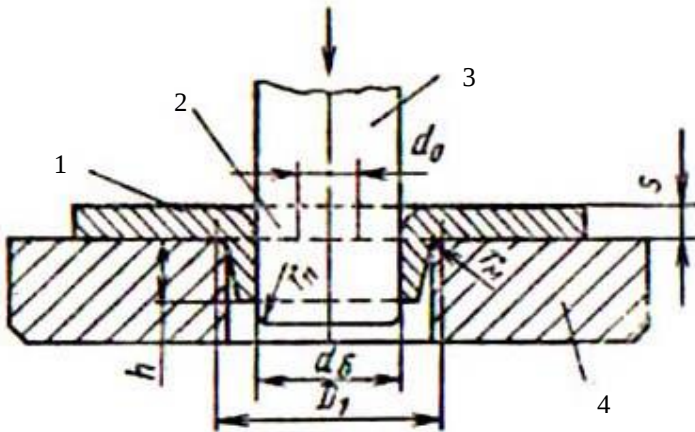


Рис.59. Схема получения горловины отбортовкой:
1- изделие; 2- заготовка; 3- пуансон; 4- матрица

Отбортовка - получение **бортов (горловин)** путем выдавливания центральной части заготовки с предварительно пробитым отверстием в матрицу (рис. 59).

При отбортовке заготовка в очаге деформации утоняется, и размеры отверстия d_0 по заданным размерам горловины D_1 следует определять из условия равенства длины развертки горловины по средней линии и ширины отбортовываемой части

$$d_0 = D_1 - \pi \left(rm + \frac{S}{2} \right) - 2h \quad (30)$$

2.3.6. Методы производства машиностроительных профилей

В машиностроении применяют профили самого разнообразного сортамента, которые получают не только прокаткой (см. 2.3.3.), но и другими видами ОМД: прессованием, волочением и др.

При **прессовании** металл выдавливается из замкнутой полости через отверстие, соответствующее сечению прессуемого профиля (рис. 60,а). В процессе прессования при движении **пуансона 1** с **прессшайбой 5** металл заготовки **2** выдавливается в отверстие матрицы **3**. Для получения пологого профиля пуансон снабжен **иглой 4**.

Прессованием изготавливают изделия разнообразного сортамента (рис. 60,б) из цветных металлов и сплавов, в том числе прутки диаметром 3-250 мм, трубы диаметром 20-400 мм со стенкой толщиной 1,5-12 мм.

При прессовании металл подвергается всестороннему неравномерному сжатию (см. табл. 29) и поэтому имеет высокую пластичность. В то же время схема всестороннего сжатия металла при прессовании приводит к значительным удельным усилиям, действующим на инструмент, поэтому **инструментальная оснастка** при прессовании (матрица и пуансон) изготавливается из высококачественных инструментальных сталей и жаропрочных сплавов.

Основным оборудованием для прессования являются вертикальные или горизонтальные гидравлические прессы.

К недостаткам прессования надо отнести большие отходы металла в так называемый **пресс-остаток**, который может достигать 40% от массы исходной заготовки (при прессовании труб большого диаметра).

Волочение - операция получения профиля постоянного сечения при протягивании заготовки через сужающееся отверстие в инструменте (**волоке**) (рис. 61 а). Проводится в холодном состоянии.

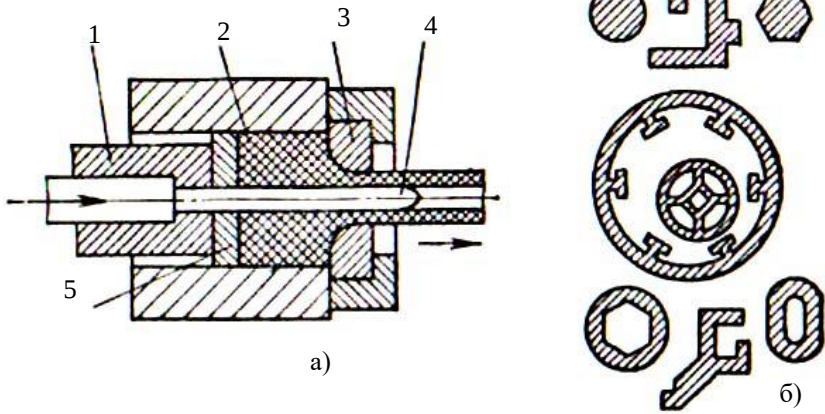


Рис.60. Схема прессования полого профиля (а) и сортамент прессованных профилей (б)

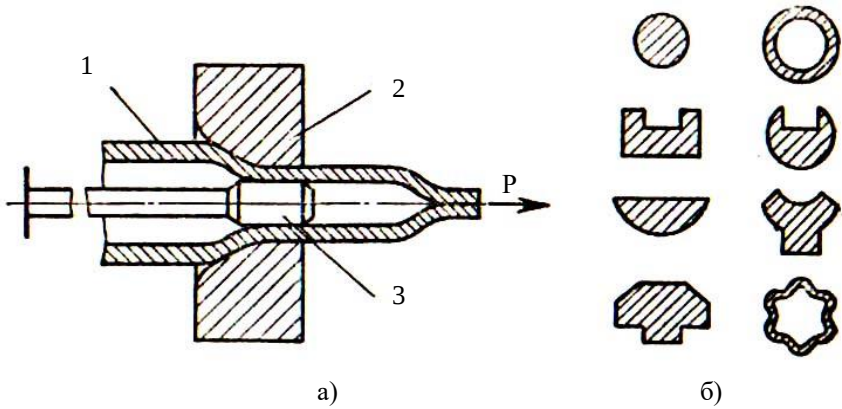


Рис.61. Схема волочения трубы (а) и примеры профилей, получаемых волочением (б)

На рисунке: 1- заготовка; 2- волока; 3- оправка

Исходными заготовками служат прокатанные или прессованные прутки и трубы из стали, цветных металлов и их сплавов.

Деформация металла при волочении характеризуется *вытяжкой* μ

$$\mu = \frac{\ell_{\kappa}}{\ell_0} \quad (31)$$

где ℓ_0 , ℓ_{κ} – длина заготовки до и после деформации, соответственно.

За один проход вытяжка ограничена $[\mu] = 1,25-1,45$. При необходимости волочение проходит в несколько *проходов*. Для снятия наклепа металла и восстановления его деформационной способности выполняется *промежуточный рекристаллизационный отжиг*.

Основной инструмент при волочении сплошных профилей – *волока* (рис. 62), а при волочении полых профилей – *волока и оправка* к ней.

Волока 1 закрепляется в обойме 2, которая крепится на жесткой *волоочильной доске*. Волоки изготавливают из твердого металлокерамического сплава, а в особо ответственных случаях из технического алмаза. Угол деформирующего конуса волоки зависит от твердости обрабатываемого материала, от сечения заготовки, а также от коэффициента трения и составляет $\alpha = 8-24^\circ$.

Волочение осуществляют на *волоочильных станах*, состоящих из тянущего устройства и волоочильного инструмента. По типу тянущего устройства волоочильные станы подразделяют на станы с прямолинейным движением протягиваемого материала (цепной, реечный, гидравлический) и с наматыванием его на барабан (барабанный тип).

Волоочильные станы барабанного типа (рис. 63) применяются в основном для получения проволоки, редко для сплошных и полых профилей и только для тех случаев, когда изгиб при наматывании на барабан не нарушает формы поперечного сечения протягиваемого материала.

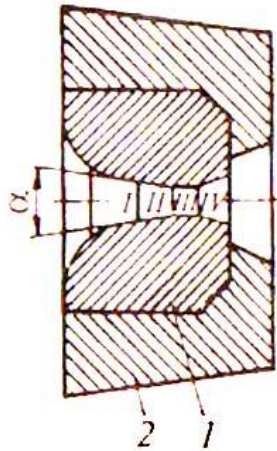


Рис.62. Конструкция волоки: I – смазывающий конус; II – деформирующий конус; III- калибрующий пояс; IV- выходной конус; α – угол деформирующего конуса

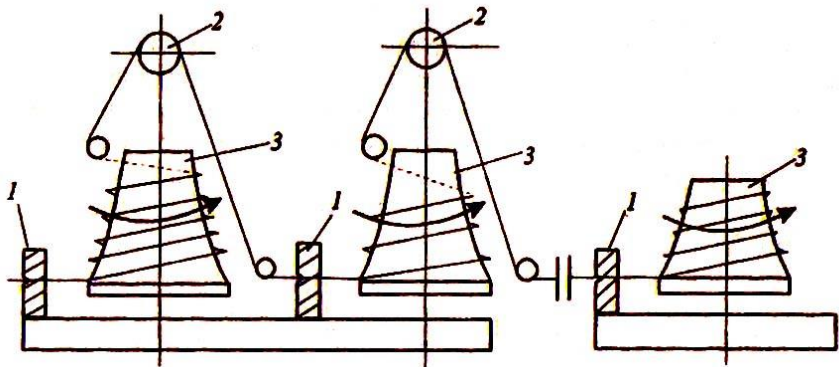


Рис.63. Схема волоchильного стана барабанного типа:
1- волоchильная доска; 2- натяжное устройство; 3- барабан

2.4. Обработка заготовок резанием

2.4.1. Движения резания, схема обработки

Способы обработки деталей со снятием стружки (резанием) являются чистовыми и отделочными технологическими методами обработки заготовок.

Резание – процесс срезания режущим инструментом с поверхности заготовки слоя металла для получения требуемой по чертежу геометрической формы, точности размеров и шероховатости поверхностей детали.

Для осуществления процесса резания необходимо наличие относительных движений между заготовкой и режущим инструментом. Движения рабочих органов станков подразделяют на движения резания, установочные и вспомогательные.

Движения, при которых с обрабатываемой заготовки срезается слой металла и изменяется состояние обработанной поверхности, называют **движениями резания** (главное движение и движение подачи).

Главное движение – движение, определяющее скорость отделения стружки, – скорость резания. **Движение подачи** – движение, обеспечивающее непрерывность врезания режущего лезвия инструмента в новые слои материала.

Движения рабочих органов станка (**шпиндели, суппорты, столы** и др.), обеспечивающие такое положение инструмента относительно заготовки, при котором с нее снимается определенный слой материала, называют **установочными движениями**.

Движения рабочих органов станка, которые не имеют непосредственного отношения к процессу резания и служат для транспортировки и закрепления заготовки или инструмента, быстрых перемещений рабочих органов, переключения скоростей резания и подачи и т.п., называют **вспомогательными движениями**.

Под **схемой обработки** (рис.64) понимают условное изображение обрабатываемой заготовки, ее установки и закрепления на станке с указанием положения режущего инструмента относительно заготовки и движений резания. Инструмент при этом показывают в положении, соответствующем окончанию обработки поверхности заготовки.

В процессе обработки на заготовке различают (см. рис. 64): **обрабатываемую поверхность 1**, с которой срезается слой материала; **обработанную поверхность 3**, с которой срезан слой материала и

превращен в стружку; **поверхность резания 2**, образованную главным режущим лезвием инструмента и являющуюся переходной между обрабатываемой и обработанной поверхностями.

Обработанную поверхность на схеме выделяют другим цветом, на светокопиях – утолщенными линиями (см. рис. 64).

Пространственная форма детали ограничивается простейшими геометрическими поверхностями: плоские, линейчатые, круговые цилиндрические и конические, шаровые, торцовые (рис.65). Любую поверхность рассматривают как совокупность последовательных положений (следов) одной производящей линии, называемой **образующей** (обозначена 1 на рис. 65), движущейся по другой производящей линии, называемой **направляющей** (обозначена 2 на рис. 65).

Для получения плоской поверхности (рис.65, а) необходимо образующую прямую линию 1 перемещать по направляющей прямой 2. Для образования цилиндрической поверхности (рис. 65, в) следует образующую прямую линию 1 перемещать по направляющей линии – окружности 2 и т.д.

Плоские линейчатые и цилиндрические поверхности являются обратимыми, так как для их воспроизведения образующие и направляющие линии можно менять ролями. Кроме обратимых поверхностей есть необратимые, например, коническая, шаровая и торовая поверхности (см. рис. 65).

Коническую поверхность получают при перемещении одного конца прямой образующей линии 1 по направляющей линии 2 - окружности основания конуса, а второй конец образующей прямой линии 1 при этом должен быть неподвижным.

В реальных условиях образования поверхностей деталей на металлорежущих станках образующие и направляющие линии в большинстве случаев являются воображаемыми. При обработке на станке они воспроизводятся комбинацией согласованных между собой движений заготовки и инструмента.

Движения резания являются формообразующими движениями, так как они воспроизводят во времени образующие и направляющие линии. Формообразующих движений может быть одно или несколько.

Образование поверхностей на металлорежущих станках происходит одним из следующих методов: **копирования, следов, касания, обкатки (огибания)**. Наиболее распространенным методом формообразования поверхностей является метод следов (точение, строгание). Метод копирования используется при обработке фасонных поверхностей. Метод обкатки реализуется на специализированных станках (например, зуборезных).

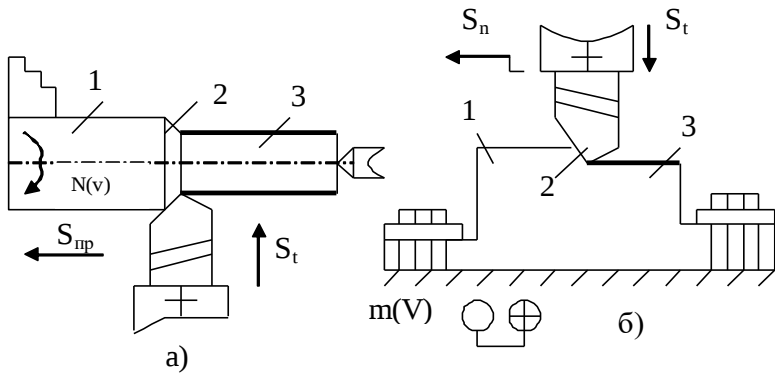


Рис.64. Схема обработки заготовок точением (а), строганием (б): V – скорость главного движения; S_{np} – продольная подача; S_n – поперечная подача; S_t – установочное движение

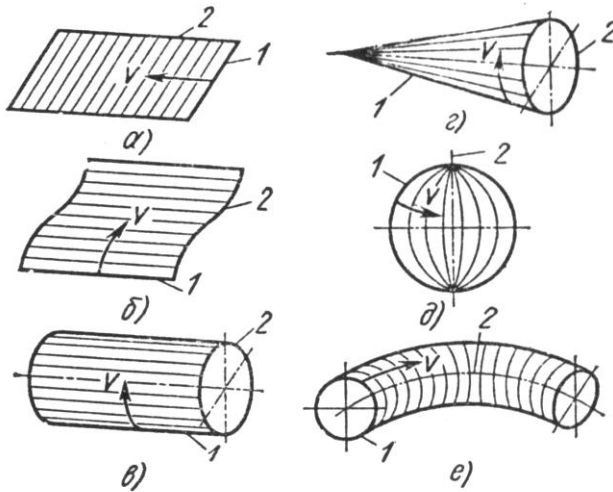


Рис.65. Виды поверхностей: плоская (а); линейчатая (б); цилиндрическая (в); коническая (г); шаровая (д); торовая (е)

2.4.2. Режим резания

Элементами процесса резания являются скорость резания, подача и глубина резания. Совокупность этих величин называют **режимом резания**.

Скоростью резания (v) называют путь точки режущего лезвия инструмента относительно заготовки в направлении главного движения в единицу времени. Скорость резания измеряют в м/мин при всех видах обработки резанием, кроме шлифования и полирования, где ее измеряют в м/с.

Если главное движение является вращательным (точение), то

$$v = \frac{\pi D_{\text{заг}} \cdot n}{1000} (\text{м / мин}), \quad (32)$$

где $D_{\text{заг}}$ – наибольший диаметр обрабатываемой поверхности заготовки, мм;

n – частота вращения заготовки, об/мин.

Если главное движение является возвратно-поступательным (строгание), причем скорости рабочего $v_{\text{рх}}$ и холостого ходов $v_{\text{хх}}$ разные, то средняя скорость резания

$$v_{\text{рх}} = \frac{L \cdot m}{1000} (k + 1) (\text{м / мин}), \quad (33)$$

где L – расчетная единица хода резца, мм;

m – число двойных ходов резца в минуту;

$$k = \frac{v_{\text{рх}}}{v_{\text{хх}}} - \text{коэффициент неравномерности хода резца.}$$

Подачей S называют путь точки режущего лезвия инструмента относительно заготовки в направлении движения подачи за один оборот, за один двойной ход заготовки или инструмента или за единицу времени.

При разных технологических методах обработки подача имеет одну из следующих размерностей: мм/об – точение, сверление; мм/дв. ход – строгание, долбление; мм/мин – фрезерование. Различают подачи: продольную – $S_{\text{пр}}$; поперечную – $S_{\text{п}}$; вертикальную – $S_{\text{в}}$; окружную – $S_{\text{о}}$; на один зуб режущего инструмента – S_z и др.

Глубиной резания t называют расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями заготовки, измеренное перпендикулярно к последней, за один рабочий ход инструмента. Глубина резания t измеряется в миллиметрах.

При точении цилиндрической поверхности глубину резания t определяют как полуразность диаметров $D_{\text{заг}}$ до и после обработки d .

$$t = \frac{D_{\text{заг}} - d}{2} \quad (34)$$

При сверлении отверстий в сплошном материале за глубину резания t принимают половину диаметра сверла D .

$$t = \frac{D}{2} \quad (35)$$

При рассверливании

$$t = \frac{D - d}{2} \quad (36)$$

где d – диаметр рассверливаемого отверстия.

При фрезеровании и строгании станок настраивается на определенную глубину резания t .

2.4.3. Металлорежущее оборудование и технологические операции резания

Обработка резанием выполняется разными технологическими методами: точение, строгание, сверление, растачивание, фрезерование, протягивание, зубонарезание и др. Выбор технологического метода определяется видом обрабатываемой поверхности (тело вращения, плоскость, отверстие, отверстие в корпусных деталях и пр.) и наличием на конкретном предприятии соответствующего металлорежущего оборудования.

Технологические методы обработки реализуются на металлорежущих станках. В настоящее время классификация станков содержит 10 групп, которая включает 10 типов станков. Каждый тип станков в свою очередь имеет 10 типоразмеров.

По степени универсальности станки делят на:

1. **Универсальные** для обработки поверхностей разных форм и размеров деталей многих наименований (токарно-винторезные, фрезерные, сверлильные и т.д.);

2. **Широкого назначения** для выполнения определенных операций на деталях многих наименований (токарно-обрезные, многолезцовые, центровочные и т.д.);

3. **Специализированные** для обработки деталей одного наименования или сходных конфигураций, но разных размеров (станки для обработки коленчатых валов, труб, фланцев и др.).

По степени точности различают станки нормальной точности и станки высокоточные (прецизионные).

По степени автоматизации – станки с ручным управлением рабочим циклом, полуавтоматы, автоматы и станки с программным управлением.

В ремонтно-механических мастерских промышленных предприятий используются в основном универсальные металлорежущие станки.

Металлорежущий станок представляет собой сложный агрегат с автономным электроприводом, снабженный необходимыми устройствами для выполнения требуемого технологического процесса обработки детали со снятием стружки.

Металлорежущий станок имеет следующие узлы: **станина** с направляющими для монтажа узлов и механизмов станка (суппорта, задней бабки, револьверной головки, стола и др.); **механизмы главного движения и движения подачи** (двигатель, механические передачи); **шпиндель** для закрепления зажимных приспособлений (**патроны**) для передачи вращения заготовке или инструменту; **суппорт** для размещения инструмента и обеспечения его перемещения (движение подачи); **система смазки** и подачи **смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ)** в зону резания и др.

В условиях ремонтно-механических мастерских промышленного предприятия представлены, как правило, следующие технологические методы обработки резанием: точение, фрезерование, сверление и шлифование.

Точение – технологический метод формообразования поверхностей заготовок, характеризующийся наличием двух движений: вращательного движения заготовки (главное) и поступательного движения инструмента-резца (движение подачи). Обработку выполняют на токарных станках, инструмент – **токарный резец** (рис.66).

Схема обработки точением наружной цилиндрической поверхности представлена на рис.64,а.

Основное технологическое время при обтачивании цилиндрической поверхности определяется

$$T_o = \frac{L \cdot h}{n \cdot S_{пп} \cdot t}, \quad (37)$$

где **L** – длина обрабатываемой поверхности, мм; **h** – припуск на обработку, мм; **n** – частота вращения шпинделя станка, об/мин.; **S_{пп}** – продольная подача, мм/об.; **t** – глубина резания, мм.

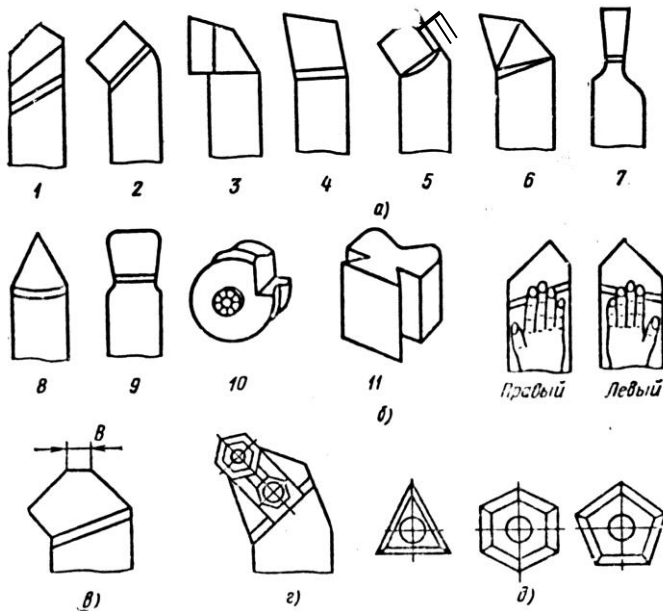


Рис.66. Токарные резцы: 1, 2, 3 – проходные для обтачивания наружных цилиндрических и конических поверхностей; 4 – подрезные для подрезки торцев; 5, 6 – расточные для сквозных и глухих отверстий, соответственно; 7 – отрезные; 8 – резбовые; 9 – лопаточные чистовые; 10, 11 – фасонные; в – резец для высокопроизводительного течения; г – резец с многогранной неперетачиваемой твердосплавной пластиной; д – неперетачиваемые твердосплавные пластины.

Элементы режима резания v , s , t назначают в определенной последовательности. Сначала назначают глубину резания t . При этом стремятся весь *припуск на обработку* срезать за один *рабочий ход инструмента*. Если по технологическим причинам необходимо сделать два рабочих хода, то при первом ходе снимают до $\sim 80\%$ припуска h , при втором (чистовом) $\sim 20\% h$. Затем выбирают величину подачи s , учитывая требования точности и допустимой шероховатости обработанной поверхности, а также технологические возможности оборудования и инструмента. Затем определяют скорость резания, исходя из выбранных t , s и стойкости режущего инструмента T .

Допустимая резцом скорость резания v (м/мин) при точении определяют по следующей эмпирической формуле

$$v = \frac{C_v}{t^{*v} \cdot S^{YV} \cdot T^m}, \quad (38)$$

где C_v - коэффициент, учитывающий физико-механические свойства материала заготовки и инструмента; X_v , Y_v , m – показатели степени.

Помимо точения еще одним распространенным в условиях ремонтных мастерских методом механической обработки заготовки является фрезерование.

Фрезерование - высокопроизводительный метод обработки поверхностей заготовок многолезвийным режущим инструментом – фрезой. Данный технологический метод механической обработки поверхностей заготовки характеризуется вращательным движением инструмента (главное движение) и обычно поступательным движением заготовки (движение подачи) (рис.67).

На фрезерных станках обрабатывают горизонтальные, вертикальные и наклонные плоскости, фасонные поверхности, уступы и пазы различного профиля. При использовании специальных приспособлений (**универсальные делительные головки**) фрезерованием можно изготавливать винтовые канавки, а также детали с зубчатым контуром (зубчатые колеса). Особенностью процесса фрезерования является прерывистость резания каждым зубом фрезы. Врезание зуба фрезы в заготовку сопровождается ударами, что приводит к неравномерности процесса резания, вибрациям и повышенному износу зубьев фрезы, а также отрицательно сказывается на точности и шероховатости поверхности обрабатываемой детали.

В зависимости от вида обрабатываемых поверхностей различают следующие типы фрез: **цилиндрические, торцовые, дисковые, концевые, угловые, шпоночные, фасонные** (рис.68).

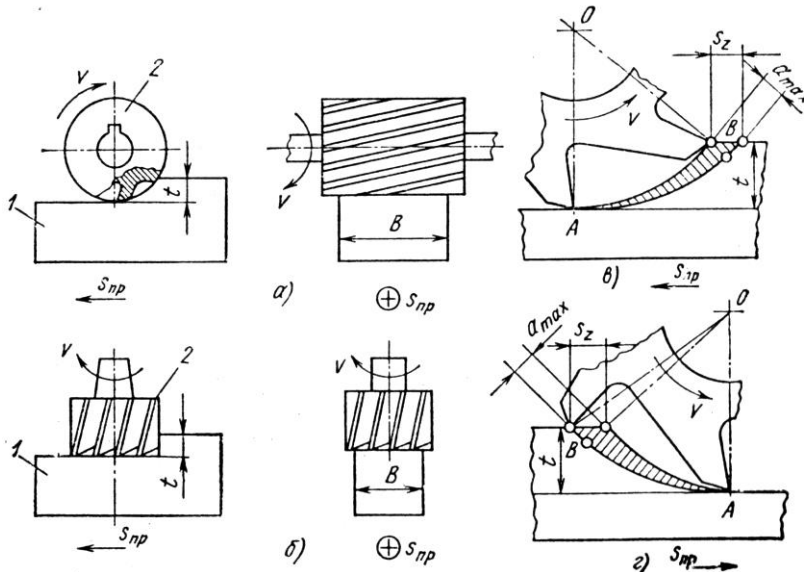


Рис.67. Схемы фрезерования цилиндрической (а) и торцовой (б) фрезами, встречного (в) и попутного (г) фрезерования:

На рисунке: 1 — заготовка; 2 — фреза;

« B » — ширина фрезерования; « t » — глубина резания.

Фрезы изготовляют цельными (рис. 68,б, д) или сборными с напайными и вставными ножами (рис. 68,з). Режущие лезвия могут быть прямыми (рис.68,д) или винтовыми (рис.68,а).

Фрезы имеют остроконечную (рис.68,и) или затылованную (рис. 68,к) форму зуба. У фрез с остроконечными зубьями передняя и задняя поверхности зуба плоские. У фрез с затылованными зубьями передняя поверхность зуба плоская, а задняя выполнена по спирали Архимеда: при переточке передней поверхности профиль зуба такой фрезы сохраняется.

В зависимости от пространственного расположения оси инструмента различают **горизонтально-фрезерные** (ось вращения фрезы горизонтальная) и **вертикально-фрезерные** (ось вращения фрезы вертикальная) и **универсальные фрезерные станки**.

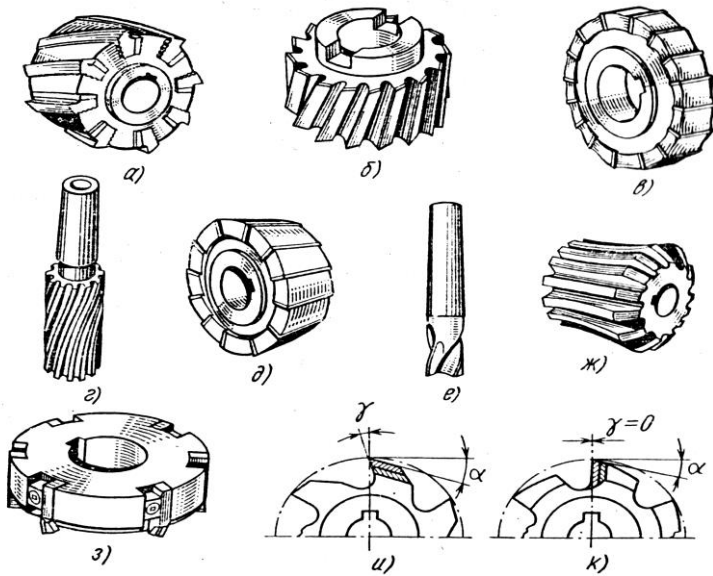


Рис.68. Фрезы:

а – цилиндрическая; б – торцовая; в- дисковая; г – концевая;
 д – угловая; е – шпоночная; ж – фасонная.

Сверление – распространенный метод получения отверстий в сплошном материале. Сверлением получают сквозные и несквозные (глухие) отверстия и обрабатывают предварительно полученные отверстия с целью увеличения их размеров, повышения точности и снижения шероховатости поверхности.

Сверление реализуется при сочетании вращательного движения инструмента вокруг оси (главное движение) и его же поступательного движения вдоль оси (движение подачи). Процесс резания при сверлении протекает в более сложных условиях, чем при точении или фрезеровании. В процессе резания затруднен отвод стружки из зоны резания и подвод охлаждающей жидкости к режущим лезвиям инструмента.

Отверстия на сверлильных станках обрабатывают **сверлами**, **зенкерами**, **развертками** и **метчиками** (рис.69).

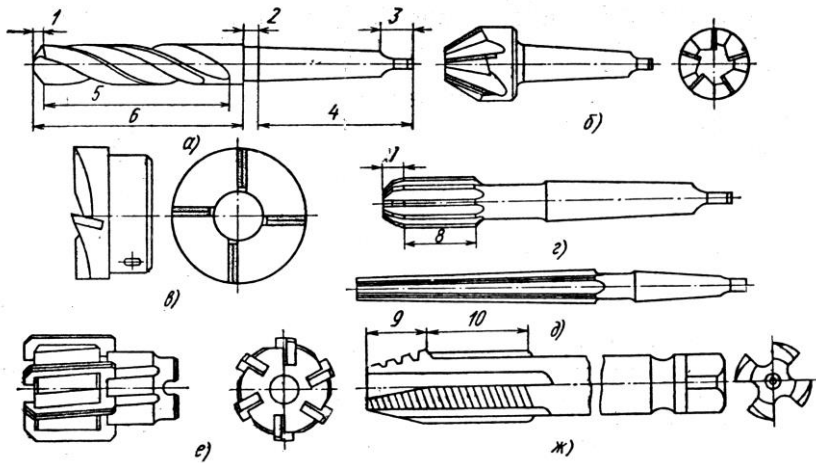


Рис.69. Инструменты для обработки отверстий на сверлильных станках: а-в – зенкеры; г-е – развертки; ж – метчик

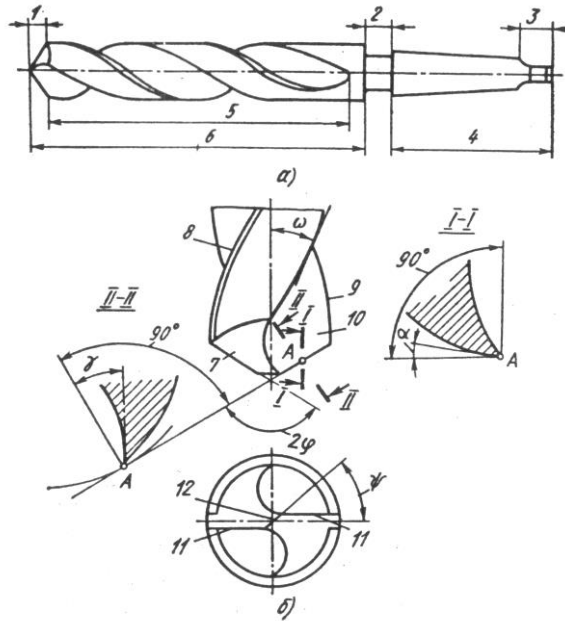


Рис.70. Части, элементы и углы спирального сверла

Сверла по конструкции и назначению подразделяют на спиральные, центровочные и специальные. Наиболее распространенный для сверления и рассверливания инструмент – **спиральное сверло** (рис. 70,а), состоящее из **рабочей части** 6, **шейки** 2, **хвостовика** 4 и **лапки** 3.

В рабочей части 6 различают режущую 1 и направляющую 5 части с винтовыми канавками. Шейка 2 соединяет рабочую часть сверла с хвостовиком. В зависимости от диаметра сверла хвостовики бывают конические (см. рис. 70,а) и цилиндрические.

Конический хвостовик 4 непосредственно устанавливается в шпинделе станка. **Цилиндрический хвостовик** закрепляется в патроне. Лапка 3 служит упором при извлечении сверла с коническим хвостовиком из шпинделя сверлильного станка.

Зенкерами (рис. 69) обрабатывают уже имеющиеся отверстия в литых или штампованных заготовках, а также предварительно просверленные отверстия. В отличие от сверл зенкеры снабжены тремя или четырьмя главными режущими кромками и не имеют поперечной режущей кромки (см. 11 на рис. 70,б). **Режущая часть зенкера** 1 выполняет основную работу резания. **Калибрующая часть** 5

служит для направления зенкера в отверстие и обеспечивает необходимую точность обработки и шероховатость обработанной поверхности (остальные части зенкера имеют названия идентичные со сверлом).

По виду обрабатываемых отверстий зенкеры делят на цилиндрические (рис.69,а), конические (рис. 69,б) и торцовые (рис. 69,в). Зенкеры конструктивно бывают цельные с коническими хвостовиками (рис. 69,а, б) и насадные (рис. 69,в).

Развертки окончательно обрабатывают отверстия. По форме обрабатываемого отверстия различают цилиндрические (рис.69, г, е) и конические (рис. 69, д) развертки. Развертки имеют 6-12 главных режущих кромок, расположенных на режущей части 7 с направляющим конусом. Калибрующая часть 8 направляет развертку в отверстие и обеспечивает необходимую точность обработки и шероховатость поверхности. По конструкции развертки делят на хвостовые (рис. 69, г, д) и насадные (рис. 69,е).

Метчики применяют для нарезания внутренних резьб в деталях типа гаек или отверстиях. Метчики (рис.69, ж) представляют собой винт из быстрорежущей стали с прорезанными прямыми или винтовыми канавками, образующими с витками резьбы режущие кромки. Рабочая часть метчика состоит из: режущей, заборной части 9 и калибрующей части 10.

Профиль резьбы метчика соответствует профилю нарезаемой резьбы. Комплект метчиков одного диаметра включает ***черновой, получистовой и чистовой метчики***. Внутренняя резьба нарезается в предварительно просверленном отверстии, диаметр которого принимается по справочникам в зависимости от диаметра и шага резьбы. Приближенно можно принимать

$$d_{\text{отв}} = d - p, \quad (39)$$

где $d_{\text{отв}}$ – диаметр отверстия под резьбу, мм;

d, p – диаметр и шаг резьбы, мм.

Основные типы метчиков: ручные (см. рис.69, ж) и станочные, гаечные и инструментальные (маточные и плащечные). Ручной метчик квадратным хвостовиком крепится в **воротке**, станочный метчик закрепляют специальным патроном в шпинделе сверлильного или задней бабке токарного станка.

2.4.4. Инструментальные материалы

Вторым важнейшим компонентом технологического процесса механической обработки является режущий инструмент. Металлорежущий инструмент имеет строго определенную геометрию (для реализации резания) и должен обладать достаточной стойкостью в процессе обработки. В этой связи металлорежущий инструмент

производится на специализированных заводах из инструментальных материалов.

Инструментальные материалы должны удовлетворять ряду эксплуатационных требований:

- **прочность** для восприятия сил резания;
- **вязкость** для восприятия ударной динамической нагрузки;
- **красностойкость** для сохранения исходной твердости режущей кромки при высоких температурах в зоне резания;
- **твердость** рабочей части значительно выше твердости обрабатываемого материала для возможности реализации резания;
- **износостойкость** для сохранения размерной стабильности инструмента и др.

Углеродистые инструментальные стали (ГОСТ 1435) марок У10А, У11А, У12А. После термической обработки имеют твердость 60-62 HRC. Красностойкость – 200-250⁰С. Эти стали находят ограниченное применение, т.к. допустимые скорости резания не выше 15-18 м/мин. Из них изготавливают инструмент для ручных работ - **метчики, плашки, ножовочные полотна** и т.д.

Легированные инструментальные стали (ГОСТ 5950) марок 9ХВГ, ХВГ, 9ХС, 6ХС и др. После термической обработки имеют твердость 62-64 HRC, красностойкость – 250-300⁰С, допустимая скорость резания 15-25 м/мин. Из них изготавливают **сверла, протяжки, метчики, плашки, развертки** и т.д.

Быстрорежущие стали (ГОСТ 19265) содержат 8,5-19% W; 3,8...4,4% Cr; 2...10% Co и V. Для изготовления режущего инструмента используют стали P9, P12, P18, P6M3, P9K10, P10K5Ф5 и др. После термической обработки имеют твердость 62-65 HRC. Красностойкость 600-630⁰С. Допустимая скорость резания 100 м/мин.

Для экономии высоколегированной стали режущий инструмент делают сборным или сварным. Рабочую часть инструмента из быстрорежущей стали сваривают с хвостовиком из конструкционной стали (45, 50, 40Х и др.). Часто режущую часть инструмента армируют приварными пластинами из быстрорежущей стали (см. рис.66).

Сталь Р9 используют для изготовления **инструмента простой формы** (резцы, фрезы, зенкеры). Сталь Р18 используют для **фасонных и сложных инструментов** (резьбонарезных, зуборезных), для которых основным требованием является износостойчивость. Стали Р9Ф5, Р14Ф4 используется для изготовления **инструментов для чистовой обработки** (протяжек, разверток, шеверов). Стали **Р9М4, Р6М3** используют для инструментов, работающих в условиях **черновой обработки**, а также для изготовления протяжек, долбяков,

шеверов, фрез, сверл и другого инструмента.

Для режущего инструмента используют также **спеченные твердые сплавы**, которые представляют собой твердый раствор карбидов WC, TiC, TaC в металлическом кобальте. Твердые сплавы используют в виде пластинок определенной формы и размеров, изготавливаемых методами порошковой металлургии (см. рис. 66).

Пластины из твердого сплава имеют твердость 86-94 HRA. Красностойкость – 800-1000°C. Допустимая скорость резания – до 800 м/мин. Эти пластины припаивают к **державкам инструментов** медными или латунными припоями или крепят механическим способом. В промышленности широко применяют многогранные неперетачиваемые твердосплавные пластины трех-, четырех-, пяти-, шестигранные (см. рис.66, д), которые крепят к державке резца или корпусу инструмента механическим способом.

Твердые сплавы (ГОСТ 3882) подразделяют на три группы: вольфрамовые BK2, BK3, BK8, и др.; титановольфрамовые Т30К4, Т15К6 и др.; титанотанталовольфрамовые ТТ7К12 и ТТ10К8Б.

2.4.5. Обрабатываемость сталей резанием

Обрабатываемость резанием является важным технологическим свойством стали. В справочной литературе (марочник стали) она дается в виде **коэффициентов обрабатываемости K_v** по отношению к эталону. В качестве эталона выбрана сталь 45 ($\sigma_B = 637$ МПа, 179 НВ).

Обрабатываемость сталей и сплавов резанием определена для условий полустойчивого точения без охлаждения по чистому металлу резцами, оснащенными пластинами из твердого сплава Т5К10, BK8 или резцами из быстрорежущей стали P18, P12 при глубине резания $t = 1,5$ мм, подаче $s = 0,2$ мм/об и значении главного угла резца в плане $\varphi = 60^\circ$.

Количественно **обрабатываемость стали и сплавов резанием** оценена по скорости резания V_{60} , соответствующей 60 минутам, стойкости резцов и выражена коэффициентами $K_{V_{TB.спл.}}$ и K_v б.ст. по отношению к эталонной стали 45.

Коэффициент обрабатываемости стали для условий точения твердосплавными резцами $K_{V_{TB.спл.}}$

$$K_{V_{TB.спл.}} = \frac{V_{60}^{TB.спл.}}{V_{60эт}^{TB.спл.}}, \quad (40)$$

где $V_{60\text{эт}}^{\text{тв.спл}} = 145$ м/мин – скорость резания при 60 минутной стойкости твердосплавных резцов при точении стали 45.

Аналогично для условий точения резцами из быстрорежущей стали

$$K_{V_{\text{б.ст.}}} = \frac{V_{60}^{\text{б.ст.}}}{V_{60\text{эт}}^{\text{б.ст.}}}, \quad (41)$$

где $V_{60\text{эт}}^{\text{б.ст.}} = 70$ м/мин - скорость резания при 60 минутной стойкости резцов из быстрорежущей стали при точении стали 45.

Значения $K_{V_{\text{тв.спл.}}}$ и $K_{V_{\text{б.ст.}}}$ приводятся в марочниках сталей. Для некоторых сталей значения коэффициентов обрабатываемости резанием приведены в табл. 30.

Для принятых условий резания (t , S , T) абсолютное значение скорости резания V_{60} данной стали определяется умножением табличного значения коэффициента обрабатываемости $K_{V_{\text{тв.спл.}}}$ или $K_{V_{\text{б.ст.}}}$ для данной стали на соответствующую скорость резания эталона. При обработке твердосплавным резцом $V_{\text{эт}} = 145$ м/мин, а при обработке резцом из быстрорежущей стали - $V_{\text{эт}} = 70$ м/мин.

После определения скорости резания v (в м/мин) находят частоту вращения $n_{\text{расч}}$ (в об/мин) шпинделя станка, соответствующей этой скорости резания при обработке заготовки диаметром $D_{\text{заг}}$ (в мм)

$$n_{\text{расч}} = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D_{\text{заг}}} \quad (42)$$

Таблица 30

Значения коэффициентов обрабатываемости резанием
некоторых сталей

Марка стали	$K_{V_{\text{тв.спл.}}}$	$K_{V_{\text{б.ст.}}}$	Марка стали	$K_{V_{\text{тв.спл.}}}$	$K_{V_{\text{б.ст.}}}$
Ст3	1,8	1,6	ШХ15	0,9	0,36
Ст6	1,2	1,2	ХВГ	0,75	0,35
45	1	1	Х12Ф1	0,8	0,3
55	1	0,65	9Х2	0,95	0,55
09Г2С	1,6	1	60ХН	0,8	0,75
40Х	1,2	0,95	60ХГ	0,9	0,75
18ХГТ	1,1	1	40Х13	0,6	0,4
30ХГСА	0,85	0,75	12Х18Н10Т	0,85	0,35
40ХН2МА	0,7	0,4	20Л	1,5	1,35
38Х2МЮА	0,75	0,55	55Л	0,7	0,55

Так как металлорежущий станок точно такой частоты вращения шпинделя может не иметь вследствие ее ступенчатого регулирования, то назначают ближайшую меньшую величину n из паспорта металлорежущего станка.

2.5. Основы сварочного производства

2.5.1. Свариваемость сталей

Сварка – технологический процесс получения неразъемных соединений различных материалов путем образования в сварном шве общих для соединяемых материалов кристаллических решеток.

В настоящее время насчитывается несколько десятков способов сварки и их разновидностей.

Различают: сварку плавлением и давлением. При сварке плавлением шов образуется в результате *кристаллизации* сварочной ванны. При сварке давлением сварной шов образуется в результате *диффузии* соединяемых металлов.

К способам *сварки плавлением* относятся: *дуговая* (ручная, автоматическая под слоем флюса и др.), *электрошлаковая, газовая* и др. К способам *сварки давлением* относятся: *контактная, диффузионная, трением, взрывом* и др.

Способность материалов образовывать сварные соединения называется свариваемостью.

Свариваемость оценивается степенью соответствия свойств сварного соединения аналогичным свойствам основного металла и их склонностью к образованию таких сварочных дефектов, как трещины, поры, шлаковые включения и др.

По *технологической свариваемости* сталь условно разбита на следующие группы:

1. **Сталь, свариваемая без ограничений** (сварка выполняется без подогрева и термообработки). Марки стали: Ст1 – Ст4 по ГОСТ 380; 08, 10, 15, 20, 25 по ГОСТ 1050; 15Л, 20Л по ГОСТ 977; 15Г, 20Г, 15Х, 20Х, 20ХГСА, 12ХН2 по ГОСТ 4543; 12Х18Н10Т, 08Х18Н10 по ГОСТ 5632 и др.

3. **Сталь удовлетворительной свариваемости** (при сварке в нормальных производственных условиях трещины не образуются). Марки стали: Ст5пс, Ст5сп по ГОСТ 380; 30, 35 по ГОСТ 1050; 30Л, 35Л по ГОСТ 977; 20ХН3А, 12Х2Н4А по ГОСТ 4543 и др.

4. **Сталь ограниченной свариваемости** (в обычных условиях сварки образуются трещины; необходимы термообработка и подогрев). Марки стали: Ст6 по ГОСТ 380; 40, 45, 50 по ГОСТ 1050; 30ХМ,

30ХГС, 33ХС, 20Х2Н4А по ГОСТ 4543; 17Х18Н9, 20Х23Н18 по ГОСТ 5632 и др.

5. **Сталь плохой свариваемости** (обязательная предварительная термообработка, подогрев в процессе сварки, последующая термообработка). Марки стали: 40Г, 45Г, 50Г, 60Г, 65Г, 70Г, 50ХН по ГОСТ 4543; 55Л по ГОСТ 977; У7 - У12 по ГОСТ 1435; 65, 75, 85, 50ХГ, 50С2, 55С2, 55С2А, 60С2, 60С2А по ГОСТ 14959 и др.

Свариваемость сталей указывается в марочниках наряду с другими технологическими свойствами стали (температурный интервал горячей обработки давлением, обрабатываемость резанием и др.).

2.5.2. Ручная дуговая сварка

Самым распространенным способом сварки плавлением является **ручная дуговая сварка** (РДС). Источником теплоты при дуговой сварке является **электрическая дуга**, которая горит между электродами. При этом часто один электрод представляет собой свариваемую заготовку.

Для РДС сталей применяют постоянный и переменный ток. При применении постоянного тока различают сварку на прямой и обратной полярностях (рис. 71).

При **прямой полярности** электрод подключается к (-) источника постоянного тока, Электрод служит **катодом**. При **обратной полярности** электрод подключают к (+), и он служит **анодом**. Прямая и обратная полярность имеют свои технологические особенности. Род тока и полярность оговаривается в справочной литературе по сварке сталей.

Электрическая дуга – мощный стабильный разряд электричества в ионизированной атмосфере газов и паров металла. Различные участки дуги имеют температуру 2400-7000⁰С. **Полная тепловая мощность Q дуги** (Дж/с).

$$Q = k \cdot J_{св} \cdot U_{д}, \quad (43)$$

где **k** – коэффициент несинусоидальности напряжения и тока (для постоянного тока k = 1; для переменного тока k = 0,7...0,97); **J_{св}** – **сварочный ток**, А; **U_д** – **напряжение дуги**, В.

Часть тепла дуги теряется в результате теплоотдачи в окружающую среду. Часть мощности дуги, расходуемая на нагрев заготовки, называется **эффективной тепловой мощностью q сварочной дуги**

$$q = \eta \cdot Q, \quad (44)$$

где η - коэффициент полезного действия дуги, зависит от способа сварки (автоматическая сварка под флюсом АДС $\eta = 0,9$; ручная дуговая сварка РДС $\eta = 0,7$).

При сварке постоянный ток предпочтителен в технологическом отношении по следующим причинам:

- повышается устойчивость горения дуги;
- улучшаются условия сварки в различных пространственных положениях;
- появляется возможность вести сварку на прямой и обратной полярностях.

В то же время в техническом отношении проще реализуется сварка переменным током, поскольку в этом случае достаточно иметь **сварочный трансформатор**. При сварке постоянным током необходимо иметь **генератор** или **выпрямитель**. Генераторы применяют при сварке в полевых условиях.

Сварочный пост - рабочее место сварщика оборудован специальным электропроводящим столом, источником электрического питания, системой приточно-вытяжной вентиляции.

РДС выполняют **сварочными электродами**, которые сварщик подает в дугу и перемещает вдоль заготовки вручную. Для удержания электрода и

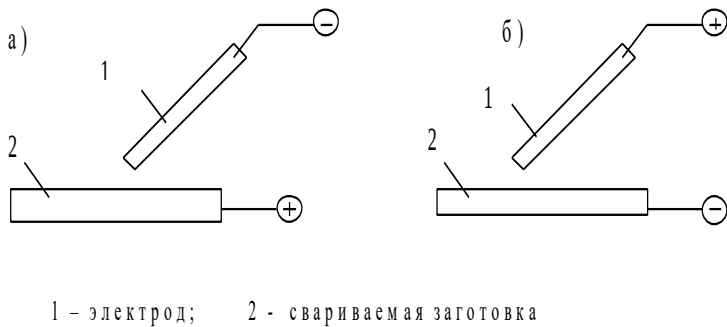


Рис. 71. Схема РДС плавающим электродом постоянным током прямой (а) и обратной (б) полярностей

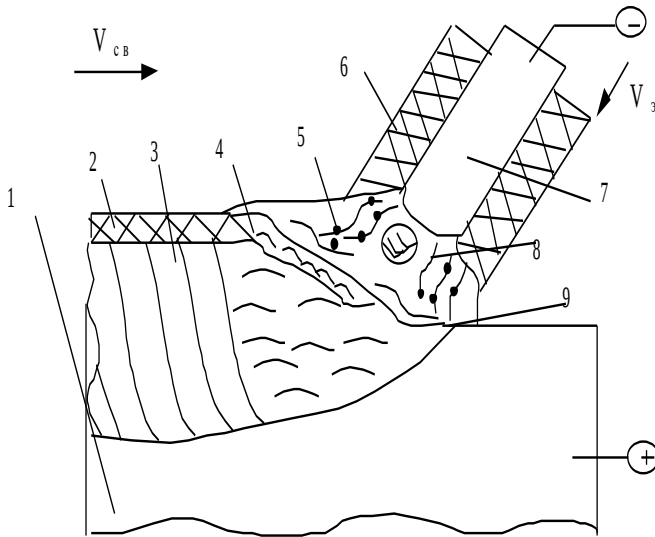


Рис. 72. Схема формирования сварочной ванны (4+9) при сварке покрытым электродом
 подвода к нему электрического тока сварщик использует **электрододержатель**

Сварщик защищает лицо от светового излучения дуги **предохранительным щитком** или **маской** с темным стеклом. Маска крепится на голове, щиток сварщик держит в руке. Тело и руки сварщика должны быть защищены брезентовой **спецодеждой** и **рукавицами**.

2.5.3. Электроды для РДС

На рис.72 представлена схема ручной дуговой сварки покрытыми электродами постоянным током прямой полярности.

Сварочная дуга 8 горит между металлическим стержнем 7 электрода (катод) и свариваемой заготовкой 1 (анод). Под действием тепла сварочной дуги стержень электрода плавится и каплями стекает в металлическую ванну 9, вместе со стержнем плавится и сгорает покрытие 6 электрода, образуя газовую защитную атмосферу 5 вокруг дуги. Одновременно с этим образуется жидкая шлаковая ванна 4 на поверхности расплавленной металлической ванны. Металлическая и шлаковая ванны вместе образуют **сварочную ванну**.

По мере движения дуги в направлении сварки (на рис. 72 вправо) сварочная ванна затвердевает, и образуется сварочный шов 3. Жидкий шлак по мере остывания образует на поверхности шва твердую шлаковую корку 2.

В сварочной ванне протекает ряд металлургических процессов: испарение или окисление (выгорание) некоторых легирующих элементов (С, Мн, Si, Cr и др.) и насыщение расплавленного металла газами (O_2 , H_2 , N_2) из окружающего воздуха.

В результате этих процессов изменяется состав металла сварного шва по сравнению с электродным и основным металлом, а также понижаются его механические свойства. Для обеспечения **равнопрочности** металла шва и основного металла в покрытие электрода вводят легирующие элементы и элементы – **раскислители**.

Электроды для РДС представляют собой проволочные стержни с нанесенным покрытием. Стержень электрода изготавливают из специальной сварочной проволоки из стали повышенного качества. ГОСТ 2246-70 предусматривает 56 марок стальной сварочной проволоки диаметром 0,3 – 12 мм. Все марки сварочной проволоки разделяют на 3 группы: углеродистую, легированную и высоколегированную.

По назначению стальные электроды по ГОСТ 9466 подразделяют на 4 класса:

- для сварки углеродистых и легированных конструкционных сталей (ГОСТ 9467);
- для сварки теплоустойчивых сталей (ГОСТ 9467);
- для сварки высоколегированных сталей (ГОСТ 10052);
- для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами (ГОСТ 1051).

Внутри каждого класса электроды делятся на типы (всего 73 типа).

Условное обозначение электродов для сварки конструкционных сталей состоит из обозначения марки электрода, типа электрода, диаметра стержня, типа покрытия, номера ГОСТа.

Пример: УОНИ – 13/45 – Э42А – 4,0 – Ф ГОСТ 9467-75

Расшифровка:

- УОНИ – 13/45 – марка электрода;
- Э42А - тип электрода (Э – электрод для дуговой сварки; 42 – гарантированный предел прочности металла шва в кгс/мм²; А – гарантируется получение повышенных пластических свойств металла шва);
- 4,0 – диаметр электродного стержня в мм;
- Ф – тип покрытия (фтористокальциевый).

Марка электрода (УОНИ – 13/45, АН-1, АНО-1, 03С-6 и др.) характеризует также его технологические свойства: род и полярность тока, возможность сварки в различных пространственных положениях, коэффициент наплавки и др. (оговорены в ГОСТе и справочной литературе по сварке).

2.5.4. Сварные соединения и сварные швы

Сварные соединения – неподвижные неразъемные соединения двух или более частей изделия, выполненные сваркой (рис.73).

По взаимному расположению соединяемых элементов различают 4 вида сварных соединений:

- **стыковые** соединения обозначаются С2...С21;
- **угловые** соединения обозначают У2...У10;
- **тавровые** соединения обозначают Т1...Т9;
- **нахлесточные** соединения обозначают Н1...Н3 .

Вид соединения выбирает конструктор из условия прочности и технологичности изделия. Под **прочностью** в данном случае понимается способность изделия воспринимать заданные нагрузки. Прочность обеспечивается соответствующими расчетами сварного соединения.

Под **технологичностью** понимается возможность получения изделия сваркой в условиях конкретного производства (машиностроительного, ремонтного и др.) с применением соответствующего металлорежущего и сварочного оборудования, оснастки и материалов.

Сварку выполняют сварными швами. **Сварной шов** – участок сварного соединения, непосредственно связывающий свариваемые элементы изделия.

По назначению различают сварные швы: **рабочие, связывающие, подварочные, монтажные.**

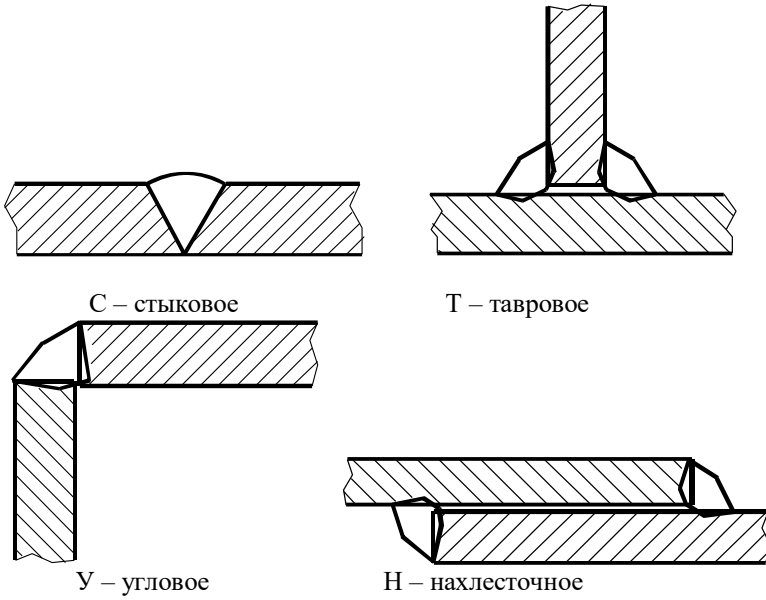


Рис. 73. Виды сварных соединений

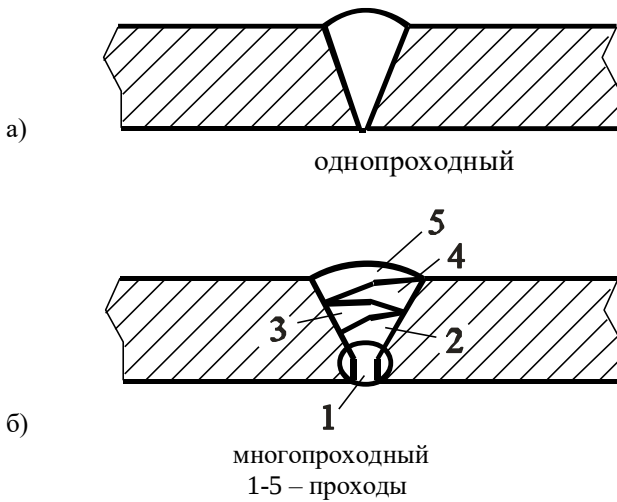


Рис. 74. Виды сварных швов по технологии нанесения

В зависимости от толщины соединяемых деталей кромки детали соответствующим образом разделяются, что отражается в обозначении швов на чертежах.

Технология наложения шва зависит от толщины соединяемых деталей (рис.74). Однопроходная сварка (рис. 74,а) производительна и экономична, но металл шва имеет грубую столбчатую структуру, у шва увеличенная зона перегрева. Однопроходные швы используются при толщине соединяемых деталей $s \leq 4 - 6$ мм.

При многослойной и многопроходной сварке (рис. 74,б) каждый нижележащий валик проходит термообработку при наложении последующего валика, что позволяет получить измельченную структуру металла шва и, соответственно, повышенные механические свойства металла шва. При толщине соединяемых деталей $s = 6 - 10$ мм, число проходов или слоев $n = 2 - 3$, при $s = 20$ мм, $n = 5 - 6$.

При выполнении многослойных (многопроходных) швов особое внимание следует уделять качественному выполнению первого валика в корне шва. ***Провар корня шва определяет прочность всего многослойного шва.***

РДС широко применяют в производстве металлоконструкций из разных металлов и сплавов малых и средних толщин $s = 2-30$ мм. РДС удобна при выполнении коротких ($l \leq 300$ мм) и криволинейных швов в любых пространственных положениях (рис. 2.5), а также при наложении швов в труднодоступных местах. РДС незаменима также при монтажных работах и сварке металлоконструкций сложной формы.

2.5. Выбор режима РДС

Основным выбираемым параметром РДС является диаметр $d_э$ электрода, который согласуется с толщиной соединяемых деталей (табл.31).

Таблица 31.

Выбор диаметра электрода при РДС

s, мм	1 - 2	3 - 5	4 - 10	15 – 24 и более
$d_э$, мм	2 - 3	3 – 4	4 - 5	5 - 6

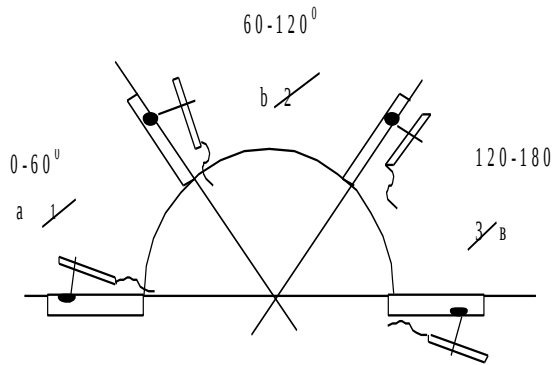


Рис. 75. Пространственное положение сварных швов при РДС: а - нижнее; б - вертикальное или горизонтальное; в - потолочное.

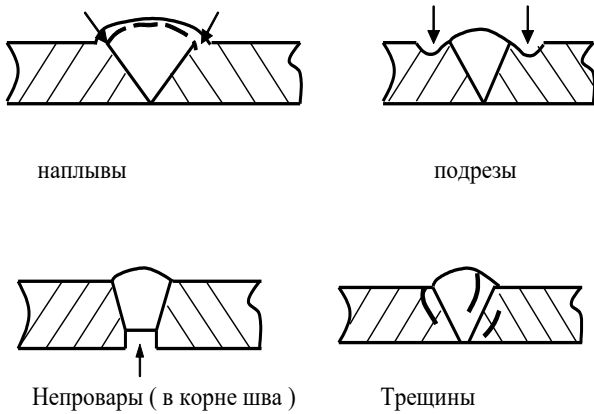


Рис. 76. Внешние дефекты сварных швов

Основным расчетным режимным параметром РДС является **сила сварочного тока J_{CB}** (в А), которая в зависимости от диаметра $d_э$ (в мм) и типа металла электрода определяют по эмпирической формуле

$$J_{CB} = k \cdot d_э, \quad (45)$$

где **k** - эмпирический коэффициент (для электродов со стержнем из низкоуглеродистой стали $k = 40-60$ А/мм; для электродов со стержнем из высоколегированной стали $k = 35-40$ А/мм).

Коррективы J_{CB} :

- $s < 1,5 d_э$ при сварке в нижнем положении, то $J_{CB} = (0,85 - 0,9) J_{CB \text{ расч}}$;
- $s > 3 d_э$ при сварке в нижнем положении, то $J_{CB} = (1,1 - 1,5) J_{CB \text{ расч}}$;
- при сварке на вертикальной плоскости J_{CB} уменьшает от расчетной на 10-15%, а для потолочных швов J_{CB} уменьшает на 15-20%.

2.5.6. Контроль качества сварки

Контроль качества сварки является основой эффективного использования этого технологического метода, как при изготовлении новых изделий, так и при ремонте оборудования. Проверка качества сварки присутствует на всех стадиях технологического процесса и предусматривает: предварительный контроль, текущий контроль и проверку качества сварки в готовом изделии.

Предварительный контроль предполагает проверку качества основного металла, сварочных материалов (электродов, сварочной проволоки, флюса и т.д.), заготовок, поступающих на сборку, состояние сварочной аппаратуры, качество сборки и квалификацию сварщиков.

Качество основного металла должно соответствовать требованиям **сертификата**, который заводы-поставщики должны предоставлять вместе с партией металла. Металл, не имеющий сертификата, подлежит проверке: химический состав, механические свойства, свариваемость.

Текущий контроль выполняется сварщиком и мастером. Перед тем, как приступить к сварке, сварщик знакомится с технологическими картами, в которых указывают последовательность операций, диаметр и марку применяемых электродов, режимы сварки и требуемые размеры сварных швов. Режим сварки контролируют по показаниям **амперметра** (J_{CB}) и **вольтметра** (U_{CB}).

Проверка качества шва в готовом изделии. После того как закончена сварка изделия, сварные швы зачищают от шлака, наплывов, а поверхность изделия – от брызг металла. Затем готовое изделие проходит ряд контрольных операций.

Внешний осмотр и обмер сварных швов. Внешним (визуальным) осмотром оценивается соответствие шва геометрическим размерам, заданным на чертеже. Наплывы, подрезы, глубокие кратеры, прожоги, наружные трещины, непровары, свищи, поры и др. внешние дефекты (рис. 76) выявляются при визуальном осмотре.. Для контроля размеров сварного швов при этом используются *шаблоны*.

Контроль плотности швов выполняют для изделий, к которым предъявляют требования герметичности: емкости для горюче-смазочных материалов, воды, трубопроводы, газгольдеры, паровые котлы, технологические емкости и др. Существует много способов контроля плотности сварных швов: *гидравлическое испытание; пневматическое испытание; вакуумное испытание; испытание керосином, аммиаком; испытание с помощью течеискателей.*

Механические испытания сварочных швов и изделий. Кроме механических свойств металла шва во многих случаях надо определить и механические свойства сварного соединения в целом. При этом сравнивают прочность металла шва с прочностью основного металла и металла зоны термического влияния. Наплавленный металл часто является слабым местом сварного соединения.

При сварке ответственных изделий изготавливают контрольные образцы, результаты испытаний которых являются критерием качества сварки.

Характер механических испытаний образцов зависит от характера нагрузки, воспринимаемой сварным соединением. Порядок механических испытаний сварных швов и соединений регламентирован ГОСТ 6996.

Для определения прочности металла шва **Св** используют образцы с инициированием разрушения по шву (рис.77). Усиление шва в виде валиков перед испытанием снимается механической обработкой

$$\sigma_B = k \cdot \frac{P_{\max}}{F_{\min}}, \quad (46)$$

где $F_{\min} = (a \times b)$ – площадь наименьшего поперечного сечения образца до испытания;

k – поправочный коэффициент (для углеродистых и низколегированных сталей $k = 0,9$).

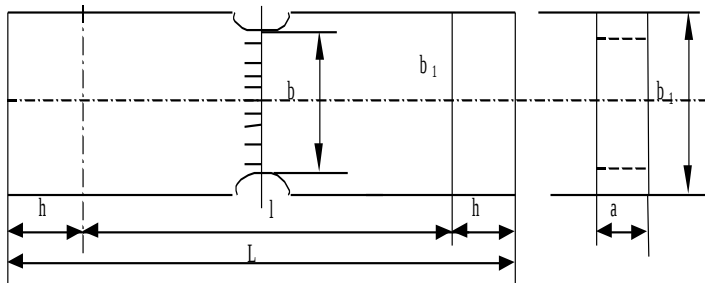


Рис. 77. Образец для определения прочности металла сварного шва

На рисунке: b_1 , h – размеры захватной части, l – длина рабочей части.

Для контроля качества сварных швов используются также **неразрушающие методы контроля**. Наиболее распространенными являются следующие физические методы контроля: **просвечивание рентгеновскими и гамма лучами; ультразвуковая дефектоскопия; люминесцентный метод; магнитный метод; металлография**.

Набор методов контроля качества сварных швов оговаривается в технических условиях. Контроль качества сварных швов с выдачей соответствующих заключений имеют право проводить специализированные сертифицированные испытательные лаборатории.

3. Контрольная работа по курсу МиТКМ для студентов заочного факультета специальностей 1004, 1007, 1908, 2102

Контрольная работа включает в себя теоретическую и практическую части.

Вариант задания теоретической части контрольной работы выбирается студентом по шифру зачетной книжки (первая и две последних цифры шифра). При этом две последние цифры шифра определяют вариант задания (табл. 32), а первая – набор вопросов (табл.33).

Таблица 32.

Варианты задания теоретической части контрольной работы

б a	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1	11	2	12	3	13	4	14	5	15
1	2	12	3	13	4	14	5	15	6	16
2	3	13	4	14	5	15	6	16	7	17
3	4	14	5	15	6	16	7	17	8	18
4	5	15	6	16	7	17	8	18	9	19
5	6	16	7	17	8	18	9	19	10	20
6	7	17	8	18	9	19	10	20	1	11
7	8	18	9	19	10	20	1	11	2	12
8	9	19	10	20	1	11	2	12	3	13
9	10	20	1	11	2	12	3	13	4	14
Примечание: а,б – последняя и предпоследняя цифра зачетной книжки										

Таблица 33.

Номера вопросов теоретической части контрольной работы

вар	Вопросы					вар	Вопросы				
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
специальность 1004 (первая цифра шифра 1)											
1	1.2	2.3	3.4	5.1	11	1.1	2.10	3.5	7.3		
2	1.3	2.4	3.5	5.2	12	1.10	2.9	3.6	7.4		
3	1.4	2.5	3.6	5.3	13	1.9	2.8	3.7	7.5		
4	1.5	2.6	3.7	5.4	14	1.8	2.7	3.8	8.1		
5	1.6	2.7	3.8	6.1	15	1.7	2.6	3.9	8.2		
6	1.7	2.8	3.9	6.2	16	1.6	2.5	3.10	8.3		
7	1.8	2.9	3.10	6.3	17	1.5	2.4	3.4	8.4		
8	1.9	2.10	3.1	6.4	18	1.4	2.3	3.3	5.1		
9	1.10	2.1	3.2	7.1	19	1.3	2.2	3.2	5.2		
10	1.1	2.2	3.3	7.2	20	1.2	2.1	3.1	5.3		

1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
<i>специальность 1007 (первая цифра шифра 2)</i>									
1	1.3	2.10	3.5	8.1	11	1.2	2.10	3.8	6.2
2	1.4	2.9	3.6	8.2	12	1.1	2.9	3.9	6.3
3	1.5	2.8	3.7	8.3	13	1.10	2.8	3.10	6.4
4	1.6	2.7	3.8	8.4	14	1.9	2.7	3.1	5.1
5	1.7	2.6	3.9	7.1	15	1.8	2.6	3.2	5.2
6	1.8	2.5	3.10	7.2	16	1.7	2.5	3.3	5.3
7	1.9	2.4	3.1	7.3	17	1.6	2.4	3.4	5.4
8	1.10	2.3	3.2	7.4	18	1.5	2.3	3.5	8.1
9	1.1	2.2	3.3	7.5	19	1.4	2.2	3.6	8.2
10	1.2	2.1	3.4	6.1	20	1.3	2.1	3.7	8.3
<i>специальность 1908 (первая цифра шифра 9)</i>									
1	1.4	2.6	3.10	7.1	11	1.1	2.6	3.5	6.2
2	1.5	2.7	3.9	7.2	12	1.2	2.7	3.6	6.3
3	1.6	2.8	3.8	7.3	13	1.3	2.8	3.7	6.4
4	1.7	2.9	3.7	7.4	14	1.4	2.9	3.8	5.1
5	1.8	2.10	3.6	7.5	15	1.5	2.10	3.9	5.2
6	1.9	2.1	3.5	8.1	16	1.6	2.1	3.10	5.3
7	1.10	2.2	3.4	8.2	17	1.7	2.2	3.1	5.4
8	1.1	2.3	3.3	8.3	18	1.8	2.3	3.2	7.1
9	1.2	2.4	3.2	8.4	19	1.9	2.4	3.3	7.2
10	1.3	2.5	3.1	6.1	20	1.10	2.5	3.4	7.3
<i>специальность 2102 (первая цифра шифра 5)</i>									
1	1.1	2.1	3.1	4.1	11	1.10	2.1	3.7	4.10
2	1.2	2.2	3.2	4.2	12	1.9	2.2	3.8	4.9
3	1.3	2.3	3.3	4.3	13	1.8	2.3	3.9	4.8
4	1.4	2.4	3.4	4.4	14	1.7	2.4	3.10	4.7
5	1.5	2.5	3.5	4.5	15	1.6	2.5	3.1	4.6
6	1.6	2.6	3.6	4.6	16	1.5	2.6	3.2	4.5
7	1.7	2.7	3.7	4.7	17	1.4	2.7	3.3	4.4
8	1.8	2.8	3.8	4.8	18	1.3	2.8	3.4	4.3
9	1.9	2.9	3.9	4.9	19	1.2	2.9	3.5	4.2
10	1.10	2.10	3.10	4.10	20	1.1	2.10	3.6	4.1

В контрольной работе необходимо решить 3 задачи. Варианты исходных данных в задачах выбираются студентом по шифру зачетной

книжки. Правила выбора исходных данных для задач изложены по тексту задач.

Контрольная работа выполняется студентом в тетради. **В начале решения указываются номера теоретических вопросов и варианты исходных данных задач.**

Ответы на вопросы и решение задач должны содержать необходимые пояснения, схемы и расчеты. Текстовая часть работы выполняется с соблюдением норм русского языка. При ответе на вопросы и решении задач необходимо использовать не только данное учебное пособие, но и другую учебную и справочную литературу, приведенную в библиографическом списке. **В конце контрольной работы приводится список использованной литературы** (см. описание литературных источников в конце пособия).

Если при проверке контрольной работы рецензентом сделаны замечания, то студент выполняет в этой же тетради **работу над ошибками**, в которой вносит исправления в контрольную работу и повторно сдает ее на проверку.

3.1. Теоретические вопросы контрольной работы

В теоретической части контрольной работы необходимо ответить на 4 вопроса тем 1 – 8.

Тема 1. Теория сплавов

1. Вычертите диаграмму «Fe – Fe₃C», укажите структурные составляющие железоуглеродистых сплавов во всех областях диаграммы.
2. Для сплава, содержащего **X(%)** углерода (табл. 34) определите критические температуры, постройте кривую охлаждения и опишите превращения в сплаве при критических температурах. Для проверки правильности построения кривой охлаждения используйте правило фаз.
3. Поясните, какова структура этого сплава при комнатной температуре и как такой сплав называется?

Таблица 34.

Варианты содержания углерода в сплаве

вар	X	вар	X	вар	X	вар	X	вар	X
1.1	0,4	1.3	0,8	1.5	1,4	1.7	3,6	1.9	4,8
1.2	0,5	1.4	1,1	1.6	2,2	1.8	4,3	1.10	5,0

Тема 2. Пластическая деформация, механические свойства, рекристаллизация

- 2.1. Дайте определение ударной вязкости. Опишите методику определения этой характеристики механических свойств металла. Поясните возможности оценки надежности металла с помощью показателя KCU.
- 2.2. Дайте определение твердости. Опишите методы определения твердости Бринелля и Роквелла.
- 2.3. Дайте определение прочности и пластичности металла. Опишите методику определения характеристик прочности и пластичности металла при испытании на растяжение.
- 2.4. Опишите сущность явления наклепа и примеры его практического использования в технике.
- 2.5. Волочение медной проволоки проводят в несколько проходов. В некоторых случаях, при нарушении технологии, на последних проходах проволока разрывается. Объясните причину разрыва и укажите способ его предупреждения.
- 2.6. Как изменяются свойства деформированного металла при нагревании, какие процессы происходят при этом?
- 2.7. В чем различие между упругой и пластической деформацией, между хрупким и вязким разрушением?
- 2.8. Каким видом пластической деформации (холодной или горячей) является деформирование железа при температуре 500°C? Объясните, как при этом изменяется структура и свойства железа?
- 2.9. Что такое дислокация? Как и почему изменяется плотность дислокаций при пластической деформации металла? Как влияет плотность дислокаций на прочностные свойства металла?
- 2.10. Опишите явление полиморфизма на примере железа. Укажите температурные интервалы существования разных кристаллических модификаций, изобразите соответствующие им кристаллические ячейки.

Тема 3. Термическая обработка стали

- 3.1. Для вала диаметром 20 мм из стали 40 выбрать режим термической обработки (закалка+отпуск). Опишите сущность превращений в стали при закалке и отпуске и какую структуру будет иметь металл после назначенной термообработки.
- 3.2. Для оси диаметром 15 мм из стали 45 выбрать режим термической обработки (закалка+отпуск). Опишите сущность превращений в стали

при закалке и отпуске и какую структуру будет иметь металл после назначенной термообработки.

3.3. Для вала диаметром 20 мм из стали 50 выбрать режим термической обработки (закалка+отпуск). Опишите сущность превращений в стали при закалке и отпуске и какую структуру будет иметь металл после назначенной термообработки.

3.4. Для пружины из стали 65 с диаметром проволоки 12 мм выбрать режим термической обработки (закалка+отпуск), обеспечивающий наивысшие упругие свойства металла. Опишите сущность превращений в стали при закалке и отпуске и какую структуру будет иметь металл после назначенной термообработки.

3.5. Для пружины из стали 70 с диаметром проволоки 10 мм выбрать режим термической обработки (закалка+отпуск), обеспечивающий необходимые упругие свойства металла. Опишите сущность превращений в стали при закалке и отпуске и какую структуру будет иметь металл после назначенной термообработки.

3.6. Для режущего инструмента из стали У7А с линейным размером 15 мм выбрать режим термической обработки (закалка+отпуск), обеспечивающий максимальную твердость режущей кромки. Опишите сущность превращений в стали при закалке и отпуске и какую структуру будет иметь металл после назначенной термообработки.

3.7. Для режущего инструмента из стали У8А с линейным размером 12 мм выбрать режим термической обработки (закалка+отпуск), обеспечивающий максимальную твердость режущей кромки. Опишите сущность превращений в стали при закалке и отпуске и какую структуру будет иметь металл после назначенной термообработки.

3.8. Для режущего инструмента из стали У9А с линейным размером 10 мм выбрать режим термической обработки (закалка+отпуск), обеспечивающий максимальную твердость режущей кромки. Опишите сущность превращений в стали при закалке и отпуске и какую структуру будет иметь металл после назначенной термообработки.

3.9. Для мерительного инструмента из стали У10А с линейным размером 15 мм выбрать режим термической обработки (закалка+отпуск), обеспечивающий максимальную твердость и стабильность размеров. Опишите сущность превращений в стали при закалке и отпуске и какую структуру будет иметь металл после назначенной термообработки.

3.10. Для мерительного инструмента из стали У12А с линейным размером 10 мм выбрать режим термической обработки (закалка+отпуск), обеспечивающий максимальную твердость и стабильность размеров. Опишите сущность превращений в стали при закалке и отпуске и какую структуру будет иметь металл после назначенной термообработки.

Тема 4. Цветные металлы и сплавы, неметаллические материалы

- 4.1. Алюминий и сплавы на его основе. Маркировка. Литейные алюминиевые сплавы.
- 4.2. Алюминий и сплавы на его основе. Маркировка. Деформируемые алюминиевые сплавы, упрочняемые термообработкой.
- 4.3. Медь: свойства, применение. Бронзы: маркировка, области применения.
- 4.4. Медь: свойства, применение. Сплавы с Zn и Ni: маркировка, области применения.
- 4.5. Подшипниковые сплавы на Sn, Pb, Zn и Al основах. Маркировка, области применения.
- 4.6. Припои. Состав, маркировка, применение.
- 4.7. Пластические массы. Состав, классификация, свойства и области применения.
- 4.8. Резиновые материалы. Состав, классификация резин. Физико-механические свойства резин и их применение.
- 4.9. Неорганические материалы. Неорганическое стекло, ситаллы, керамические материалы. Область применения.
- 4.10. Композиционные материалы. Виды, свойства, область применения.

Тема 5. Металлургическое и литейное производство

- 5.1. Доменное производство: оборудование, материалы, технологический процесс, продукция.
- 5.2. Производство стали: сущность процесса, производство стали в кислородных конвертерах.
- 5.3. Литейное производство: строение стального слитка, сущность технологического процесса получения слитков.
- 5.4. Литейное производство: сущность технологического процесса получения отливок.

Тема 6. Обработка металлов давлением

- 6.1. Прокатное производство: сущность процесса, оборудование и инструмент, термический режим, продукция.

6.2. Ковка: сущность процесса, оборудование, основные переходы и применяемый инструмент.

6.3. Штамповка. Холодная листовая штамповка: формоизменяющие и разделительные операции, оборудование.

6.4. Методы производства машиностроительных профилей: прессование, волочение, производство гнутых профилей.

Тема 7. Обработка заготовок деталей машин резанием

7.1. Опишите сущность точения: схема обработки, элементы режима резания, оборудование, режущий инструмент, технологические возможности метода обработки.

7.2. Опишите сущность фрезерования: схема обработки, элементы режима резания, оборудование, режущий инструмент, технологические возможности метода обработки.

7.3. Опишите сущность сверления: схема обработки, элементы режима резания, оборудование, режущий инструмент, технологические возможности метода обработки.

7.4. Опишите сущность плоского шлифования: схема обработки, элементы режима резания, оборудование, режущий инструмент, технологические возможности метода обработки.

7.5. Методы обработки заготовок без снятия стружки: сущность процессов, применение.

Тема 8. Сварочное производство

8.1. Дуговая сварка: сущность процесса, классификация способов сварки.

8.2. РДС. Оборудование сварочного поста. Сварочные электроды. Выбор режима сварки.

8.3. Свариваемость сталей. Сварка углеродистых и легированных сталей.

8.4. Классификация сварных соединений и сварных швов. Контроль качества сварки.

3.2. Задачи контрольной работы

Задача № 1.

Постройте диаграмму состояния двойного сплава **А – В** согласно варианту задания (табл.35, 36). При построении используйте данные таблиц 37, 38. На диаграмме состояния укажите фазовый состав сплавов в областях диаграммы. Для сплава концентрации **X(%)** компонента **А** проанализируйте фазовый состав сплава при

температуре t_x ($^{\circ}\text{C}$), используя правило концентраций и правило отрезков.

Таблица 35.

Выбор варианта задачи №1

$\begin{smallmatrix} \text{б} \\ \text{а} \end{smallmatrix}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
1	5	6	7	5	6	7	5	6	7	5
2	8	9	10	8	9	10	8	9	10	8
3	11	12	13	11	12	13	11	12	13	11
4	14	15	16	14	15	16	14	15	16	14
5	17	18	19	17	18	19	17	18	19	17
6	20	21	22	20	21	22	20	21	22	20
7	23	24	25	23	24	25	23	24	25	23
8	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3
9	6	7	5	6	7	5	6	7	5	6
Примечание: а,б – последняя и предпоследняя цифра зачетной книжки										

Таблица 36.

Варианты исходных данных для задачи №1

вар	A – B	X	t_x	вар	A – B	X	t_x
1	Ag – Cu	20	900	14	Al – Si	80	600
2	Ag – Cu	25	850	15	Al – Si	50	800
3	Ag – Cu	30	825	16	Al – Si	30	1000
4	Ag – Cu	35	800	17	Sn – Zn	80	210
5	Cu – Ni	70	1150	18	Sn – Zn	70	250
6	Cu – Ni	50	1200	19	Sn – Zn	30	300
7	Cu – Ni	30	1300	20	Cd – Zn	50	300
8	Pb – Sb	70	300	21	Cd – Zn	40	325
9	Pb – Sb	60	350	22	Cd – Zn	70	350
10	Pb – Sb	40	400	23	Bi – Sb	80	350
11	Sn – Pb	30	250	24	Bi – Sb	90	400
12	Sn – Pb	40	225	25	Bi – Sb	30	500
13	Sn – Pb	50	200				

Таблица 37.

Температура плавления чистых компонентов сплавов

Компонент	Символ	$t_{пл}, ^{\circ}\text{C}$	Компонент	Символ	$t_{пл}, ^{\circ}\text{C}$
1	2	3	1	2	3
Алюминий	Al	660	Олово	Sn	232
Висмут	Bi	271	Свинец	Pb	327
Медь	Cu	1084	Серебро	Ag	962

1	2	3	1	2	3
Никель	Ni	1455	Сурьма	Sb	631
Кадмий	Cd	321	Цинк	Zn	419
Кремний	Si	1440			

Таблица 38.

**Эвтектическая температура и эвтектическая
концентрация сплавов**

Варианты	Система	Максимальная растворимость, %		Эвтектика	
		A(B)	B(A)	B, %	t _{эвт} , °C
1 – 4	Ag – Cu	9	8	28	780
8 – 10	Pb – Sb	3,5	5	13	247
11 – 13	Sn – Pb	2,6	19,5	38	183
14 – 16	Al – Si	1,4	0	11,7	578
17 – 19	Sn – Zn	-	-	8	199
20 – 22	Cd – Zn	2,2	2,9	17,4	266

Задача №2.

1. Определите согласно варианту задания (табл. 39,40) количество углерода в доэвтектоидной стали, если перлита в ней **X(%)**.
2. Как маркируется эта сталь по ГОСТ 1050?
3. Определите механические свойства заданной стали (σ_B , δ в вариантах 1-25 или HB, Ψ в вариантах 26-50), используя правило Н.С.Курнакова.

Таблица 39.

варианты задачи №2

$\begin{matrix} \text{б} \\ \text{a} \end{matrix}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1	11	21	31	41	1	11	21	31	41
1	2	12	22	32	42	2	12	22	32	42
2	3	13	23	33	43	3	13	23	33	43
3	4	14	24	34	44	4	14	24	34	44
4	5	15	25	35	45	5	15	25	35	45
5	6	16	26	36	46	6	16	26	36	46
6	7	17	27	35	47	7	17	27	35	47

7	8	18	28	38	48	8	18	28	38	48
$\begin{matrix} \text{б} \\ \text{а} \end{matrix}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	9	19	29	39	49	9	19	29	39	49
9	10	20	30	40	50	10	20	30	40	50

Примечание: а, б – последняя и предпоследняя цифра зачетной книжки

Таблица 40.

Исходные данные для задачи №2

вар	X	вар	X	вар	X	вар	X
1 и 26	5	8 и 33	22,5	15 и 40	45	22 и 47	80
2 и 27	7,5	9 и 34	25	16 и 41	50	23 и 48	85
3 и 28	10	10 и 35	25,5	17 и 42	55	24 и 49	90
4 и 29	12,5	11 и 36	27	18 и 43	60	25 и 50	95
5 и 30	15	12 и 37	30	19 и 44	65		
6 и 31	17,5	13 и 38	35	20 и 45	70		
7 и 32	20	14 и 39	40	21 и 46	75		

Задача №3.

1. Расшифруйте (табл.41) 10 марок сталей согласно шифру зачетной книжки. Стали марок №1,5,7, 9,10 выбираются последней цифре шифра, остальные (№2, 3, 4, 6, 8) - по предпоследней цифре шифра.

2. Опишите примерную область использования каждой стали и ее основные технологические свойства (температурный интервал горячей обработки давлением, обрабатываемость резанием, свариваемость, прокаливаемость, жидкотекучесть и др.), существенные для данной стали.

3. Поясните, чем обусловлено основное эксплуатационное свойство каждой стали (прочность, хладостойкость, коррозионная стойкость, красностойкость, теплостойкость, жаропрочность, жаростойкость и др.).

При решении задачи аргументируйте свою точку зрения, ориентируясь на химический состав стали и функциональную группу (конструкционная, инструментальная, специальная), к которой она относится.

Таблица 41.

Марки стали

а,б	№1 (а)	№2 (б)	№3 (б)	№4 (б)	№5 (а)
0	08	Ст5сп	12МХ	09Г2С	У7
1	10	Ст3сп	12Х1МФ	12ГС	У8
2	15	Ст4пс	25Х1МФ	10ХСНД	У9
3	20	Ст6сп	25Х2М1Ф	14Г2	У10

а,б	№1 (а)	№2 (б)	№3 (б)	№4 (б)	№5 (а)
4	08	Ст3Гпс	15ХМ	35ГС	У12
5	10	Ст5сп	15Л	25Г2С	У7
6	15	Ст4пс	20Л	12ГС	У8
7	20	Ст6сп	25Л	10ХСНД	У9
8	08	Ст3Гпс	30Л	14Г2	У10
9	10	Ст3сп	35Л	35ГС	У12

Таблица 41.

Продолжение

а,б	№6 (б)	№7 (а)	№8 (б)	№9 (а)	№10 (а)
0	P6M5K5	9Х1	30	30Х	20Х13
1	P9	ХВ4	35	35Х	30Х13
2	P9M4K8	9ХС	40	40Х	40Х13
3	P18	ХВГ	45	45Х	20Х23Н13
4	P6M5K5	9ХВГ	50	50Х	20Х25Н20С2
5	P9	9Х1	30	30ХГС	12Х18Н9
6	P9M4K8	ХВ4	35	35ХГСА	12Х18Н12Т
7	P18	9ХС	40	40ХН	08Х18Н10Т
8	P6M5K5	ХВГ	45	45ХН	06Х23Н28МДТ
9	P9	9ХВГ	50	50ХН	17Х18Н9
Примечание: а,б – последняя и предпоследняя цифра зачетной книжки					

3.3. Методические указания по выполнению контрольной работы

3.3.1. Построение кривой охлаждения сплава

При ответе на **вопрос темы 1** необходимо перерисовать диаграмму «Fe-Fe₃C» в масштабе, достаточном, чтобы на ней можно было указать структурно-фазовый состав сплава в областях диаграммы. Построение следует выполнять карандашом.

По варианту задания необходимо выбрать сплав, имеющий заданную концентрацию углерода. Построить сечение диаграммы вертикальной линией сплава, зафиксировав при этом точки пересечения линий диаграммы с линией сплава. Эти точки являются критическими температурами исследуемого сплава.

Справа от диаграммы «Fe-Fe₃C» в тетради на поле чертежа построить кривую охлаждения заданного сплава, опираясь на выявленные критические точки. Оси ординат кривой охлаждения и диаграммы «Fe-Fe₃C» должны иметь одинаковый масштаб. При достижении сплавом критической температуры на кривой охлаждения

должно иметь место изменение хода зависимости «температура – время», которое выражается либо изменением угла наклона кривой охлаждения к оси абсцисс, либо наличием на ней горизонтальной площадкой.

Для каждого участка кривой охлаждения, заключенного между соседними критическими температурами, укажите число степеней свободы сплава (системы) см 1.4.2.

3.3.2. Выбор режима термической обработки изделия

В теме №3 предлагается выбрать режим термической обработки изделия: силового элемента (вал, ось), пружины или инструмента (мерительного или режущего).

Любая операция термической обработки включает три последовательных перехода: нагрев, выдержку и охлаждение.

Для термического упрочнения деталей машин и инструмента применяется двойная термическая обработка (табл.13), поэтому при ответе на вопрос необходимо выбрать режим закалки и отпуска.

Выбор режима термообработки предполагает назначение температуры нагрева, времени выдержки в печи и скорости охлаждения, которая регламентируется выбором соответствующего охладителя.

Закалка - является основной упрочняющей термической обработкой деталей машин и инструментов без изменения химического состава металла и формы изделия.

Температура закалки t_3 выбирается с учетом необходимости полной аустенизации при нагреве доэвтектоидных сталей и неполной аустенизации заэвтектоидной стали.

Доэвтектоидные стали (см. табл.9)

$$t_3 = A_{c3} + 30 \dots 50^0 \text{ C}$$

Заэвтектоидные стали (см. табл.9)

$$t_3 = A_{c1} + 30 \dots 50^0 \text{ C}$$

где A_{c3} – температура превращения феррита в аустенит $\alpha \rightarrow \gamma$ (табл. 8); $A_{c1} = 727^0 \text{ C}$ – эвтектоидная температура $\alpha \rightarrow \gamma$ полиморфного превращения перлита в аустенит (табл. 8).

Время выдержки τ изделия в печи складывается из времени нагрева τ_H и времени превращения феррита в аустенит $\tau_{ПР}$

$$\tau = \tau_H + \tau_{ПР}$$

Время нагрева τ_H определяется габаритами закаливаемых изделий и способами укладки их в нагревательной печи

$$\tau_H = k \cdot d, \text{ мин}$$

где $k = 1 \dots 1,5$ мин/мм – числовой коэффициент ($k = 1$ для углеродистой стали, $k = 1,5$ для легированной стали); d – линейный размер (диаметр, толщина) закаливаемого изделия, мм.

$\tau_{\text{пр}} = 1 \dots 2$ мин – время фазового $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения.

Охладителем при закалке является вода (стали 40, 45, 50) или масло (стали 65, 70, У7А-У12А).

В результате закалки происходит **мартенситное превращение**, которое представляет собой мгновенную перестройку ГЦК решетки Fe γ в ОЦК решетку путем сдвига атомов железа и углерода на расстояния, не превышающие межатомные. В процессе такого превращения диффузия углерода не успевает произойти, формируется пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе – **мартенсит закалки**, имеющий тетрагональную кристаллическую решетку.

Являясь пересыщенным твердым раствором углерода, мартенсит закалки не обладает стабильностью и достаточной пластичностью. Кроме того, возникающие при термообработке **остаточные закалочные напряжения** могут вызвать с течением времени деформацию, коробление и даже разрушение закаленных изделий.

Отпуск стали необходим и обязателен для стабилизации структуры и размеров изделий, повышения пластичности и уменьшения внутренних напряжений. Отпуск обеспечивает получение требуемого сочетания механических свойств металла за счет регулируемого температурой отпуска снижения твердости (прочности) и повышения пластичности стали.

Скорость охлаждения после отпуска не изменяет структуры стали, однако, во избежание термических напряжений, охлаждение изделий после отпуска ведут на воздухе; лишь легированные стали (30ХГС, 35ХГСА, 35Г2, 45Г2 и др.), склонные к отпускной хрупкости, после отпуска охлаждают в воде.

В зависимости от назначения по температуре нагрева различают три вида отпуска.

Низкий отпуск – нагрев закаленной стали до 150-200° С, выдержка до 8 часов. Проводится с целью снятия внутренних напряжений при сохранении высокой твердости. После низкого отпуска закаленная сталь имеет структуру **мартенсита отпуска**. Применение: для измерительного, режущего и деформирующего (холодная штамповка) инструмента (заэвтектоидные стали); для деталей после химико-термической обработки-цементации (низкоуглеродистые стали 0,1-0,3% С).

Средний отпуск – нагрев закаленной стали до 300-400°С, выдержка до 1 часа. Проводится с целью повышения вязкости при сохранении высокой упругости. После среднего отпуска закаленная сталь имеет структуру **троостита отпуска**. Применение: детали,

работающие в условиях знакопеременных напряжений (рессорно-пружинные стали с содержанием углерода 0,5-0,7%).

Высокий отпуск – нагрев закаленной стали до 450-650°C, выдержка до 1 часа. Проводится с целью оптимального сочетания вязкостно-пластических и прочностных свойств стали. После высокого отпуска закаленная сталь имеет структуру **сорбита отпуска**. Применение: детали машин, испытывающие при эксплуатации знакопеременные и ударные нагрузки: валы, оси, зубчатые колеса, шатуны и т.п. (среднеуглеродистые стали 0,3-0,5% C). Закалку с высоким отпуском называют термическим улучшением или короче – **улучшением стали**. Улучшение позволяет повысить конструктивную прочность стали, т.е. прочность, показываемую сталью в готовом изделии. Повышение конструктивной прочности улучшенной стали обусловлено ее пониженной чувствительностью к концентраторам напряжений (отверстия, переходы сечения в детали и др.).

При ответе на вопрос темы № 3 необходимо: обоснованно назначить режим закалки и отпуска заданной детали; описать сущность превращений в стали при закалке и отпуске; описать структуру, которую будет иметь сталь после назначенной термической обработки.

3.3.3. Построение диаграммы состояния двухкомпонентного сплава, анализ фазового состава сплава

В задаче №1 предлагается построить диаграмму состояния двойного сплава по опорным точкам, которые выбираются из таблиц 35, 36.

Опорными точками диаграммы состояния являются:

- точки кристаллизации чистых компонентов $\{100\% A, t_{пл}(A)\}, \{100\% B, t_{пл}(B)\}$;
- точка кристаллизации эвтектического сплава $\{\% B, t_{эвт}\}$;
- точки максимальной взаимной растворимости компонентов $\{\% A(B), t_{эвт}\}; \{\% B(A), t_{эвт}\}$;

Диаграмму состояния следует строить на линованной бумаге размером не менее 100x100 мм. Для построения диаграммы состояния опорные точки следует нанести на поле диаграммы и соединить плавными линиями.

Системы Ag-Cu (вар. 1-4), Pb-Sb (вар. 8-10), Sn-Pb (вар. 11-13) и Cd-Zn (вар. 20-22) образуют сплавы с ограниченной растворимостью в твердом состоянии. Диаграмма состояния сплавов этого типа имеет эвтектическую прямую (изотерма $t_{эвт} = const$) между точками предельной взаимной растворимости компонентов сплава $A(B)$, $B(A)$.

Запись $A(B)$ означает твердый сплав, в котором компонент B растворен в компоненте A .

Система Sn-Zn (вар. 17-19) образует сплавы, у которых отсутствует растворимость компонентов в твердом состоянии. Диаграмма состояния сплавов этого типа имеет эвтектическую прямую (изотерма $t_{\text{эвт}} = \text{const}$) на всем протяжении оси абсцисс диаграммы состояния. На диаграммах этого типа нет линий предельной растворимости в твердом состоянии (сольвус).

Системы Cu-Ni (вар. 5-7), Bi-Sb (вар. 23-25) образуют непрерывный ряд твердых растворов. Диаграмма состояния сплавов такого типа имеет две опорные точки – точки кристаллизации чистых компонентов, между которыми проводят линию ликвидус выпуклостью вверх и солидус выпуклостью вниз.

После построения диаграммы состояния сплава ее опорные точки обозначаются заглавными буквами латинского алфавита (A, B, C, D, E, F).

Описание диаграммы состояния включает в себя: наименованием линий диаграммы (ликвидус, солидус, сольвус); обозначение фаз в фазовых областях (L – жидкая фаза находится выше линии ликвидус; твердые растворы обозначаются α , β ; эвтектика – $(\alpha + \beta)$; вторичные фазы – α_{II} , β_{II}).

Для анализа фазового состава сплава на поле диаграммы необходимо найти заданную точку k сплава. Для этого по заданной концентрации $X\%$ компонента A к оси абсцисс строится вертикаль, по заданной температуре t_X строится изотерма. Пересечение этих линий и даст точку k сплава, она находится в двухфазной области (жидкость, твердое).

Фазовый анализ сплава состоит в *определении состава каждой фазы* в точке k и в *определении их количества* (относительного).

Фазовый анализ выполняется с помощью правила отрезков в следующей последовательности:

- строится конода akb – часть изотермы t_X , лежащая внутри рассматриваемой области диаграммы между точками на линии ликвидус (точка a) и на линии солидус (точка b).
- абсциссы концов коноды показывают состав фаз сплава. Абсцисса точки a характеризует состав жидкой фазы, абсцисса точки b – состав твердой фазы.
- количество фаз (относительное) в сплаве определяется из соотношения

$$L = \frac{kb}{akb} \text{ и } TB = \frac{ak}{akb}$$

где L , TB – искомое (относительное) количество жидкой и твердой фаз в сплаве; отрезки akb , kb , ak подставляются в масштабе построенной диаграммы состояния.

Поскольку количество фаз определено в относительных единицах, то должно выполняться равенство

$$L + TB = 1$$

3.3.4. Микроструктурный анализ и маркировка доэвтектоидной стали, оценка механических свойств стали по правилу Н.С. Курнакова

В задаче №2 предлагается провести микроструктурный анализ доэвтектоидной стали.

Микроструктурное определение содержания углерода в доэвтектоидной углеродистой стали состоит в следующем.

По микроструктуре (исследованием количества темных и светлых зерен на микрошлифе, например) можно определить относительное количество перлита в стали – $X\%$, тогда количество углерода в стали определится

$$C = C_{\Pi} + C_{\Phi} ,$$

где $C_{\Pi} = 0,8 \times \frac{X}{100}$ – содержание (%) углерода в стали за счет перлита.

$$C_{\Phi} = 0,006 \times \frac{1-X}{100} \text{ - содержание (\%) углерода в}$$

стали за счет феррита.

Можно углерод феррита не учитывать, приняв $C_{\Phi} \sim 0$, тогда

$$C = C_{\Pi} = 0,8 \times \frac{X}{100}$$

Доэвтектоидные стали по ГОСТ 1050 маркируются двумя цифрами, показывающими содержание углерода в стали в сотых долях процента (марки: 05, 08, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 58, 60, 65, 70, 80).

В двухфазной области $\Phi + \Pi$ механические свойства стали можно определить по правилу Н.С. Курнакова, зная свойства отдельных фаз стали (табл. 42)

Таблица 42.

Механические свойства фаз доэвтектоидной углеродистой стали

% Фаза	% C	НВ	σ_B	δ	Ψ
		МПа %			
Феррит	0,006	850	280	50	70
Перлит	0,8	2200	820	15	20

Внутри области доэвтектоидных сталей, содержащих 0,02-0,8% углерода, механические свойства стали изменяются по линейному закону от свойств феррита ($НВ_\Phi$, $\sigma_{B\Phi}$, δ_Φ , Ψ_Φ) до свойств перлита ($НВ_\Pi$, $\sigma_{B\Pi}$, δ_Π , Ψ_Π).

Правило Н.С. Курнакова в этом случае можно записать в виде линейных зависимостей «характеристика свойств – содержание углерода X».

$$HB_X = HB_\Phi + \frac{HB_\Pi - HB_\Phi}{0,8 - 0,02} \cdot (X - 0,02), \text{ МПа}$$

$$\sigma_{BX} = \sigma_{B\Phi} + \frac{\sigma_{B\Pi} - \sigma_{B\Phi}}{0,8 - 0,02} \cdot (X - 0,02), \text{ МПа}$$

$$\delta_X = \delta_\Pi + \frac{\delta_\Phi - \delta_\Pi}{0,8 - 0,02} \cdot (0,8 - X), \%$$

$$\Psi_X = \Psi_\Pi + \frac{\Psi_\Phi - \Psi_\Pi}{0,8 - 0,02} \cdot (0,8 - X), \%$$

Порядок решения задачи №2

1. Изобразить схематично микроструктуру заданной стали на квадрате 50x50 мм. Структуру изобразить в виде равноосных зерен размером ~ 5 мм. Зерна феррита – светлая фаза, зерна перлита – темная фаза. Соотношение светлой и темной фазы определяется вариантом задания (количество темной фазы-перлита X%).

2. Рассчитать содержание углерода в стали, опираясь на ее структурный состав.
3. Замаркировать сталь по ГОСТ 1050.
4. Определить графически или расчетным путем механические свойства ($\sigma_{ВХ}$, $\psi_{Х}$ или $HB_{Х}$, $\psi_{Х}$) стали по правилу Н.С. Курнакова.

3.3.5. Маркировка и область применения сталей

В задаче №3 предлагается расшифровать марки и описать область применения 10 сталей различного назначения.

При расшифровке марок стали необходимо воспользоваться разделом 1.5.2.2.

Эксплуатационные свойства – свойства стали, которые определяют ее применение при эксплуатации.

Основные эксплуатационные и технологические свойства, а также область применения некоторых сталей представлены в табл. 43.

Таблица 43.

Классификационная таблица сталей

Марка стали	Основные свойства		Область применения
	Эксплуатация	Технология	
1	2	3	4
Ст3, Ст4, Ст3Г,	П	Свариваемость	Сварные конструкции
Ст5			Клепанные конструкции
Ст6		Закаливаемость	Малоответственные детали
08,10	П, Пл	Свариваемость, технолог. пластичность	Детали, изготавливаемые холодной деформацией
15,20	П	Свариваемость	После нормализации: детали котлов; После цементации: валы, оси и т.д.
30,35,40, 45,50		Закаливаемость	Детали небольшого сечения
15Л-35Л		Жидкотекучесть, усадка	Отливки
15МХ, 12Х1МФ, 15ХМ	П, ТС	Свариваемость	Детали теплообменников
25Х1МФ, 25Х2МФ		-	Запорная арматура, крепеж
09Г2С, 14Г2, 12ГС	П, ХС	Свариваемость	Металлоконструкции, корпуса аппаратов
10ХНД	П, ХС, КорС		

1	2	3	4
25Г2С, 35ГС	П, ХС		Арматура
30Х-50ХН	П	Закаливаемость, прокаливаемость	Детали после улучшения
У7-У9	Т, В	Закаливаемость	Слесарный, кузнечный, штамповый инструмент
У10,У12	Т, И		Режущий и измерительный инструмент
9Х1-ХВГ		Закаливаемость, прокаливаемость	Режущий инструмент
Р6М5К5- Р18	КрС, И		Металлообрабатывающ ий инструмент
20Х13 (М)	Пл, ЖП, КорС	Свариваемость	Детали, работающие с ударными нагрузками
30Х13, 40Х13 (М)	И, КорС	Закаливаемость	Режущий и измерительный инструмент
20Х23Н13 (А +Ф)	ЖС	Свариваемость	Слабонагруженные детали при высокой температуре
20Х25Н20С2 (А)		Свариваемость	Детали печей, работающие при температуре до 1100°С
12Х18Н9 (А)	ЖС, КорС		Трубы, сварные конструкции
12Х18Н12Т (А)	ЖП, ЖС, КорС, МККС		Детали, работающие при температурах: - 196 – 600°С
17Х18Н9 (А)	КорС		Детали и конструкции, свариваемые точечной сваркой
06Х23Н28М3Д3 Т (А)			Сварные конструкции, работающие в серной кислоте до 80°С

1	2	3	4
Принятые сокращения: структурные классы сталей: М – мартенситный, А – аустенитный, А+Ф – аустенитно-ферритный. Эксплуатационные свойства сталей: П – прочность, Т – твердость, КрС – красностойкость, Пл – пластичность, В – вязкость, ТС – теплостойкость, ХС – хладостойкость, КорС – коррозионная стойкость, И – износостойкость, ЖП – жаропрочность, ЖС – жаростойкость, МККС – стойкость против межкристаллитной коррозии.			

Для конструкционных сталей эксплуатационными свойствами являются **прочность, пластичность, вязкость**. Если эксплуатация изделия сопряжена с низкими рабочими температурами, то помимо прочности от конструкционной стали требуется **хладостойкость**.

При повышенных рабочих температурах дополнительным свойством конструкционной стали является **теплостойкость** или **жаропрочность**.

Присутствие химически активной среды предполагает наличие у конструкционной стали таких эксплуатационных свойств, как **коррозионная стойкость, жаростойкость, стойкость против межкристаллитной коррозии**.

Для инструментальных сталей эксплуатационными свойствами являются свойства, обеспечивающие инструменту эффективную работу. Эксплуатационными свойствами инструментальных сталей являются: **твердость, вязкость, износостойкость, красностойкость**.

Технологические свойства – свойства, характеризующие способность стали перерабатываться в готовые изделия. Набор технологических свойств стали определяет способ изготовления будущего изделия. Для сталей, применяемых для изготовления сварных конструкций, определяющим технологическим свойством является **свариваемость**, для сталей, применяемых для получения отливок – **литейные свойства**, для сталей, используемых для изготовления режущего инструмента – это **закаливаемость и прокаливаемость**. Для конструкционных сталей, используемых для изготовления силовых деталей машин и механизмов основными технологическими свойствами являются: **температурный интервал горячей обработки давлением, обрабатываемость резанием** и, частично, **свариваемость**.

Решение задачи №3 можно оформить либо в виде таблицы, либо в текстовой форме, отведя по абзацу для каждой марки стали, с перечислением химического состава и свойств стали согласно условию задачи.

Заключение

Современному инженеру по роду профессиональной деятельности приходится сталкиваться с проблемами выбора материала деталей эксплуатируемого оборудования и приборов. При этом следует иметь ввиду, что не бывает «плохих» материалов, а бывают плохие инженеры, не знающие критериев выбора материала для конкретной детали. Следствием неоптимального выбора материала деталей является неудовлетворительное качество конструкций, машин и оборудования, со всеми вытекающими из этого последствиями.

Условия работы материала деталей в современной технике отличает чрезвычайно широкий диапазон варьирования в разных сочетаниях рабочих параметров (температура $-150 - +2000^{\circ}\text{C}$ и более, агрессивные химические среды, знакопеременные циклические напряжения и пр.).

Выбранный материал детали должен быть функциональным и технологичным. Функциональность предполагает соответствие физико-химических и механических свойств материала детали условиям ее эксплуатации. Эти свойства материалов были изучены в разделе «Материаловедение».

Технологичность детали подразумевает возможность ее изготовления выбранным способом с наименьшими затратами. Например, нельзя изготовить обычным литьем тонкостенное протяженное изделие из сплава с низкой жидкотекучестью или не рекомендуется использовать средне- и высокоуглеродистые стали для изготовления металлоконструкций. Эти вопросы обсуждались в разделе «Технология конструкционных материалов».

Таким образом, изучение курса МиТКМ поможет инженерам-эксплуатационникам избежать многих ошибок в профессиональной деятельности при выборе материала для деталей эксплуатируемого оборудования.

Библиографический список**Учебная основная**

1. Гуляев А.П. Металловедение.- М.: Металлургия, 1977. – 647 с.
2. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение.- М.: Машиностроение, 1980. – 493 с.
3. Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г. Материаловедение. Методы анализа, лабораторные работы и задачи. – М.: Металлургия, 1984, - 383 с.
4. Технология конструкционных материалов / А.М.Дальский, И.А. Арутюнова, Т.М.Барсукова и др. – М.: Машиностроение, 1985,- 448 с.
5. Самохоцкий А.И., Кунявский М.Н. Лабораторные работы по металловедению и термической обработке металлов. – М.: Машиностроение, 1981. – 174 с.

Учебная дополнительная

6. Блантер М.Е. Металловедение и термическая обработка.– М.: Машгиз, 1963.– 416 с.
7. Мозберг Р.К. Материаловедение. – М.: Высшая школа, 1991. – 448 с.
8. Материаловедение / Б.Н.Арзамасов, В.И.Макаров, Г.Г.Мухин и др. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002. – 648 с.
9. Лейкин А.Н., Родин Б.И. материаловедение. М.: Высшая школа. 1971, с. 35-56.
10. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. М.: Металлургия. 1986, с. 213-216.
11. Материаловедение и технология металлов / Г.П.Фетисов, М.Г.Карпман, В.И.Матонин и др. – М.: Высшая школа, 2002. – 638 с.

12. Штейнберг С.С. Материаловедение. Т.1. М.: Металлургиздат, 1952, с. 171-329.
13. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979, - 495 с.
14. Титов Н.Д., Степанов Ю.А. Технология литейного производства - М.: Машиностроение, 1974 . – 472 с.
15. Основы технологии кузнечно-штамповочного производства / В.М.Аристов, Г.С.Сахаров, В.Н.Степанов и др. – М.: Металлургия, 1971. – 312 с.
16. Семенов Е.И., Кондратенко В.Г., Ляпунов Н.И. Технология и оборудованиековки и объемной штамповки.– М.: Машиностроение, 1978. – 311 с.
17. Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. Физические основы пластической деформации. – М.: Металлургия, 1982. – 584 с.

Справочная

18. Марочник сталей и сплавов. / Под общ. ред. В.Г.Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
19. Анурьев В.И. Справочник конструктора – машиностроителя: В 3-х т. Т.1, 3. – М.: Машиностроение, 1979. – Т.1 728 с., Т.3 557 с.
20. Краткий справочник металлиста / Под общ. ред. П.Н.Орлова, Е.А. Скороходова. – М.: Машиностроение, 1987. – 960 с.
21. Справочник технолога – машиностроителя. / Под ред. А.Г.Косиловой, Р.К.Мещерякова: В 2-х т. – М.: Машиностроение, 1972, - Т. 1 694 с., Т.2 568 с.
22. Справочник сварщика. / Под ред. В.В.Степанова. – М.:Машиностроение,1975. – 520 с.

Перечень ГОСТов, используемых в курсе МГТКМ

Название	Номер
<i>Сталь и полуфабрикаты</i>	
Углеродистая обыкновенного качества	380
Углеродистая качественная	1050
Углеродистая инструментальная	1435
Легированная инструментальная	5950
Быстрорежущая	19265
Теплоустойчивая	20072
Подшипниковая	801
Жаростойкая, жаропрочная, коррозионностойкая	5632
Прокат сортовой и фасонный из стали углеродистой обыкновенного качества	535
Прокат листовой из углеродистой низколегированной и легированной стали для котлов и сосудов, работающих под давлением. Технические условия	5520
Прокат из легированной конструкционной стали	4543
Сталь кованая круглая и квадратная. Сортамент	1133
Поковки из конструкционных углеродистых и легированных сталей	8479
Сталь калиброванная круглая. Сортамент	7417
Сталь калиброванная квадратная. Сортамент	8559
Прокат калиброванный шестигранный. Сортамент	8560
Прокат стальной горячекатаный широкополосный универсальный. Сортамент	82
Уголки стальные горячекатаные равнополочные. Сортамент	8509
Уголки стальные горячекатаные неравнополочные. Сортамент	8510
Двутавры стальные горячекатаные. Сортамент	8239
Швеллеры стальные горячекатаные. Сортамент	8240
Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент	8732
Трубы стальные бесшовные холоднодеформированные. Сортамент	8734
<i>Чугун и полуфабрикаты</i>	
Серый	1412
Ковкий	1215
Высокопрочный	7293
Жаростойкий	7769

Части соединительные чугунные, изготовленные литьем в песчаные формы для трубопроводов	5525
<i>Алюминий и его сплавы</i>	
Алюминий первичный. Марки	11069
Деформируемые сплавы	4784
Литейные сплавы	2685
<i>Медь и ее сплавы</i>	
Медь. Марки	859
Латунь двойная и многокомпонентная деформируемая	15527
Латунь литейная	17711
Бронза оловянистая деформируемая	5017
Бронза безоловянистая деформируемая	18175
Бронза оловянистая литейная	613
Бронза безоловянистая литейная	493
Медно-никелевые сплавы	492
<i>Антифрикционные сплавы</i>	
Баббиты	1320
Алюминиевые	14113
Цинковые	21437
<i>Методы испытаний</i>	
Растяжение при нормальной температуре	1497
Растяжение при повышенной температуре	9651
Определение твердости по Бринеллю	9012
Определение твердости по Роквеллу	9013
Определение твердости по Виккерсу	2999
Определение микротвердости	9450
Определение ударной вязкости	9454
Определение прокаливаемости	5657
Определение жаростойкости	6130
Испытание на ползучесть	3248
Испытание на длительную прочность	10145
Коррозия металлов. Термины	5272
Испытание на стойкость против межкристаллитной коррозии	6032

Предметный указатель

- Авиаль - 71
Агломерат - 100
Аллотропические формы - 5
Аморфные тела - 5
- Баббиты - 79
Бейнит - 57
Бейнитное превращение - 57
Белый чугун - 48
Биметаллы - 96
- Вагранка - 103
Вакансия - 10
Вакуумиспытание сварного соединения - 159
Валки гладкие - 120
Валки фигурные - 120
Виды и способы сварки - 149
Виды прокатки - 118
Винтовые дислокации - 10
Водородная болезнь меди - 73
Возврат, определение - 23
Волока - 132
- Гетероцепные полимеры - 82
Гибка - 126
Гидравлическое испытание сварного соединения - 159
- Деформация, определение - 12
Движения резания - 134
Деформация, схемы реализации - 12
Деформационное упрочнение (наклеп) - 23
Деформируемые алюминиевые сплавы - 70
Диаграмма растяжения - 12
Диаграмма состояния, определение - 29
Диаграмма состояния, построение - 30
Диаграмма состояния «Fe-Fe₃C» - 36
- Единая шкала твердости Роквелла С₃ - 17
- Жаропрочные сплавы - 69
Жаропрочные алюминиевые сплавы - 71, 72
Жаростойкие сплавы - 69
- Зазор - 127
Закалка - 63, 172
- Изложница (мульда) - 103
Износостойкий биметалл - 98
Изотермические реакции в системе «Fe-Fe₃C» - 39
Изотропия - 7
Индентор, определение - 15
- Калибр, определение - 120
Каменное литье - 95
Карбиды металлов - 27
Катод - 149
- А**
Анизотропия - 7
Анод - 149
Антифрикционные сплавы - 69, 78
Атомы внедрения - 10
- Б**
Благородные металлы - 67, 68
Блюм - 109
Боек - 123
Бронза, определение - 73
Быстрорежущие инструментальные стали - 147
- В**
Волокнистые композиты - 96
Волочение - 132
Волоочильный стан - 132
Время выдержки в печи - 172
Вторичная рекристаллизация - 25
Вулканизация - 89
Высадка - 125
Высокий отпуск - 174
Высокопрочные алюминиевые сплавы - 71
Высокопрочный чугун - 50, 51
Вытяжка при прокатке - 120
Вязкое разрушение - 12
- Г**
Глубина резания - 137
Горячая деформация - 25
Горячая обработка металла - 115
Горн - 100
- Д**
Диаметр отверстия под резьбу - 146
Дисперсные композиты - 96
Дифрактометр - 7
Динасовый кирпич - 94
Доломитовый кирпич - 94
Доменная печь - 100
Доменные ферросплавы - 103
Допустимая скорость резания - 141
Дуговая электропечь - 104
Дуралюмин - 71
- Е**
- Ж**
Железная руда - 99
Железные металлы - 67
Жидкий шлак - 103
- З**
Закаливаемость стали - 64
Запечник - 100
- И**
Инструмент для сверления - 141
Инструментальная оснастка при прессовании - 129
Испытание керосином сварного соединения - 159
Испытание на растяжение - 12
- К**
Колошниковый газ - 103
Композиционные материалы, определение - 95
Конода, определение - 34
Контролируемая атмосфера - 116

- Каучуки – 89
- Квазиэтектоид - 55
- Керамика, определение - 93
- Кислый шлак - 99
- Кислородный конвертер – 104
- Классификация сталей по назначению - 44
- Классификация сталей по структуре - 42
- Классификация сталей по составу, качеству – 42
- Классификация видов термообработки - 52
- Ковка, определение - 122
- Ковкий чугун - 51, 52
- Ковочные алюминиевые сплавы - 71
- Ковочный гидравлический пресс - 123
- Ковочный молот - 123
- Кокиль - 109
- Кокс, определение - 99
- Коксовая батарея – 99
- Коллаген - 95
- Колошник - 100

- Лагунь, определение - 73
- Легированные инструментальные стали - 146
- Легкие металлы – 67, 68
- Лещадь - 100
- Лигнин - 95
- Ликвация - 29

- Магнезитовый кирпич - 94
- Магналии - 72
- Магнитно-мягкие сплавы - 69
- Магнитно-твердые сплавы - 69
- Маркировка сталей - 45
- Маркировка сварочных электродов - 154
- Мартеновская печь - 104
- Мартенсит – 57
- Мартенсит закалки - 173
- Мартенсит отпуска - 173
- Мартенситное превращение - 57
- Маятниковый копер - 12

- Надежность металла - 19

- Нагревательные печи, виды - 116
- Немагнитная сталь - 69
- Неорганические полимеры - 82

- Обозначение легирующих элементов в сталях - 46
- Обозначение легирующих элементов в сплавах - 46
- Обратная полярность - 149
- Объемные дефекты - 10
- Огнеупорность, определение - 94
- Опока - 112
- Осадка - 125
- Основной шлак - 99
- Основная футеровка - 99
- Отливка, определение - 107

- Передельный чугун - 103
- Первичная рекристаллизация - 23
- Период решетки - 5

- Контроль качества сварки, виды - 158
- Корень шва - 156
- Коррозионностойкие сплавы - 69
- Коррозионностойкий биметалл - 98
- Коэффициент мягкости напряженного состояния - 114
- Коэффициент обрабатываемости, значения, 149
- Коэффициент обрабатываемости, определение - 147
- Краевая дислокация - 10
- Красноломкость меди - 73
- Кривая охлаждения (плавления) - 30
- Кристаллиты - 7
- Кристаллическая решетка - 5
- Кристаллические тела - 5
- Критическая скорость закалки - 58
- Критическая точка сплава - 27
- Критический диаметр идеальный - 65
- Критический диаметр, определение - 65

- Л**
- Ликвидус – 29
- Литейная форма, определение - 107
- Литейные алюминиевые сплавы - 70
- Литейный чугун - 103
- Листовая штамповка - 126
- Литниковая система - 112

- М**
- Металлография - 9
- Металлографический микроскоп - 10
- Межузельные атомы - 10
- Металлорежущие станки, классификация - 138
- Механическая смесь (эвтектика) - 32
- Механические свойства, определение - 12
- Методы образования поверхностей резанием - 135
- Методы реализации деформационного упрочнения - 23
- Метчик – 144
- Микрошлиф - 9
- Мягкие припои - 80

- Н**
- Неразрушающие методы контроля сварных швов, виды - 160
- Низкий отпуск – 59, 173
- Нитриды металлов - 27
- Номограмма прокаливаемости сталей - 65
- Нормализация - 63

- О**
- Образец Менаже - 19
- Образец Шарпи - 19
- Отпуск, определение - 58
- Отпуск стали - 173
- Отпуская хрупкость необратимая - 61
- Отпуская хрупкость обратимая - 61
- Отрубка - 126
- Отжиг - 62
- Относительное сужение - 15
- Относительное удлинение - 15

- П**
- Правило фаз - 30
- Предел прочности - 15
- Предел текучести - 12

- Перлит - 55
 Перлитное превращение - 55
 Питатель - 112
 Плакирующий слой биметалла - 98
 Пластическая деформация - 12
 Пластические массы, определение - 81
 Пластичность, определение - 12
 Плотность дислокаций - 10
 Пневматическое испытание сварного соединения - 159
 Поверхности заготовки при резании, определения - 134
 Подача при резании, виды - 137
 Подопочный щиток - 112
 Поковка - 123
 Поликристаллы - 7
 Полимеры, классификация - 86
 Полимеры, определение - 81
 Полиморфизм, определение - 5
 Полумартенситная твердость - 64
 Правило концентраторов - 34
 Правило Курнакова - 34
 Правило отрезков - 34
- Рабочая клеть - 120
 Рабочий ход инструмента - 141
 Разделительные операции листовой штамповки - 127
 Разливочная машина - 103
 Разрушение, определение - 12
 Разрывная машина - 12
 Раскатка - 125
 Раскислители - 104
 Распар - 100
 Режим ручной дуговой сварки - 156
 Режим резания, определение - 137
- Свариваемость, определение - 149
 Сварка, определение - 149
 Сварные соединения - 154
 Сварные швы - 155
 Сварочные электроды, классификация - 153
 Сварочный пост - 151
 Ситаллы - 92
 Скорость резания - 137
 Скручивание - 126
 Слиток, определение - 107
 Слоистые композиты - 96
 Сляб - 109
 Собирательная рекристаллизация - 25
 Солидус - 29
 Сольвус - 29
 Соотношение чисел твердости по Бринеллю и Роквеллу - 17
 Сорбит - 55
- Сорбит отпуска - 174
 Сортамент - 120
- Твердомер - 12
 Твердость по Бринеллю - 15
- Предельная деформация - 114
 Пресс - 12
 Прессование - 129
 Пресс-остаток - 132
 Прибыльная надставка - 109
 Прибыль - 112
 Припой, определение - 79
 Припуск на обработку - 141
 Проводниковые сплавы - 77
- Прокаливаемость стали, методы определения - 64
- Прокатка, определение - 118
 Прокатные профили - 120
 Прокатный стан, виды - 120
 Протяжка - 125
 Процессы в сплавах Fe (C) при охлаждении - 40
 Прочность, определение - 12
 Прошивень - 126
 Прошивка - 122, 126
 Прошивочный стан - 122
 Прямая поляриность - 149
 Пуансон - 129
- Р**
- Резание, определение - 134
 Резец токарный, виды - 139, 140
 Резина, определение - 87
 Резина, состав - 88
 Рекристаллизационный отжиг - 25, 115
 Рекристаллизационный отжиг промежуточный - 132
 Рекристаллизация, определение - 23
 Рентгеноструктурный анализ - 7
 Реостатные сплавы - 69
 Руда, определение - 99
 Ручная дуговая сварка - 149
- С**
- Сверление, определение - 141
 С-диаграмма - 54, 55
 Серый чугун - 50, 51
 Силикатные материалы - 90
 Силикокальций - 104
 Силумины - 72
 Сплав, определение - 25
 Спеченные твердые сплавы - 147
 Спиральное сверло, конструкция - 144, 145
 Сплавы с высоким электросопротивлением - 78
 Сплавы, способы получения - 25, 26
 Способы литья - 109
 Средний отпуск - 173
 Сталь, определение - 42
 Стержень - 112
 Стояк - 112
 Структура закаленной стали - 58
 Структурная классификация сплавов Fe (C) - 41
- С**
- Структуры в системе Fe-Fe₃C - 39
 Схема обработки - 134
- Т**
- Термоситаллы - 93
 Технический алюминий - 70

- Твердость по Роквеллу - 15
 Твердые припои - 80
 Твердый раствор, виды - 26
 Температура закалки - 172
 Температура начала и конца мартенситного превращения - 57
 Температурные переходы полимера - 83
 Температурный интервал ОМД - 116
 Температурный порог рекристаллизации - 25
 Теория дислокаций - 21
 Термопластичные полимеры - 83
 Термореактивные полимеры - 83
 Термическая обработка, определение - 52
 Термическая обработка, режимы - 62
- Угар металла - 116
 Углеродистые инструментальные стали - 146
 Ударная вязкость - 19
 Узлы металлорежущего станка - 139
- Фаза сплава, определение - 26
 Фазы системы «Fe-Fe₃C» - 38, 39
 Ферромарганец - 104
 Ферросилиций - 104
 Физические состояния полимеров - 83
 Флюсы - 99
 Фольга - 122
 Форма макромолекулы полимера - 82
- Характеристическое расстояние - 65
 Характерные точки системы «Fe-Fe₃C» - 36
 Химические соединения в сплавах - 26
- Цементит - 27
- Число степеней свободы системы - 32
 Чугун, выплавка - 102
 Чугун, определение - 48
- Шамотный кирпич - 95
 Шахта - 100
 Шихтовые материалы - 100
 Шкалы твердости Роквелла - 16, 17
 Шлак - 99
- Эвтектика - 30
 Эвтектоид - 34
 Эксплуатационные требования к инструментальным материалам - 146
 Электрическая дуга - 149
- Технологическая операция, определение - 125
 Технологические операции резания - 138
 Технологический переход, определение - 125
 Технологический процесс, определение - 123
 Технологическая свариваемость сталей - 149
- Торможение дислокаций - 21
 Точение - 139
 Точка Кюри - 29
 Точка полиморфного превращения - 29
 Троостит - 55
 Троостит отпуска - 174
 Трубы - 122
 Тугоплавкие металлы - 67
- У**
 Улучшение стали - 174
 Упругая деформация - 12
 Усадочная раковина - 109
 «Усы» железа - 21
- Ф**
 Формоизменяющие операции листовой штамповки - 127
 Формовочная смесь - 112
 Формовочный инструмент - 112
 Фотоситаллы - 92
 Фрезерование, определение - 141
 Фрезы, типы - 141
 Футеровочные материалы, определение - 94
- Х**
 Холодная деформация - 25
 Холодная обработка металла - 116
 Хрупкое разрушение - 12
- Ц**
- Ч**
 Чугунная летка - 102
 Чугуновозный ковш - 102
 Чушка - 103
- Ш**
 Шлаковая летка - 102
 Шлакоситаллы - 93
 Шлакоуловитель - 112
 Штрипс - 122
- Э**
 Электротермические ферросплавы - 104
 Электротехнические сплавы - 77
 Элементарная ячейка - 5
 Элементоорганические соединения - 82
 Эпоксидная смола - 9

Оглавление

Предисловие.....	3
Введение.....	4
1. Материаловедение.....	5
1.1. Строение металлов.....	5
1.2. Пластическая деформация и механические свойства металлов.....	12
1.3. Деформационное упрочнение и рекристаллизация.....	19
1.4. Теория сплавов.....	26
1.4.1. Фазы сплавов.....	26
1.4.2. Диаграммы состояния.....	27
1.5. Железоуглеродистые сплавы.....	37
1.5.1. Диаграмма состояния «Fe – Fe ₃ C».....	37
1.5.2. Классификация железоуглеродистых сплавов.....	42
1.5.2.1. Классификация сталей.....	43
1.5.2.2. Маркировка сталей.....	46
1.5.2.3. Чугуны.....	49
1.6. Термическая обработка.....	53
1.6.1. Классификация видов термической обработки.....	53
1.6.2. Изотермическое превращение аустенита.....	56
1.6.3. Превращение аустенита при непрерывном охлаждении.....	59
1.6.4. Превращения при отпуске стали.....	59
1.6.5. Влияние отпуска на механические свойства стали.....	60
1.6.6. Технология термической обработки стали.....	61
1.6.7. Закаливаемость и прокаливаемость стали.....	65
1.7. Цветные металлы и сплавы.....	68
1.7.1. Алюминий и сплавы на его основе.....	71
1.7.2. Медь и сплавы на ее основе.....	73
1.7.3. Электротехнические сплавы.....	78
1.7.4. Антифрикционные сплавы.....	79
1.7.5. Припой.....	80
1.8. Пластические массы.....	82
1.8.1. Классификация полимеров.....	82
1.8.2. Состав и свойства пластмасс.....	86
1.9. Резиновые материалы.....	89
1.9.1. Состав резин.....	89
1.9.2. Классификация и применение резин.....	91
1.10. Неорганические материалы.....	92
1.10.1. Неорганическое стекло.....	92
1.10.2. Стеклокристаллические материалы.....	94
1.10.3. Керамические материалы.....	95
1.11. Композиционные материалы.....	97
2. Технология конструкционных материалов.....	100
2.1. Производство чугуна и стали.....	100
2.1.1. Материалы для производства чугуна и стали.....	101
2.1.2. Выплавка чугуна.....	102
2.1.3. Выплавка стали.....	106
2.2. Получение заготовок литьем.....	109

2.2.1.	Получение стальных слитков.....	109
2.2.2.	Получение отливок.....	110
2.3.	Обработка металлов давлением.....	116
2.3.1.	Деформационная способность металла.....	116
2.3.2.	Нагрев металла и нагревательные устройства.....	118
2.3.3.	Прокатка.....	120
2.3.4.	Ковка.....	124
2.3.5.	Холодная листовая штамповка.....	128
2.3.6.	Методы производства машиностроительных профилей.....	130
2.4.	Обработка заготовок резанием.....	136
2.4.1.	Движения резания, схема обработки.....	136
2.4.2.	Режим резания.....	139
2.4.3.	Металлорежущее оборудование и технологические операции резания.....	140
2.4.4.	Инструментальные материалы.....	148
2.4.5.	Обрабатываемость сталей резанием.....	150
2.5.	Основы сварочного производства.....	152
2.5.1.	Свариваемость сталей.....	152
2.5.2.	Ручная дуговая сварка.....	153
2.5.3.	Электроды для РДС.....	155
2.5.4.	Сварные соединения и сварные швы.....	157
2.5.5.	Выбор режима РДС.....	159
2.5.6.	Контроль качества сварки.....	161
3.	Контрольная работа по курсу МиТКМ для студентов заочного факультета.....	164
3.1.	Теоретические вопросы контрольной работы.....	166
3.2.	Задачи контрольной работы.....	170
3.3.	Методические указания по выполнению контрольной работы.....	174
3.3.1.	Построение кривой охлаждения сплава.....	174
3.3.2.	Выбор режима термической обработки изделия.....	175
3.3.3.	Построение диаграммы состояния двухкомпонентного сплава, анализ фазового состава сплава.....	177
3.3.4.	Микроструктурный анализ и маркировка доэвтектоидной стали, оценка механических свойств стали по правилу Н.С. Курнакова.....	179
3.3.5.	Маркировка и область применения сталей.....	181
	Заключение.....	184
	Библиографический список.....	185
	Приложение.....	187
	Предметный указатель.....	189

Учебное издание
**Материаловедение и технология конструкционных
материалов**

Учебное пособие для студентов заочного факультета
специальностей 1004, 1007, 1908, 2102

САФОНОВ Борис Петрович
МАРЦЕНКО Константин Николаевич

Редактор Е.Н. Селиверстова
Компьютерный набор Г.М. Зонова, А.В. Бегова
Компьютерная верстка А.В. Бегова

Лицензия ЛР №020714 от 02.02.98
Подписано в печать 10.09.2004г. Формат 60X84/16.
Бумага «SvetoCory». Отпечатано на ризографе.
Усл. печ. л.10, 97
Тираж 100 экз. Заказ №89/104.

Российский химико-технологический университет им. Д.И.Менделеева
Новомосковский институт. Издательский центр.
Адрес университета: 125047, Москва, Миусская пл., 9.