

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)**

Институт инновационных технологий
Механико-технологический факультет
Кафедра литейных процессов и конструкционных материалов

Картонова Любовь Владимировна

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ТЕХНОЛОГИЯ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Курс лекций

по дисциплине «Материаловедение. Технология конструкционных
материалов» для студентов ВлГУ, обучающихся
по направлению 221000 «Мехатроника и робототехника»
(сокращенная форма обучения)

Владимир – 2014 г.

УДК 620.22

Курс лекций по дисциплине «Материаловедение. Технология конструкционных материалов» для студентов ВлГУ, обучающихся по направлению 221000 «Мехатроника и робототехника» (сокращенная форма обучения)/ Владим. гос. ун-т; Сост.: Л.В.Картонова. Владимир. 2014. - 102 с.

Содержит курс лекций по дисциплине «Материаловедение. Технология конструкционных материалов». Разработано для студентов ВлГУ, обучающихся по направлению 221000 «Мехатроника и робототехника» сокращенной формы обучения. Могут быть использованы студентами технических направлений подготовки очной и заочной формы обучения.

Библиогр.: 31 назв.

ВВЕДЕНИЕ

Целью освоения дисциплины "Материаловедение. Технология конструкционных материалов" является обучение студентов научным основам выбора материала с учетом его состава, структуры, термической обработки и достигающихся при этом эксплуатационных и технологических свойств, необходимых для приборостроения и деталей мехатронных и робототехнических систем, а также дать представление об основных технологических методах получения деталей из конструкционных материалов.

В результате освоения данной дисциплины у студентов формируются основные общекультурные и профессиональные компетенции, отвечающие требованиям ФГОС по направлению «Мехатроника и робототехника» к результатам освоения ООП ВПО.

Таблица 1. Результаты обучения (компетенции) выпускника ООП

Код	Результат обучения (компетенция) выпускника ООП
ОК-1	Способность владеть культурой мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей её достижения
ОК-2	Обладать готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе.
ОК-9	Способность использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования
ПК-4	Способность и готовность разрабатывать конструкторскую документацию механических сборочных единиц и деталей мехатронных и робототехнических систем
ПК-5	Способность и готовность участвовать в проведении предварительных испытаний составных частей опытного образца мехатронной или робототехнической системы по заданным программам и методам и вести соответствующие журналы испытаний

Дисциплина «Материаловедение. Технология конструкционных материалов» относится к вариативной части профессионального цикла ООП ВПО.

Для успешного усвоения студентами курса «Материаловедения. Технология конструкционных материалов» необходимо знание основных курсов высшей математики, химии, физики, сопротивления материалов. Из курса высшей математики используются элементы дифференциального и

интегрального исчисления. Курс химии обеспечивает сведениями о типах связи в твердых телах, энергетике и кинематике химических процессов, строении полимеров, теории коррозии металлов. Из курса физики при изучении данной дисциплины используются следующие разделы: физика твердого тела, физика элементарных частиц, молекулярная физика, термодинамика, законы диффузии и электропроводности.

Знания и навыки, полученные при изучении данного курса, широко применяются студентами при изучении курсов профессионального цикла: деталей мехатронных модулей, роботов и их конструирование; проектирования мехатронных и робототехнических систем; технологии автоматизированного машиностроения и других дисциплин.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

знать: основные группы и классы современных материалов, их свойства и области применения; сущность основных технологических методов получения деталей из конструкционных материалов (ОК-9, ПК-4);

уметь: обобщать и анализировать информацию; анализировать фазовые превращения при нагревании и охлаждении сплавов, пользуясь диаграммами состояния двойных систем; работать на световом микроскопе; выявлять на шлифах типичные структурные составляющие; определять механические свойства при статических испытаниях; анализировать результаты испытаний для сравнительной оценки материалов; принимать технически обоснованные решения по выбору материалов (ОК-1, 9; ПК-4);

владеть: методами анализа свойств материалов; практическими навыками исследования свойств материалов (ПК-5).

Объем лекционной нагрузки составляет 50 % от общего объема аудиторной нагрузки.

**Таблица 2. Распределение лекционной нагрузки
по формам проведения**

№ п/п	Раздел дисциплины	Объем нагрузки (в часах)	
		Лекции в традиционной форме	Лекции- консультации в активной форме
Модуль I			
1	Раздел 1. Введение. Классификация материалов. Кристаллическое строение металлов.	2	0,5
2	Раздел 2. Пластическая деформация и рекристаллизация металлов.		0,5
3	Раздел 3. Основы теории сплавов.	1,5	0,5
Модуль II			
4	Раздел 4. Сплавы на основе железа.	2	5
Модуль III			
5	Раздел 5. Цветные металлы и сплавы.	0,5	1,5
6	Раздел 6. Материалы с особыми физическими свойствами.		0,5
7	Раздел 7. Наноматериалы.		0,5
8	Раздел 8. Научные основы выбора материалов.	0,5	0,5
Модуль IV			
9	Раздел 9. Основы обработки материалов.	1	1
	Итого	7,5	10,5
	Всего лекционной нагрузки	18	

ЛЕКЦИЯ 1

Введение. Классификация материалов. Кристаллическое строение и свойства металлов.

План лекции 1

Раздел 1. Введение. Классификация материалов. Кристаллическое строение и свойства металлов.

Тема 1.1. Значение, цель и задачи курса «Материаловедение. Технология конструкционных материалов». Классификация материалов.

Тема 1.2. Кристаллическое строение металлов. Кристаллографические индексы. Дефекты кристаллов и их влияние на свойства. Микроструктурный анализ металлов.

Материаловедение – это наука, изучающая и устанавливающая взаимосвязь между составом, строением и свойствами современных машиностроительных материалов, а также о методах изменения этих свойств.

Все материалы делятся на *металлические* и *неметаллические*.

В химии под *металлами* понимают определенную группу элементов, расположенную в левой части Периодической таблицы Д.И. Менделеева.

Все элементы, расположенные левее галлия, индия и таллия – *металлы*, а правее мышьяка, сурьмы и висмута – *неметаллами*.

В машиностроении основными конструкционными материалами являются металлы и металлические сплавы.

В технике под металлом понимают вещества, обладающие «металлическим блеском», в той или иной мере присущим всем металлам пластичностью. Металлические материалы принято делить на две группы: черные и цветные.

Черные металлы имеют темно-серый цвет, большую плотность, высокую температуру плавления, относительно высокую твердость и во многих случаях обладают полиморфизмом. Наиболее типичным металлом этой группы является *железо*.

Цветные металлы чаще всего имеют характерную окраску: красную, желтую, белую. Обладают большой пластичностью, малой твердостью, относительно низкой температурой плавления, для них характерно отсутствие полиморфизма. Наиболее типичным металлом этой группы является медь.

Наибольшее применение нашли черные металлы. Широкое использование железа и его сплавов связано с большим содержанием его в земной коре, низкой стоимостью, высокими технологическими и механическими свойствами. К металлам железной группы нередко относят кобальт, никель, а также близкий к ним по свойства марганец.

Цветные металлы всего подразделяются (по сходным свойствам) на:

- легкие (бериллий, магний, алюминий), обладающие малой плотностью;
- благородные (серебро, золото, металлы платиновой группы), обладающие химической инертностью;
- легкоплавкие металлы (цинк, кадмий, олово, ртуть, свинец, таллий, сурьма).

Все металлы и их сплавы имеют характерную кристаллическую структуру. Кристаллическое состояние прежде всего характеризуется определенным, закономерным расположением атомов в пространстве.

В кристалле элементарные частицы сближены до соприкосновения и располагаются закономерно по разным направлениям. Для упрощения

пространственное расположение частиц заменяют схемами, где центры тяжести частиц представляют точками. Точки пересечения прямых линий, в которых располагаются атомы, называются узлами кристаллической решетки.

Для описания элементарной ячейки кристаллической решетки используются шесть величин: три отрезка (a , b , c) и три угла (α , β , γ) между этими отрезками. Размер элементарной ячейки оценивается тремя отрезками – параметрами (периодами) решетки.

На рис.1. представлены основные типы кристаллических решеток.

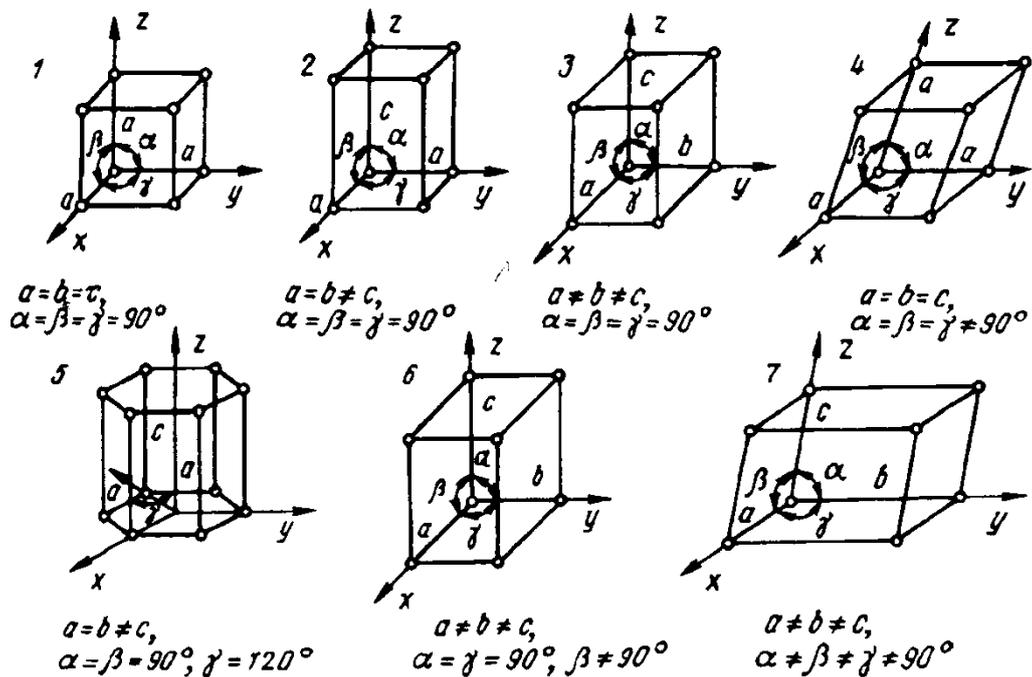


Рис. 1. Основные типы кристаллических решеток

1 - кубическая; 2 - тетрагональная; 3 - ромбическая; 4 - ромбоэдрическая;
5 - гексагональная; 6 - моноклинная; 7 - триклинная

Характеристики основных кристаллических систем приведены в табл. 3.

Таблица 3. Характеристика кристаллической системы

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

Металлы образуют в основном три типа решеток (рис. 2): объемно центрированную кубическую (R, Na, Li, Ti_β, Fe_α и др.), гранецентрированную кубическую (Ca_α, Ce, Ag, Au, Cu, Fe_γ, Ni и др.) и гексагональную плотноупакованную (Mg, Ti_α, Zn, Ca_β и др.).

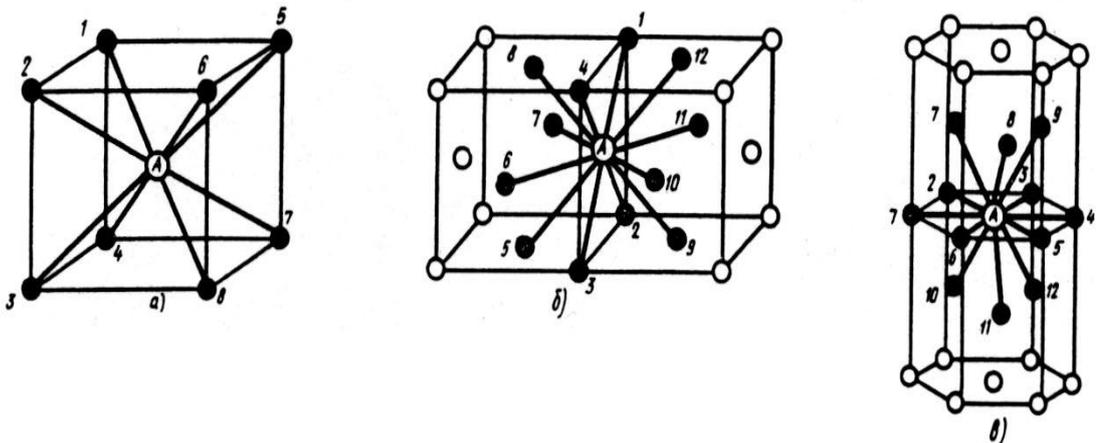


Рис. 2. Кристаллические решетки металлов:
 а – объемно центрированная кубическая;
 б – гранецентрированная кубическая;
 в – гексагональная плотноупакованная.

Объемно центрированная кубическая решетка. В элементарной ячейке такой решетки девять атомов (восемь – вершинах куба и один – в центре). Каждый угловой атом входит в восемь соседних ячеек, следовательно, на одну ячейку приходится $8 \cdot \frac{1}{8} + 1 = 2$ атома.

Гранецентрированная кубическая решетка. В элементарной ячейке такой решетки 14 атомов (8 – в вершинах и 6 – на гранях куба). Каждый угловой атом входит в восемь ячеек; каждый атом, находящийся в центре

грани, входит в две соседние ячейки, в центре ячейки атома нет. Следовательно, на одну ячейку приходится $8 \cdot 1/8 + 6 \cdot 1/2 = 4$ атома.

Гексагональная плотноупакованная решетка. В элементарной ячейке такой решетки 16 атомов. Верхние центральные атомы входят в две соседние ячейки; атомы, образующие вершины призмы, входят в шесть соседних ячеек; атомы, лежащие внутри призмы, целиком принадлежат данной ячейке. Следовательно, на одну ячейку приходится $2 \cdot 1/2 + 12 \cdot 1/6 + 3 = 6$ атомов.

Элементарная кристаллическая ячейка характеризуется координационным числом, под которым понимают число атомов, находящихся на наиболее близком равном расстоянии от избранного атома.

В объемно центрированной кубической решетке (рис. 3, а) атом А находится на наиболее близком равном расстоянии от восьми атомов, расположенных в вершинах куба, то есть координационное число этой решетки равно 8 (К8).

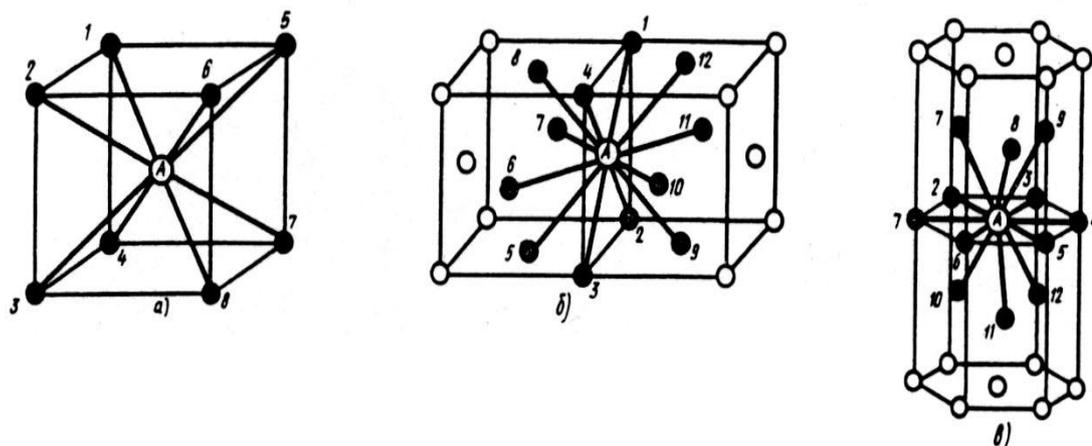


Рис.3. Координационное число в различных кристаллических решетках для атома А:
 а - объемно центрированная кубическая (К8);
 б - гранецентрированная кубическая (К12);
 в - гексагональная плотноупакованная (Г12).

В гранецентрированной кубической решетке (рис. 3, б) атом А находится на наиболее близком расстоянии от четырех атомов 1, 2, 3, 4, расположенных в вершинах куба, от четырех атомов 5, 6, 7, 8, расположенных на гранях куба, и от четырех атомов 9, 10, 11, 12, принадлежащих расположенной рядом кристаллической ячейке. Атомы 9, 10, 11, 12 симметричны 5, 6, 7, 8. Следовательно, для гранецентрированной кубической решетки координационное число равно 12 (К12).

В гексагональной плотноупакованной решетке (рис. 3, в) атом А находится на наиболее близком расстоянии от шести атомов 1, 2, 3, 4, 5, 6, расположенных в вершинах шестигранника, и от трех атомов 7, 8, 9, расположенных в средней плоскости призмы. Кроме того, атом А находится на таком же расстоянии еще от трех атомов 10, 11, 12, принадлежащих кристаллической ячейке, лежащей ниже основания. Атомы 10, 11, 12 симметричны атомам 7, 8, 9. Таким образом, для гексагональной плотноупакованной решетки координационное число 12 (Г12).

Чем выше координационное число, тем выше плотность упаковки кристаллической решетки, т.е. объем, занятый атомами.

Плотность кристаллической решетки также характеризуется *коэффициентом компактности*.

Коэффициент компактности Q равен отношению суммарного объема атомов, входящую в решетку, к объему решетки:

$$Q = \frac{4\pi R^3 n}{3V} \times 100,$$

где R – радиус атома (иона); n – базис или число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку; V – объем элементарной ячейки.

Принцип определения базиса показан выше: для ОЦК $n = 2$, для ГЦК $n = 4$, для ГПУ $n = 6$.

Таким образом, для ОЦК коэффициент компактности 68 %, для ГЦК 74 %, для ГПУ 74%.

Для определения положения атомных плоскостей в кристаллических пространственных решетках пользуются индексами, которые называются *индексами Миллера*. Для того чтобы установить индексы Миллера, элементарную решетку вписывают в пространственную систему координат, следовательно, положение любого узла кристаллической решетки относительно произвольно выбранного начала координат определяется заданием координат x, y, z .

За единицу измерения вдоль каждой оси принимается период решетки, т.е. для одной элементарной ячейки эти координаты равны параметрам a, b, c соответственно. Для удаленной от начала координат ячейки координаты узла определяются $x = ma, y = nb, z = pc$, где m, n, p – целые числа. Если за единицу измерения длин вдоль осей решетки выбрать величины a, b, c , то координаты узла будут просто числа m, n, p ; они называются индексами узла. Положение плоскости определяется отрезками, которые она отсекает на осях решетки. За индексы плоскостей принято брать обратные

отрезки: $h = 1/m$, $k = 1/n$, $l = 1/p$. Эти числа заключают в круглые скобки. На рис. 1.4. показано графическое изображение наиболее важных плоскостей в кубической решетке. Если плоскость не пересекает какую-нибудь ось, например, x , то соответствующий индекс Миллера равен нулю, например, (011) . Для рассмотрения явлений, происходящих в решетке, также применяются индексы направлений. Кристаллографические индексы направлений заключаются в квадратных скобках (рис.4, г).

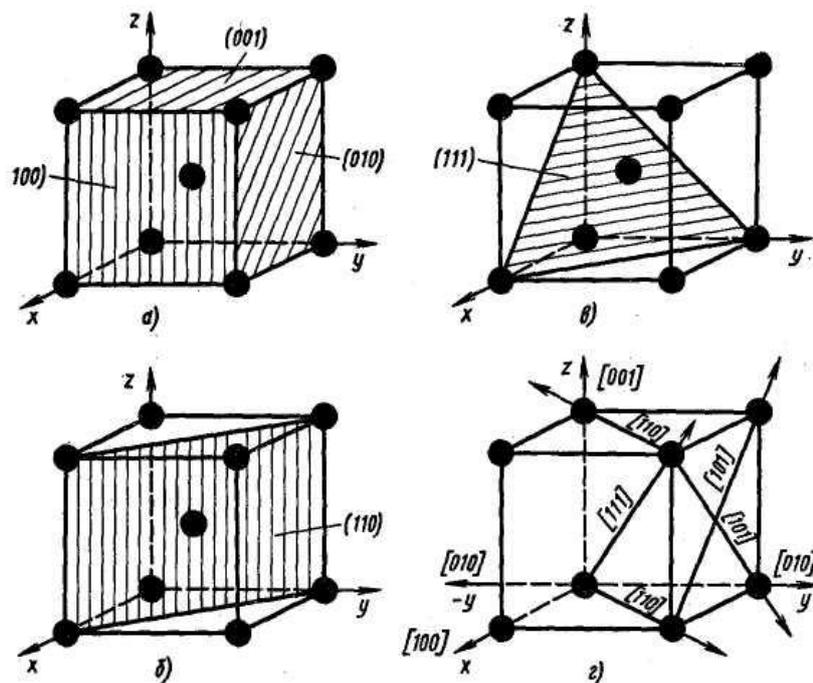


Рис. 4. Индексы кристаллографических индексы плоскостей (а-в) и направлений (г) в ОЦК решетки

Дефекты кристаллического строения. Кристаллы металлов обычно имеют небольшие размеры, поэтому металлические изделия состоят из очень большого числа кристаллов. В процессе кристаллизации они приобретают неправильную форму. Кристаллы неправильной формы называются *зернами*, или кристаллитами.

В любом реальном кристалле всегда имеются дефекты строения. Дефекты строения подразделяются по геометрическим признакам на точечные, линейные и поверхностные.

Размеры *точечных дефектов* не превышают несколько атомных диаметров. К точечным дефектам относятся *вакансии* (узлы кристаллической решетки, в которых отсутствуют атомы) и *межузельные атомы* (обра-

зуются в результате перехода атома из узла решетки в междузвье). Такие дефекты вызывают местное искажение решетки.

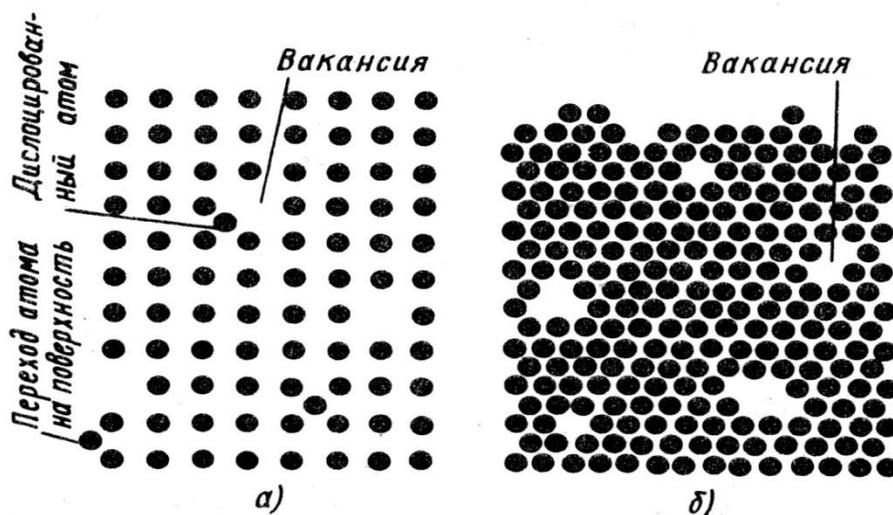


Рис. 5. Точечные дефекты кристаллической решетки

Линейные дефекты имеют малые размеры в двух измерениях и большую протяженность в третьем измерении (рис. 6). К ним относятся *дислокации* – *краевые* и *винтовые*. Краевая дислокация представляет собой лишнюю незаконченную атомную плоскость (экстраплоскость). Если экстраплоскость находится в верхней части кристалла, то краевую дислокацию считают положительной и обозначают \perp , а если в нижней части кристалла, то дислокация считается отрицательной и обозначается \dashv . При закручивании дислокации в спираль образуется винтовая дислокация.

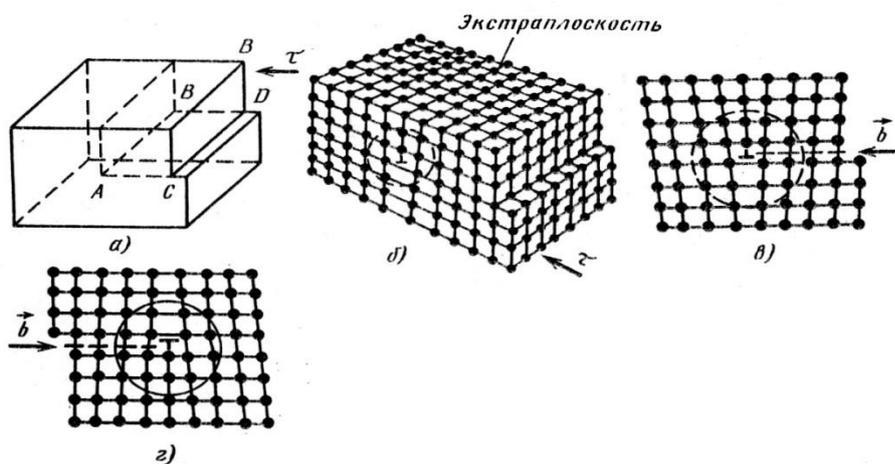


Рис. 6. Краевые дислокации (τ – вектор сдвига)
 а – сдвиг, создавший краевую дислокацию;
 б – пространственная схема краевой дислокации;
 в, г – схемы расположения атомов у дислокации

Поверхностные дефекты являются двухмерными, т.е. они имеют малые размеры в одном измерении и большую протяженность в двух других измерениях. Такие дефекты представляют собой поверхности раздела между отдельными зёрнами или субзёрнами кристаллической решетки.

Механизмы торможения дислокаций. В металле существует множество всевозможных препятствий для движения дислокаций. Но наиболее существенные из них можно представить в виде шести основных механизмов.

1. При пересечении двух дислокаций, движущихся в различных плоскостях, возникают пороги, требующие для своего образования и продвижения в металле дополнительной энергии, т.е. роста действующего напряжения.

2. Если встречаются три дислокации под углом около 120° , то возникает «замок» Ломера, совершенно лишенный подвижности и тормозящий движение других дислокаций.

3. Заметное торможение вызывают «облака Коттрелла», состоящие из инородных атомов, собирающихся вблизи дислокации в области с меньшей плотностью упаковки. При движении дислокации «облако» устремляется за ней. Так как в холодном металле диффузия протекает очень медленно, поэтому скорость облака невелика, что тормозит движение дислокации. Лишь при очень большом напряжении дислокация может вырваться из облака и начать скользить свободно.

4. Дислокации могут сильно тормозиться упругими искажениями кристаллической решетки вследствие действия остаточных напряжений III рода (напряжения, возникающие внутри объема, охватывающего несколько ячеек кристаллической решетки).

5. Очень эффективно торможение дислокаций мелкими включениями какой-либо твердой фазы. Если эти включения крупны и расположены редко, то дислокация, дойдя до них, упруго изгибается и вынуждена с большим трудом продвигаться между ними, на что требуется дополнительная затрата энергии.

6. При переходе из одного зёрна в другое дислокация встречает трудно преодолимый барьер – границу зёрна. То же происходит и внутри зёрна при прохождении через границы блоков. Чем мельче зёрна (или блоки), тем чаще дислокации тормозятся границами, тем выше предел текуче-

сти металла. Эта зависимость выражается так называемым уравнением Петча:

$$\sigma_T = \sigma_0 + k d^{-0,5},$$

где σ_T – предел текучести;

σ_0 – напряжение, необходимое для продвижения дислокации через границу блока (зерна);

k – коэффициент, учитывающий трудность прохождения дислокации сквозь границу блока;

d – средний поперечник блока (зерна).

Учитывая, что σ_0 охватывает все первые пять механизмов торможения дислокаций, можно развернуть уравнение Петче, придав ему следующий вид:

$$\sigma_T = \sigma_{\Pi} + \sigma_3 + \sigma_K + \sigma_d + H_{III} + k d^{-0,5},$$

где σ_{Π} и σ_3 – напряжения, необходимые для преодоления дислокацией порогов и замков соответственно;

σ_K – напряжения, необходимые для преодоления дислокацией облаков Коттрелла;

σ_d – напряжения, необходимые для преодоления дислокацией дисперсных частиц;

H_{III} – напряжения III рода.

Таким образом, действием одного или нескольких механизмов торможения дислокаций может быть повышен предел текучести. Однако необходимо учитывать, что чем труднее двигаться дислокациям, тем меньшей оказывается пластичность металла. Поэтому обычно повышение прочности металла сопровождается падением его пластичности. Можно выбрать более или менее выгодное соотношение прочности и пластичности, радикальное же решение вопроса – в создание бездислокационного металла, которое пока невозможно.

ЛЕКЦИЯ 2

Введение. Классификация материалов.

Кристаллическое строение и свойства металлов (*продолжение*).

Пластическая деформация и рекристаллизация металлов.

Основы теории сплавов.

План лекции 2

Тема 1.3. Методы измерения твердости (методы Бринелля, Роквелла, Виккерса, микротвердость, Польди, Шора, Мооса).

Раздел 2. Пластическая деформация и рекристаллизация металлов.

Тема 2.1. Наклеп и его влияние на свойства металлов. Использование наклепа в промышленности.

Тема 2.2. Рекристаллизационный отжиг. Холодная и горячая обработка металлов давлением. Понятие жаропрочности.

Раздел 3. Основы теории сплавов.

Тема 3.1. Виды сплавов. Правило фаз. Термический анализ. Построение диаграмм состояния.

Тема 3.2. Диаграммы состояния двойных сплавов.

Твердость. Под твердостью понимают свойство поверхностного слоя материала сопротивляться упругой и пластической деформации или разрушению при местных контактных воздействиях со стороны другого, более твердого тела (индентора) определенной формы и размера.

Индентор – тело правильной геометрической формы (шар, конус, трех- и четырехгранная пирамиды) изготавливается из прочных материалов: закаленной стали, твердого сплава или алмаза.

Очень важно правильно подготовить поверхностный слой образца. Чем меньше глубина вдавливания индентора, тем выше требуется чистота поверхности и тем более строго нужно следить, чтобы свойства поверхностного слоя не изменились вследствие наклепа или разогрева при шлифовании и полировки.

Классификация методов измерения твердости. По характеру воздействия индикатора на поверхность испытуемого материала различают:

I. Методы вдавливания.

1. Метод Бринелля: в испытуемый металл под определенной постоянной нагрузкой вдавливается стальной закаленный шарик соответствующего диаметра. Шарик оставляет на испытуемой поверхности отпечаток -

лунку, размер которой зависит от твердости материала. Отношение нагрузки P , кгс, к площади сферической поверхности отпечатка – лунки F , мм², называют числом твердости по Бринеллю и обозначают через HB , кгс/мм²:

$$HB = P / F.$$

Если поверхность отпечатка выразить через диаметр шарика D и диаметр отпечатка d , то число твердости по Бринеллю определяется по формуле, кгс/мм²

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

Диаметр отпечатка d измеряют бинокулярной лупой, имеющей шкалу с делениями с точностью до сотых долей миллиметра. Во избежание остаточной деформации стального шарика необходимо, чтобы твердость его была в 1,5 раза выше твердости испытываемых материалов, поэтому для испытания материалов с твердостью более 450 кгс/мм² по HB применять метод Бринелля не рекомендуется. Область применения: определение твердости чугунов, пластичных сталей и цветных сплавов.

2. Метод Роквелла более универсален, так как позволяет испытывать металлы любой твердости, включая и твердые сплавы. Число твердости при испытании определяется непосредственно отсчетом по шкале индикатора. Их три: A , B , C . Шкала B (красная) – применяется для измерения твердости пластичных и отожженных материалов, шкала C – для измерения твердости закаленных сталей, шкала A – для измерения твердости наиболее твердых материалов – твердых сплавов. В соответствии с вышеизложенным применяют два индентора – стальной закаленный шарик диаметром 1,588 мм и алмазный или твердосплавный конус с углом при вершине 120°. Для уменьшения погрешности измерения используют предварительное нагружение с $P = 100$ Н и окончательное P_1 определяемое шкалой (шкала A – 500Н, шкала B – 900 Н, шкала C – 1400 Н).

Число твердости обозначается формулой HRC (HRA) = 100 – e , где $e = (h - h_0) / 0,002$ мм (0,002 мм – цена деления шкалы индикатора прибора для испытания твердости по Роквеллу).

Твердость по шкале B $HRB = 130 - e$.

3. Метод Виккерса применяют при определении твердости поверхностных слоев (цементируемых, азотированных) и образцов материалов различной твердости в тонких сечениях. При измерении твердости по Виккерсу, HV , в испытываемый материал вдавливаются четырехгранная алмазная

пирамида с углом при вершине 136° . Нагрузка может меняться от 10 до 1000Н. Твердость по Виккерсу, кгс/мм²:

$$HV = \frac{2P \sin(\alpha/2)}{d^2} = 1,854 \frac{P}{d^2},$$

где P – нагрузка, кгс; α - угол при вершине индентора, равный 136° ; d – среднее арифметическое длин обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм.

При определении твердости на приборе Виккерса измеряют длину диагоналей с помощью измерительного микроскопа и по таблице определяют число твердости в зависимости от выбранной испытательной нагрузки.

4. Микротвердость. Метод предназначен для определения твердости очень малых (микроскопических) объемов материалов. В качестве индентора при измерении микротвердости чаще всего используют, как и в случае определения твердости по Виккерсу, правильную четырехгранную алмазную пирамиду с углом при вершине 136° . Нагрузка может меняться от 0,5 до 5Н.

Главное преимущество метода микротвердости – это возможность определения твердости отдельных фаз и структурных составляющих.

5. Метод Полюди используют для контроля крупногабаритных изделий и деталей, установка которых на специальном приборе затруднена.

Принцип действия прибора сводится к тому, что под действием наносимого удара одновременно вдавливаются в испытываемую поверхность и эталонный образец с известной твердостью. Зная твердость эталонного образца и измерив диаметры отпечатков на эталонном образце и на испытываемой поверхности, определяют твердость по специальной формуле.

II. Методы царапания поверхности (метод Мооса) состоят в нанесении царапины на поверхность на поверхности образца алмазным или другим недеформирующимся индентором. Метод не стандартизован и на практике используют различные критерии твердости царапанием.

Часто за критерий твердости принимают одну из следующих характеристик:

а) величину нагрузки, при которой получается царапина шириной 10 мкм;

- б) ширину царапины при заданной нагрузки;
- б) комплексный показатель, определяя величину нагрузки и ширину царапины.

III. Методы по отскоку наконечника (метод Шора). Твердость определяется при помощи бойка, который падает на поверхность образца. Чем больше высота подъема бойка после удара, тем больше его твердость.

Кратковременность соприкосновения бойка с образцом и простота метода позволяют измерить твердость материалов не только при комнатной температуре, но и в нагретом состоянии.

Наклеп – это упрочнение металла под действием пластической деформации. Упрочнение металла в процессе пластической деформации объясняется увеличением числа дефектов кристаллического строения (вакансий, междоузельных атомов, дислокаций). Пара движущихся дислокаций порождает сотни и сотни новых, в результате этого плотность дислокаций повышается. Следовательно, повышается сопротивление деформации и уменьшается пластичность. Наибольшее значение имеет увеличение плотности дислокаций, так как возникающие при этом между ними взаимодействия тормозит дальнейшее их перемещение.

Беспорядочно ориентированные кристаллы под действием деформации поворачиваются осями наибольшей прочности вдоль направления деформации. Все зерна оказываются одинаково ориентированными. Закономерная ориентация кристаллов относительно внешних деформационных сил называется текстурой.

Состояние наклепанного (деформированного) металла термодинамически неустойчиво. При нагреве в нем возникают процессы, связанные с переходом к более устойчивой структуре с изменением всех свойств. Протекающие процессы зависят от температуры (рис. 7).

При небольшом нагреве (для железа 300-400⁰С) начинается процесс **возврата** (отдых), который повышает структурное совершенство наклепанного металла, но без заметных изменений структуры по сравнению с деформированным состоянием.

В процессе можно выделить две стадии. При более низких температурах (ниже $0,2 \cdot T_{пл}$, где $T_{пл}$ – абсолютная температура плавления) уменьшается плотность точечных дефектов (вакансий), наблюдается снятие искажений кристаллической решетки, также уменьшается плотность дислока-

ций в результате их взаимного уничтожения (аннигиляция). В результате твердость и прочность несколько понижается (на 20-30 % по сравнению с исходным состоянием).

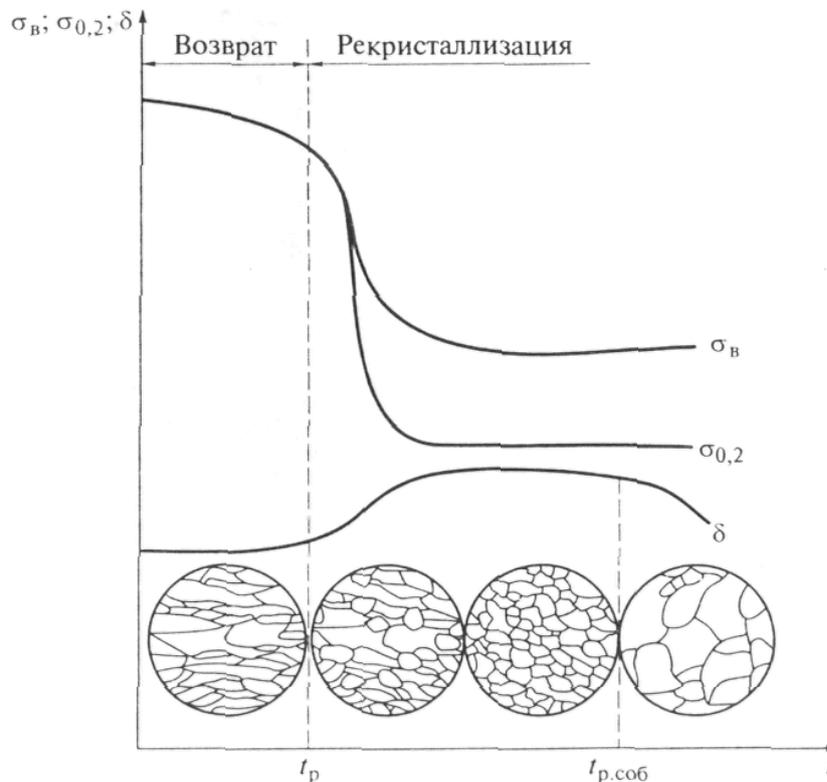


Рис. 7. Влияние нагрева на механические свойства (предел прочности $\sigma_{\text{в}}$, предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение δ) и изменение структуры деформированного металла: $t_{\text{р}}$ – температура рекристаллизации; $t_{\text{р.соб}}$ – температура собирательной рекристаллизации

Вторая стадии возврата – **полигонизация** (после небольших деформациях при нагреве до $(0,25-0,3) \cdot T_{\text{пл}}$). Процесс характеризуется тем, что избыточные дислокации одного знака выстраиваются в дислокационные стенки, образуя сетку и создавая ячеистую структуру, т.е. наблюдается фрагментация кристаллитов на субзерна (полигоны) с малоугловыми границами.

При дальнейшем повышении температуры подвижность атомов возрастает, и при достижении определенной температуры образуются новые равноосные зерна – **первичная рекристаллизация**. В результате рекристаллизации наклеп практически полностью снимается, при этом резко снижается прочность, пластичность возрастает. Свойства приближаются к

их исходным значениям. Разупрочнение объясняется снятием искажения решетки и резким уменьшением плотности дислокаций.

Наименьшая температура начала рекристаллизации, при которой протекает рекристаллизация и наблюдается разупрочнение, называется температурным порогом рекристаллизации или температурой рекристаллизации $T_{рек}$ и может быть определена по формуле А.А. Бочвара:

$$T_{рек} = \alpha T_{пл},$$

где α – коэффициент, зависящий от состава и структурного состояния металла (для чистых металлов $\alpha = 0,1–0,2$; для металлов технической чистоты $\alpha = 0,3–0,4$; для сплавов $\alpha = 0,6–0,8$); $T_{пл}$ – абсолютная температура плавления, К.

После завершения первичной рекристаллизации в процессе последующего нагрева происходит рост одних рекристаллизованных зерен за счет других – **собирательная рекристаллизация**. При более высоких температурах может уменьшиться пластичность, что объясняется сильным ростом зерна, т.е. явлением перегрева при рекристаллизации.

Температура рекристаллизации имеет важное практическое значение. Для восстановления структуры и свойств наклепанного металла (например, при необходимости продолжить обработку давлением путём прокатки, протяжки, волочения и т.п.), его надо нагреть выше температуры рекристаллизации. Такая обработка называется *рекристаллизационным отжигом*.

В зависимости от соотношения температуры деформации и температуры рекристаллизации различают холодную и горячую деформации. Пластическое деформирование выше температуры рекристаллизации, хотя и приводит к упрочнению, но это упрочнение устраняется протекающим при этих температурах процессом рекристаллизации. Следует отметить, что рекристаллизация протекает не во время деформации, а сразу после ее окончания тем быстрее, чем выше температура. При очень высокой температуре, значительно превышающей температуру рекристаллизации, она завершается за секунды и даже доли секунд.

Следовательно, при пластическом деформировании выше температуры рекристаллизации упрочнение и наклеп металла, если и произойдут, то будут немедленно сниматься. Такая обработка, при которой нет упрочнения (наклепа), называется *горячей обработкой давлением*. Обработка

давлением (пластическая деформация) ниже температуры рекристаллизации вызывает наклеп и называется *холодной обработкой*.

В промышленности широко применяются не металлы, а их сплавы. Под *сплавом* понимается вещество, получаемое сплавлением двух или более элементов. Различают следующие *типы сплавов*: механические смеси, твердые растворы и химические соединения.

Механическая смесь двух компонентов А и В образуется тогда, когда они неспособны к взаимному растворению в твердом состоянии и не вступают в химическую реакцию с образованием соединения, то есть силы притяжения между одноименными атомами преобладают над силами притяжения между разноименными атомами. Поэтому образуются зерна как компонента А, так и компонента В, и наблюдается сохранения их кристаллического строения.

Твердые растворы – это фазы, в которых один из компонентов сохраняет свою кристаллическую решетку, а атомы другого компонента располагаются в решетке первого компонента (растворителя), изменяя ее размеры, то есть твердый раствор состоит из двух или нескольких компонентов, имеющих один тип кристаллической решетки, и представляет собой одну фазу. Различают:

- 1) *твердые растворы внедрения* (атомы растворенного компонента располагаются в междоузлиях кристаллической решетки растворителя);
- 2) *твердые растворы замещения* (атомы растворенного компонента замещают часть атомов растворителя в его кристаллической решетки).

Твердые растворы замещения имеют большую растворимость, для увеличения растворимости необходимо соблюдать следующие условия:

- 1) одинаковый тип решетки компонентов;
- 2) разница атомных диаметров не должна превышать 8%, что снизит искажения кристаллического строения;
- 3) свойства компонентов должны быть близкими.

Химические соединения разнообразны, они имеют следующие характерные особенности:

- 1) образуется новая кристаллическая решетка, отличная от решеток компонентов, образующих соединение;
- 2) в соединении всегда сохраняется простое кратное соотношение компонентов (состав можно отразить формулой A_nB_m , где А и В – соответствующие элементы, n и m – простые числа);

3) свойства соединения резко отличаются от свойств образующих его компонентов.

Правило фаз. Общие закономерности сосуществования устойчивых фаз, отвечающих теоретическим условиям равновесия, могут быть выражены в математической форме, называемой *правилом фаз*, или *законом Гиббса*. Правило фаз дает количественную зависимость между степенью свободы системы и количества фаз и компонентов:

$$C = K + П - \Phi$$

где C – число степеней свободы (вариантность), т.е. число внешних и внутренних факторов, которое может изменяться без изменения числа фаз в системе;

K – количество компонентов (веществ, образующих систему);

Π – число внешних и внутренних факторов (температура, давление и концентрация), воздействующих на систему;

Φ – число фаз; фаза – это однородная часть системы, отделенная от других частей системы поверхностью раздела, при переходе через которую свойства изменяются скачкообразно.

Так как в дальнейшем мы будем рассматривать влияние температуры (охлаждение или нагрев системы), то правило фаз можно записать следующим образом:

$$C = K + 1 - \Phi$$

Ниже представлены примеры построения кривых охладений с применением правила фаз для чистого металла A и твердого α - раствора.

Задача 1: Построить кривую охлаждения для чистого металла А (K=1).

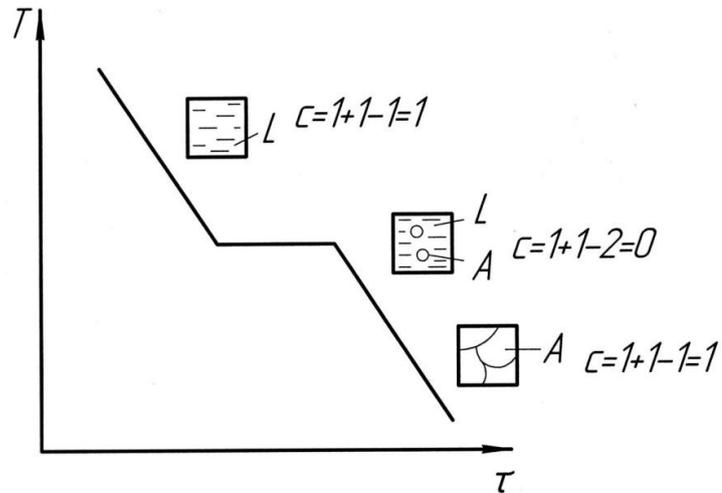


Рис. 8. Кривая охлаждения чистого металла

Задача 2: Построить кривую охлаждения для твердого α - раствора, то есть сплава (K=2).

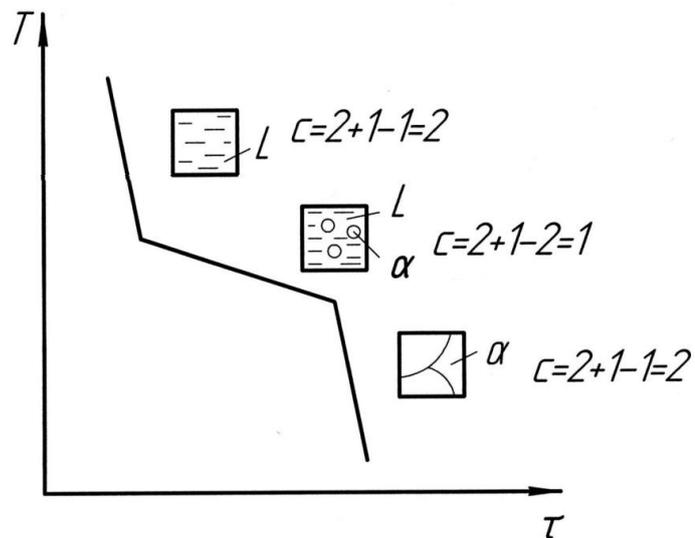


Рис. 9. Кривая охлаждения сплава

Диаграммы состояния сплавов. Диаграмма состояния представляет собой графическое изображение состояния сплава.

Построение диаграммы состояния. Если залить в тигли сплавы, состоящие из двух компонентов А и В, причем концентрация в каждом тигле должна быть различной (от 100% А до 100% В), и провести термический анализ, то можно получить серию кривых охладений (рис.10).

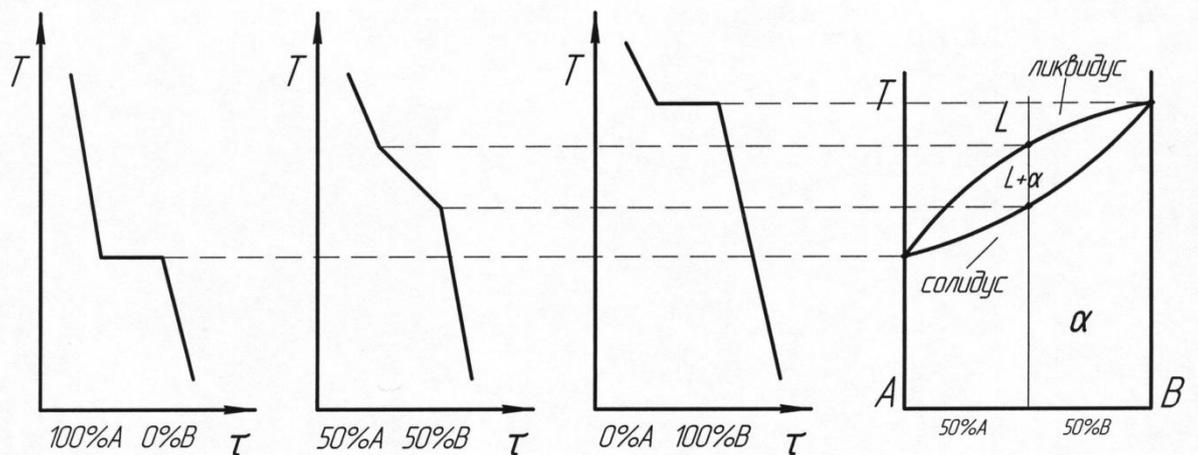


Рис. 10. Построение диаграммы состояния двухкомпонентного сплава

Спроецировав точки начала и конца кристаллизации на оси температур и введя ось концентрации, можно получить *диаграмму состояния*.

Диаграммы состояния сплавов, образующих неограниченные твердые растворы. Оба компонента неограниченно растворимы в жидком и твердом состояниях и не образуют химические соединения, поэтому возможно существование только двух фаз – жидкого раствора L и твердого раствора α . Следовательно, трех фаз быть не может, кристаллизация при постоянной температуре не наблюдается, и горизонтальной линии на диаграмме нет. Диаграмма, изображенная на рис.11, как бы состоит из двух линий: верхняя линия отделяет жидкую фазу, являясь *линией ликвидус*, и нижняя линия отделяет твердую фазу, являясь *линией солидус*.

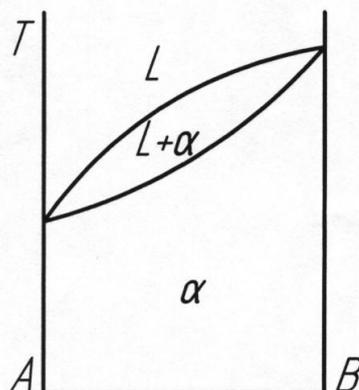


Рис. 11. Диаграмма состояния сплавов, образующих неограниченные твердые растворы

Диаграмма состояния сплавов, образующих неограниченные твердые растворы, состоит из трех областей: жидкость L , жидкость L + твердый раствор α и твердый раствор α .

ЛЕКЦИЯ 3

Основы теории сплавов (продолжение).

Сплавы на основе железа.

План лекции 3

Раздел 3. Основы теории сплавов

Тема 3.2. Диаграммы состояния двойных сплавов (продолжение).

Тема 3.3. Правило Курнакова. Связь между типом диаграммы состояния двойных сплавов и свойствами сплавов.

Раздел 4. Сплавы на основе железа.

Тема 4.1. Железо и его сплавы. Поллиморфизм железа. Железо и углерод. Диаграмма состояния сплавов железа с углеродом.

Диаграммы состояния сплавов, образующих механические смеси из чистых компонентов. Оба компонента в жидком состоянии неограниченно растворимы, а в твердом состоянии нерастворимы и не образуют химических соединений. В этом случае диаграмма имеет вид, представленный на рис.12.

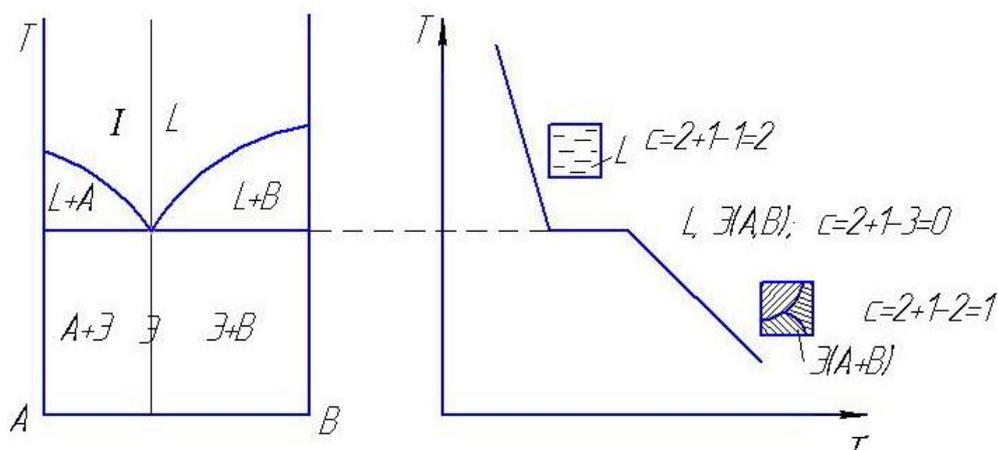


Рис.12. Диаграмма состояния и кривая охлаждения сплавов, образующих механические смеси из чистых компонентов

Сплав *I* при охлаждении до температуры кристаллизации затвердевает при одновременном выделении из жидкости кристаллов обоих компонентов А и В. В момент кристаллизации $c = 2 + 1 - 3 = 0$. Такой сплав, имеющий мелкокристаллическое строение и представляющий собой хорошо организованную механическую смесь с минимальной температурой плавления, называют *эвтектикой*.

Диаграммы состояния сплавов, образующих ограниченные твердые растворы. Оба компонента неограниченно растворимы в жидком состоянии, ограниченно в твердом и не образуют химических соединений (рис. 13).

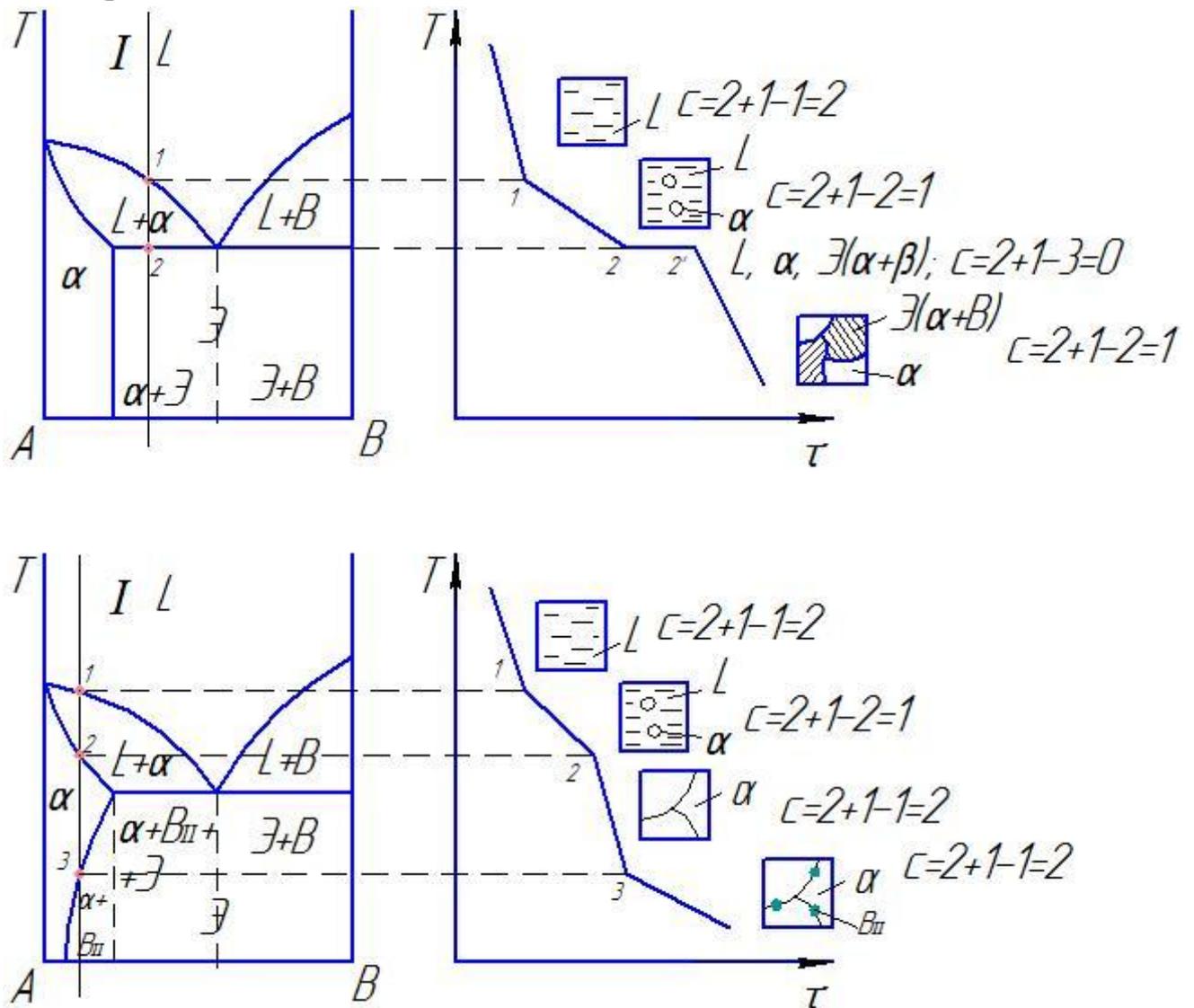


Рис. 13. Диаграммы состояния и кривые охлаждения сплавов, образующих ограниченные твердые растворы с постоянной и переменной растворимостью

В сплавах такого рода возможно существование: жидкой фазы L , жидкого раствора компонента В в А, который будет называться α -раствором, и (или) твердого раствора компонента А в В, который обозначается через β . В этих сплавах возможно неинвариантное равновесие при одновременном сосуществовании трех фаз: L , α и β ; в данном случае (рис. 13): L , α и β . В зависимости от того, какая реакция протекает в условиях существования трех фаз, могут быть два вида диаграмм: диаграмма с эвтектическим превращением (рис. 13) и диаграмма с перитектическим превращением (рис. 14).

В отличие от верхней диаграммы, изображенной на рис.13, на диаграмме, представленной внизу рис.13, видно, что растворимость В в А с понижением температуры уменьшается. Это приводит к пересыщению раствор L , и из него должен выделиться избыточный компонент В. Кристаллы В, выделяющиеся из твердого раствора, называют *вторичными кристаллами* и часто обозначают символом, имеющим индекс II: в данном случае β_{II} . Процесс выделения вторичных кристаллов из твердой фазы носит название *вторичной кристаллизации*.

При эвтектическом превращении жидкость кристаллизуется с образованием двух твердых фаз. Возможен и другой тип неинвариантного превращения, когда жидкость реагирует с ранее выпавшими кристаллами и образуется новый вид кристаллов. Реакция подобного типа называется *перитектической* (рис. 14).

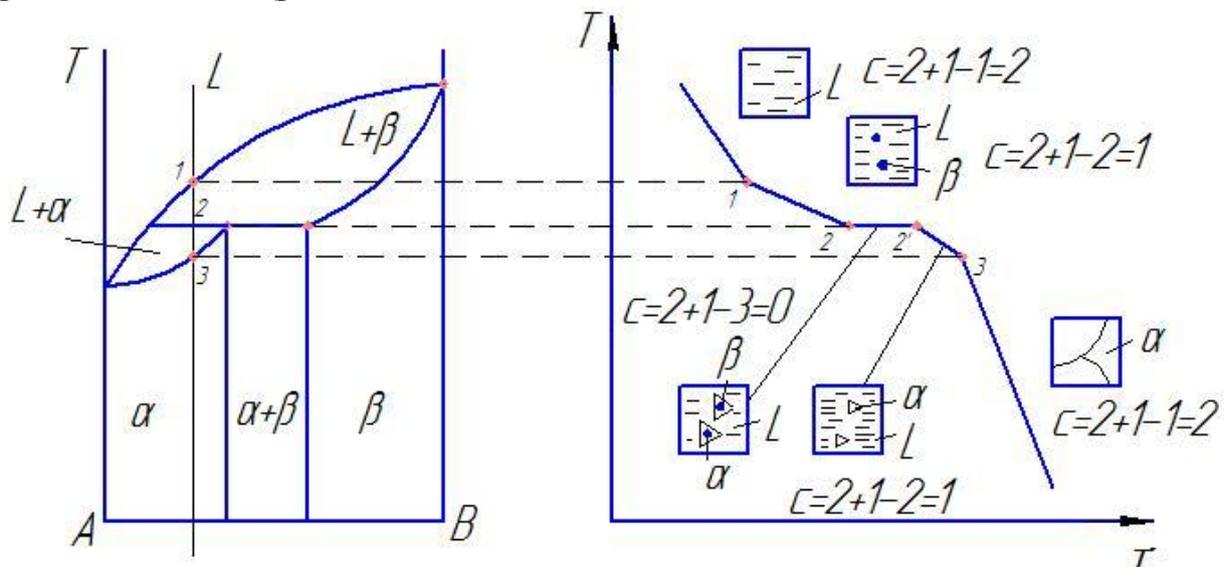


Рис. 14. Диаграмма состояния и кривая охлаждения сплавов с перитектическим превращением

Диаграммы состояния сплавов, испытывающих полиморфные превращения. Вид диаграммы состояния зависит от соединений, образующихся между аллотропическими формами обоих компонентов. Если полиморфизм присущ обоим компонентам, и высокотемпературные модификации неограниченно растворимы друг в друге, а низкотемпературные - нерастворимы, то диаграмма состояния имеет вид, показанный на рис. 15.

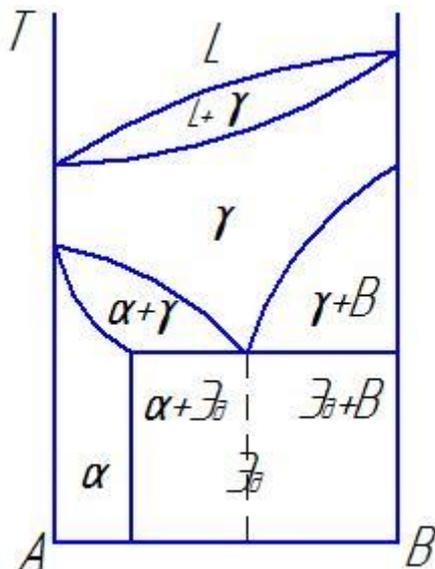


Рис. 15. Диаграмма состояния сплавов, испытывающих полиморфные превращения

Видно, что ниже некоторой температуры образовавшийся твердый раствор γ распадается в механическую смесь, которая подобна эвтектике, но образуется не из жидкой фазы, а из твердого раствора и называется *эвтектоидом*. В данном случае $\mathcal{E}_\delta = \alpha + B$.

Диаграммы состояния сплавов, образующих химические соединения. Такая диаграмма представлена на рис. 16. Данное химическое соединение A_nB_m устойчиво, поэтому может быть нагрето без разложения до своей температуры плавления. Химическое соединение A_nB_m плавится при постоянной температуре и можно рассматривать как однокомпонентную смесь.

Кристаллизация сплавов по этой диаграмме происходит совершенно аналогично кристаллизации сплавов, образующих диаграммы с ограниченной растворимостью. Отличие состоит в том, что кроме выделения кристаллов чистых компонентов А и В и кристаллов твердых растворов,

происходит еще образование кристаллов химического соединения. Таким образом, диаграмма с химическим соединением представляет собой как бы приставленные одна к другой две простые диаграммы. Можно визуально разделить такую диаграмму на две части по вертикали, соответствующей химическому соединению, и изучать каждую часть диаграммы отдельно.

В данном случае (рис.16):

$$\alpha = A (A_nB_m), \gamma = A_nB_m (A), \mathcal{E}_1 = \alpha + \gamma; \beta = B (A_nB_m), \mathcal{E}_2 = A_nB_m + \beta.$$

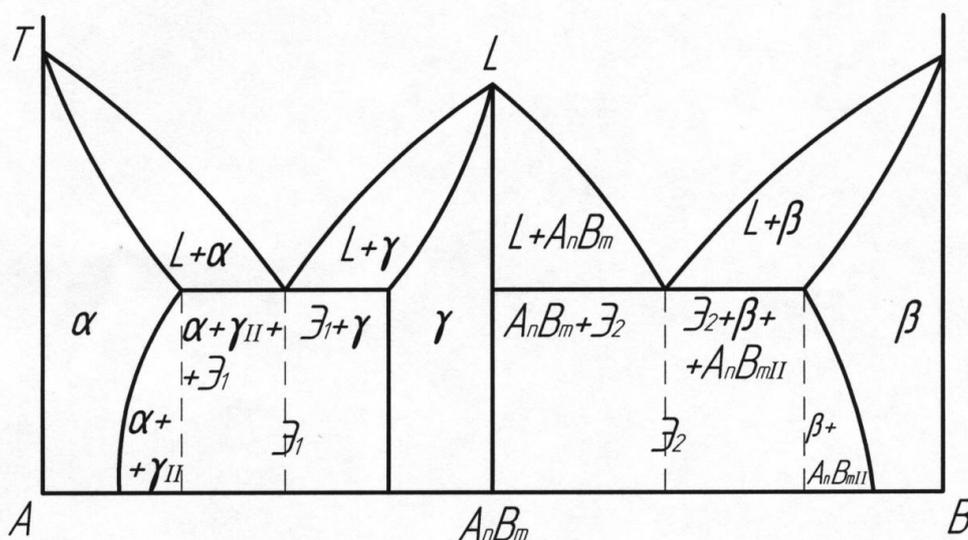


Рис.16. Диаграмма состояния сплавов, образующих химические соединения

Связь между видами диаграмм состояния и свойствами сплавов.

Между составом и структурой сплава, определяемой диаграммой состояния и свойствами сплава, существует определенная зависимость.

Сплавы эвтектического состава отличаются средней прочностью и пластичностью, но исключительно хорошими линейными свойствами, так как имеют высокую жидкотекучесть и очень малую усадку (поскольку кристаллизуются при постоянной температуре).

Твердые растворы однородны, а потому имеют повышенную прочность и пластичность, ковки, но имеют очень высокое электросопротивление и плохие литейные свойства.

Химические соединения устойчивы, тверды, но чрезвычайно хрупки. Переход сплава в однофазное состояние повышает пластичность, распад твердого раствора – понижает ее.

Коррозионная стойкость высока у чистых металлов, ниже – твердых растворов и наименьшая – у механических смесей.

Сплавы на основе железа.

Железо – металл сероватого цвета. Температура плавления железа 1539°C , плотность - $7,8 \text{ г/см}^3$. Железо имеет две полиморфные модификации α и γ . Модификация α – железа существует при температуре ниже 911°C и выше 1392°C . В интервале температур $1392\text{-}1539^{\circ}\text{C}$ α – железо нередко обозначают как δ - железо.

Кристаллическая решетка α – железа – объемно центрированный куб с периодом решетки $0,28606 \text{ нм}$. До температуры 768°C α – железо магнитно (ферромагнетик). Температуру 768°C , соответствующую магнитному превращению, т.е. переходу из ферромагнитного состояния в парамагнитное, называют точкой Кюри.

γ – железо существует при температуре $911 – 1392^{\circ}\text{C}$, оно парамагнитно. Кристаллическая решетка γ – железа гранецентрированная кубическая с периодом решетки $a = 0,3645 \text{ нм}$.

Диаграмма состояния железо-углерод в интервале концентрации от железа до цементита представлена на рис. 17.

Ось концентраций двойная: содержание углерода и содержание цементита. Линия *ABCD* является ликвидусом системы, линия *АНJESF* – солидусом. Железо, кроме того, что образует с углеродом химическое соединение Fe_3C , имеет две аллотропические формы α и γ (до 911°C атомы железа образуют объемно центрированную кубическую решетку Fe_α , выше 911°C гранецентрированную Fe_γ), поэтому в системе существуют следующие фазы:

жидкость (жидкий раствор углерода в железе) существует выше линии ликвидус и обозначается буквой *L*;

цементит Fe_3C (линия *DFKL*) обозначается буквой *Ц*;

феррит - твердый раствор углерода в $\text{Fe}-\alpha$, обозначается буквой Φ ;

аустенит - твердый раствор углерода в $\text{Fe}-\gamma$, обозначается буквой *A*.

Область существования феррита расположена левее линии *GPQ* и *АНN*, а область существования аустенита – левее линии *NJESG*.

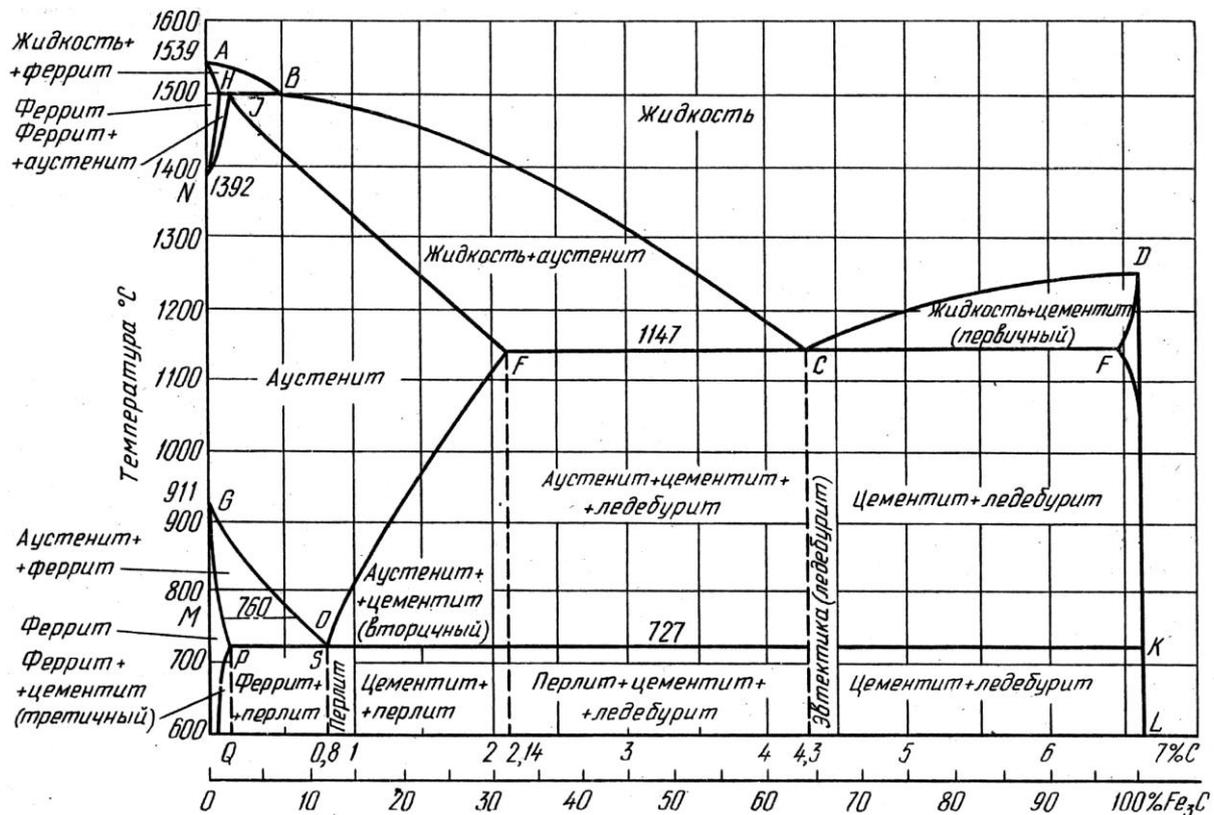


Рис. 17. Диаграмма состояния железо-углерод.

Три горизонтальные линии на диаграмме (*HJB*, *ECF* и *PSK*) указывают на протекание трех невариантных реакций.

1) При 1499°C (линия *HJB*) протекает перитектическая реакция:

$L_B + \Phi_H \rightarrow A_J$. В результате перитектической реакции образуется аустенит. Реакция эта наблюдается только у сплавов, содержащих углерода от 0,1 до 0,5 %.

2) При 1147°C (горизонталь *ECF*) протекает эвтектическая реакция:

$L_C \rightarrow A_E + \text{Ц}$. В результате данной реакции образуется эвтектическая смесь аустенита и цементита, называемая *ледебуритом*. Эта реакция протекает у всех сплавов, содержащих более 2,14% углерода.

3) При 727°C (горизонталь *PSK*) протекает эвтектоидная реакция:

$A_S \rightarrow \Phi_P + \text{Ц}$. В результате этой реакции образуется эвтектоидная смесь феррита и цементита, называемая перлитом.

ЛЕКЦИЯ 4

Сплавы на основе железа (продолжение)

План лекции 4

Тема 4.2. Углеродистые стали. Влияние химсостава на структуру и свойства стали. Влияние примесей на свойства сталей. Классификация и маркировка углеродистых сталей.

Тема 4.3. Чугуны. Влияние примесей на свойства чугунов. Белые, серые, высокопрочные и ковкие чугуны. Применение чугунов в машиностроении.

Тема 4.4. Фазовые превращения в сталях при нагреве и охлаждении. Аустенизация, перлитное и мартенситное превращения. Превращение при отпуске.

Стали. Сплавы железа с углеродом, которые содержат до 2,14% углерода, называются сталями. В сталях, кроме феррита и цементита, имеется также эвтектоидная структурная составляющая пластинчатого строения - перлит; в сталях, содержащих до 0,025% углерода, перлитной составляющей нет.

По структуре в равновесном состоянии углеродистые стали разделяют на *доэвтектоидные* (содержащие менее 0,8 углерода), *эвтектоидные* (содержащие 0,8 углерода) и *заэвтектоидные* (содержащие более 0,8 углерода).

Доэвтектоидные стали после отжига имеют *структуру феррита и перлита*. Чем больше в доэвтектоидной стали углерода, тем больше в ее структуре перлита и тем выше прочность стали (одновременно с повышением прочности уменьшается пластичность). *Эвтектоидная сталь* после отжига состоит *из перлита*. Она прочная, твердая, но пластичность меньше, чем у доэвтектоидной. *Заэвтектоидные стали* после отжига имеют *структуру перлита и вторичного цементита*, который обычно располагается в виде сетки. При увеличении содержания углерода твердость заэвтектоидных сталей увеличивается, а прочность снижается из-за увеличения хрупкости. Именно поэтому на практике применяются стали содержащие менее 1,3% углерода.

Для повышения пластичности и улучшения обрабатываемости резанием заэвтектоидные стали подвергают специальному отжигу, при котором весь цементит выделяется в виде зерен. Эти зерна находятся в ферри-

те. Такая зернистая смесь называется *зернистым перлитом*. Микроструктуры сталей приведены на рис.18.

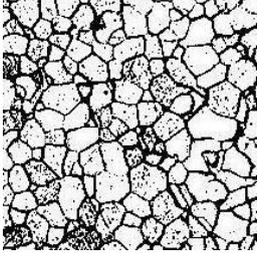
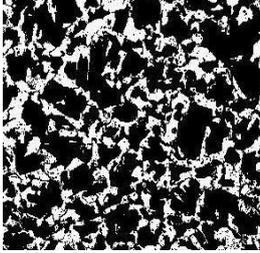
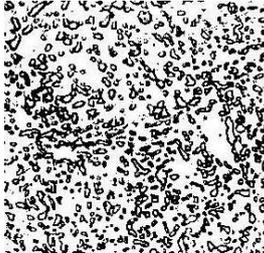
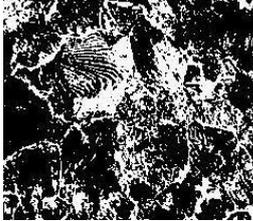
Армко-железо (феррит)		Доэвтектоидная сталь (феррит и перлит)	
			
Эвтектоидная сталь (пластинчатый перлит)	Эвтектоидная сталь (зернистый перлит)	Заэвтектоидная сталь (перлит и цементит)	
			

Рис.18. Микроструктуры углеродистых сталей

Чугуны. Сплавы железа с углеродом, которые содержат более 2,14% углерода, называются чугунами. Кроме углерода, чугуны содержат повышенное количество кремния, марганца, серы и фосфора. Углерод в чугуне может находиться в связанном виде - в виде цементита или в свободном - в виде графита.

Различают следующие виды чугунов:

- 1) *белый чугун*, в котором весь углерод находится в связанном состоянии, в виде цементита (рис.19);
- 2) *серый чугун*, в котором большая часть или весь углерод находится в свободном состоянии в виде пластинчатого графита;
- 3) *ковкий чугун*, в котором большая часть или весь углерод находится в свободном состоянии в виде хлопьевидного графита;
- 4) *высокопрочный чугун*, в котором большая часть или весь углерод находится в виде шаровидного графита.

Белые чугуны получают при ускоренном охлаждении и повышенном содержании марганца (свыше 1%). В белом чугуне весь углерод находится в виде цементита (Fe_3C), поэтому этот чугун очень твердый и хрупкий. Структурные превращения происходят в соответствии с диаграммой Fe- Fe_3C . При кристаллизации белых чугунов образуется эвтектика - ледебурит. Как указывалось выше, ледебурит - это механическая смесь аустенита и цементита. Он образуется при температурах $1147^{\circ}C$; при $727^{\circ}C$ аустенит, входящий в состав ледебурита, превращается в перлит; ниже $727^{\circ}C$ ледебурит представляет собой смесь перлита и цементита.

По содержанию углерода белые чугуны делятся на *доэвтектические* (2 - 4,3%), *эвтектические* (4,3%) и *заэвтектические* (больше 4,3%). Доэвтектические белые чугуны имеют структуру, состоящую из перлита, вторичного цементита и ледебурита. Чем больше углерода в доэвтектическом чугуне, тем больше содержание ледебурита. Эвтектический белый чугун состоит только из ледебурита. Заэвтектический чугун состоит из крупных пластин первичного цементита и ледебурита. Чем больше углерода в заэвтектическом чугуне, тем больше он содержит первичного цементита.



Рис.19. Микроструктуры белых чугунов

Свойства чугуна определяются структурой металлической основы и формой графита.

Металлическая основа серого, ковкого и высокопрочного чугунов бывает ферритной (наименее прочные чугуны), феррито-перлитной, перлитной (наиболее прочные чугуны).

Серый чугун получается при медленном охлаждении и повышенном содержании кремния (до 3%). Свойства серого чугуна зависят от количества и формы графита и структуры металлической основы. Графит выделяет-

ся в виде пластин, такие включения являются внутренними надрезами, которые значительно снижают прочность чугуна. Прочность серых чугунов на растяжение находится в пределах 100 - 350 МПа (ГОСТ 1412-85).



Рис.20. Микроструктуры чугунов

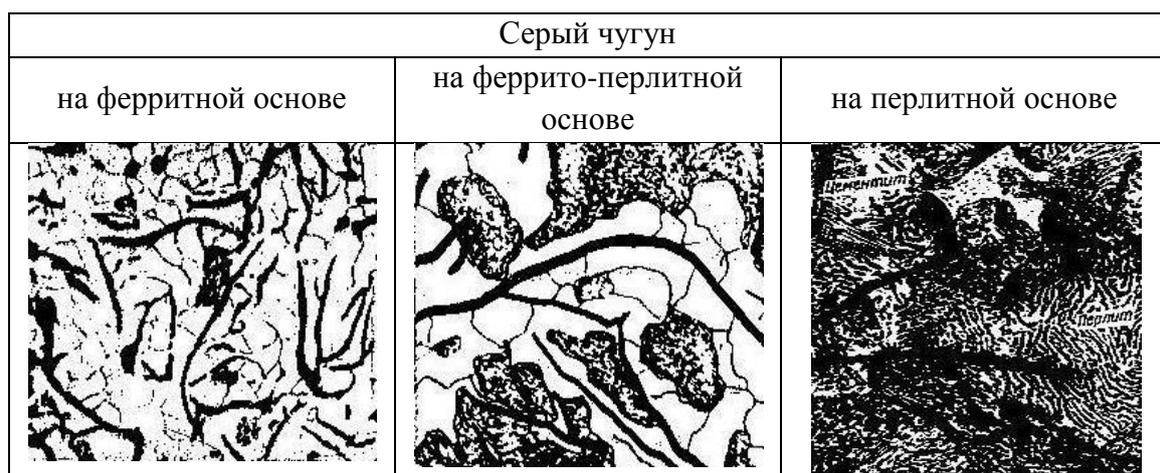


Рис.21. Микроструктуры серых чугунов

Ковкий чугун получают при длительном нагреве при высоких температурах (отжиг 900 - 1000°C) отливок из белого чугуна. При этом цементит распадается и образуется графит хлопьевидной формы. Такой графит по сравнению с пластинчатым значительно меньше снижает прочность и пластичность металлической основы.

Прочность ковкого чугуна может меняться от 300 до 800 МПа (ГОСТ 26358-87). Кроме того, ковкий чугун более пластичен, чем серый. Относительное удлинение равно 2-15%.

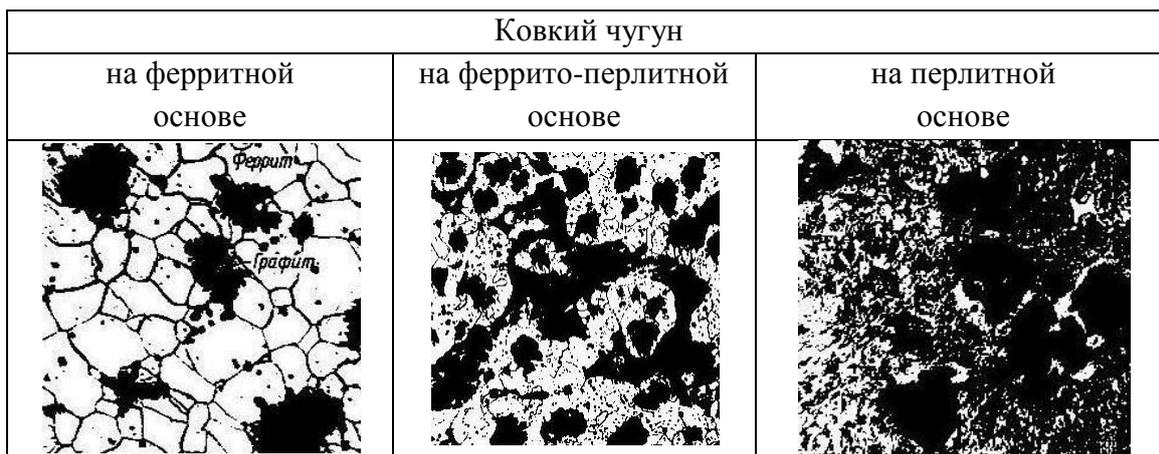


Рис.22. Микроструктуры ковких чугунов

Высокопрочный (модифицированный) чугун получают при модифицировании серых чугунов. Перед разливкой в чугун добавляют небольшое количество магния или церия (в количестве 0,03 - 0,08 % от массы обрабатываемого чугуна). Под воздействием этих элементов графит при кристаллизации принимает шаровидную форму. Шаровидный графит меньше ослабляет металлическую основу и обеспечивает высокие механические свойства. Прочность этого чугуна $\sigma_B = 350 - 1000$ МПа (ГОСТ 7293-85).

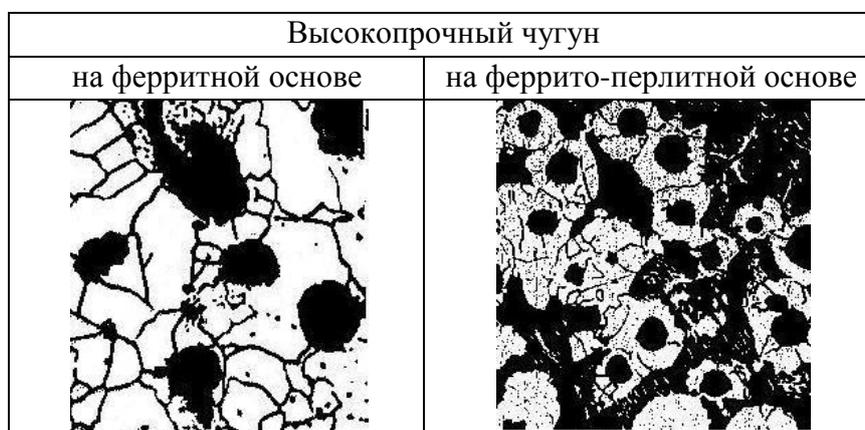


Рис.23. Микроструктуры высокопрочных чугунов

Влияние примесей на свойства чугуна. Обычный промышленный чугун – не двойной железуглеродистый сплав – он содержит те же примеси, что и углеродистая сталь (марганец, кремний, сера и фосфор), но в большем количестве, чем сталь. Эти примеси влияют на условия графитизации и, следовательно, на структуру и на свойства чугунов.

Кремний особенно сильно влияет на структуру чугуна, усиливая графитизацию. Содержание кремния в чугунах колеблется в широких пределах: от 0,3-0,5 до 3-5 %. Изменяя содержание кремния, можно получить чугуны, совершенно различные по свойствам и структуре – от малокремнистого белого до высококремнистого ферритного (например, высокопрочного чугуна с шаровидным графитом).

Марганец в отличие от кремния препятствует графитизации или, как говорят, способствует отбеливанию чугуна.

Сера также способствует отбеливанию чугуна, но одновременно ухудшает литейные свойства (например, снижает жидкотекучесть), поэтому содержание серы в чугунах лимитируется: для мелкого литья – 0,08 %, а для более крупного до 0,1-0,12 %.

Фосфор практически не влияет на процесс графитизации. Однако фосфор в чугунах – полезная примесь, так как он улучшает жидкотекучесть. Это объясняется образованием относительно легкоплавкой тройной эвтектики (температура плавления - 950⁰С). В момент затвердевания эвтектика состоит из аустенита, обогащенного фосфором, цементита и фосфида железа (Fe₃P).

Кроме постоянных примесей, в чугун часто вводят и другие элементы. Наиболее часто чугун легируют хромом, никелем, титаном, алюминием и медью. Такие чугуны называются легированными. Примеси могут содержаться в рудах, из которых в доменных печах выплавляется чугун, эти чугуны называются природнолегируемыми.

Цель любого процесса термической обработки состоит в том, чтобы нагревом до определенной температуры и последующим охлаждением вызвать желаемое изменение строения металла, в результате которого изменятся и свойства. Проведение термической обработки (ТО) можно свести к трем этапам: нагрев, выдержки и охлаждения; определяющими являются температура нагрева и скорость охлаждения.

Основные виды ТО – отжиг, закалка, отпуск и старение. Каждый из указанных видов имеет несколько разновидностей.

Отжиг – термическая обработка, в результате которой металлы и сплавы приобретают структуру, близкую к равновесной; при этом происходит разупрочнение, сопровождающееся повышением пластичности и снятием остаточных напряжений.

Закалка - термическая обработка, в результате которой в сплавах образуется неравновесная структура: осуществляют нагрев выше критических температур, выдержку при этих температурах с последующим быстрым охлаждением.

Отпуск и старение – термические обработки, результате которых в предварительно закаленных металлах происходят превращения, приближающие их структуру к равновесной.

Фазовые превращения в сплавах железа. Основные фазовые превращения, влияющие на структуру и свойства сталей:

- 1) превращения при нагреве до аустенитного состояния – фазовая перекристаллизация;
- 2) превращения аустенита при различных условиях охлаждения;
- 3) мартенситное превращение;
- 4) превращения при отпуске.

Аустенитное превращение (превращение перлита в аустенит) состоит из двух параллельно идущих процессов: полиморфного $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения и растворения в Fe_γ углерода цементита. Первые зерна аустенита образуются на границе зерен между ферритом и цементитом – структурными составляющими перлита. Переход через критическую точку A_1 сопровождается резким уменьшением зерна, но дальнейший нагрев (или выдержка) вызывает рост аустенитных зерен.

В технологических процессах ТО **распад аустенита** (перлитное превращение) происходит в условиях непрерывного охлаждения и иногда изотермически (при постоянной температуре). Процессы распада переохлажденного аустенита подразделяются на два типа: перлитное и промежуточное, или бейнитное (диффузионные); мартенситное (бездиффузионное). На $C - t$ – образной диаграмме нанесены две кривые, указывающие время начала и конца превращения переохлажденного аустенита. В области диаграммы, расположенной левее линии начала превращения, существует переохлажденный аустенит; между линиями начала и конца превращения находится область, в которой непосредственно и происходит превращение; правее линии конца превращения – область, в которой существуют продукты превращения аустенита. Устойчивость аустенита зависит от степени переохлаждения.

Преобразование аустенита при температурах в интервале $A_{r1} - 550^{\circ}\text{C}$ называется перлитным, а превращение при температурах в интервале $550^{\circ}\text{C} - M_n$ - промежуточным. В интервале температур перлитного превращения в результате распада аустенита образуются пластинчатые структуры перлитного типа. В зависимости от дисперсности продукты распада имеют следующие названия:

- 1) грубопластинчатые структуры с размером пластинок $\Delta_0 \approx (0,5 \dots 0,7) \cdot 10^{-3}$ мм называются *перлитом* (превращение при $670^{\circ}\text{C} - 650^{\circ}\text{C}$),
- 2) при $\Delta_0 \approx 0,25 \cdot 10^{-3}$ мм – *сорбит* (превращение при $640^{\circ}\text{C} - 590^{\circ}\text{C}$),
- 3) при $\Delta_0 \approx 0,1 \cdot 10^{-3}$ мм – *троостит* (превращение при $580^{\circ}\text{C} - 550^{\circ}\text{C}$).

Указанное деление условно: перлит, сорбит и троостит имеет одну и ту же природу – ферритно-цементитная смесь.

В интервале температур промежуточного превращения ($550^{\circ}\text{C} - M_n$) аустенит распадается с образованием структур, называемых *бейнитом*. Сущность превращения заключается в следующем. При температурах ниже 550°C скорость превращения аустенита замедляется: при этом самодиффузия атомов железа практически не происходит, но атомы углерода еще достаточно подвижны. Происходит диффузионное распределение атомов углерода и участки аустенита, обогащенные углеродом, превращаются в цементит, но превращение обедненного углеродом аустенита происходит по сдвиговому механизму путем возникновения и роста зародышей феррита. Образующиеся при этом структуры имеют игольчатую форму. Дисперсность кристаллов феррита и цементита зависит от температуры превращения: толщина пластинок $\Delta_0 \approx 0,12 \cdot 10^{-3}$ мм образуется при $550^{\circ}\text{C} - 350^{\circ}\text{C}$ (*верхний бейнит*, он имеет перистое строение – вид резаной соломы); $\Delta_0 \approx 0,08 \cdot 10^{-3}$ мм – при более низких температурах (*нижний бейнит*, он имеет игольчатое – пластинчатое строение).

Мартенситное превращение начинается при переохлаждении аустенита ниже линии M_n ; малейшая изотермическая задержка в интервале температур от M_n до M_k приведет к стабилизации аустенита, а это значит, что превращение до конца не доходит, и в структуре кроме мартенсита образуется большое количество остаточного аустенита.

Мартенсит – неравновесная фаза - многократно пересыщенный твердый раствор углерода в α - железе, образующийся при резком переохлаждении аустенита (охлаждение со скоростями выше критических). Возникают сильнейшие искажения кристаллической решетки, дислокации блокируются почти полностью, атомы углерода «заклинены» внутри пере-

сыщенного раствора, что превращает кристаллическую решетку из кубической в вытянутую тетрагональную, образуется игольчатая структура - мартенсит. На температуры M_H и M_K помимо содержания углерода существенно влияют растворенные в углероде легирующие элементы (большинство из них понижают температуры M_H и M_K). Свойства мартенсита зависят от количества растворенного в нем углерода: с повышением содержания углерода до 0,6% твердость мартенсита растет, а затем остается постоянной, т.е. мартенсит имеет высокую твердость, равную или превышающую 60HRC.

Превращения при отпуске состоят в том, что мартенсит закаленной стали, будучи неустойчивым, уже при невысоких нагревах, усиливающих колебания кристаллической решетки, начинает распадаться, в результате чего образуется механическая смесь феррита и цементита. Степень дисперсности данных структурных составляющих будет зависеть от температуры и длительности нагрева. По степени нагрева превращения принято делить на три стадии:

1) Превращения при $150 - 200^{\circ}\text{C}$ сопровождается лишь перераспределением углерода в мартенсите, мартенсит обедняется углеродом и понижается степень тетрагональности, но также образуются зародыши ϵ – карбидной фазы ($\text{Fe}_{2,4}\text{C}$); такая смесь неоднородного мартенсита с пластинками ϵ – карбида называется *мартенситом отпуска*.

2) Нагрев до $200 - 300^{\circ}\text{C}$ приводит к растворению ϵ – карбида и появлению быстро растущих частичек Fe_3C , что сопровождается снятием внутренних напряжений, возникающих в результате предыдущих превращений, сопровождающихся объемными изменениями. Образовавшаяся при этом структура называется *трооститом отпуска*.

3) Дальнейшее повышение температуры (выше 400°C) сопровождается коагуляцией частиц феррита и цементита и их быстрым ростом; данная структура называется *сорбитом отпуска*.

Основным отличием структур типа троостита и сорбита является сфероидальная форма частиц цементита в структурах отпущенной стали, в то время как у структур после распада аустенита форма частиц пластинчатая.

ЛЕКЦИЯ 5

Сплавы на основе железа (продолжение).

План лекции 5

Тема 4.4. Практика термообработки стали. Технология нагрева. Отжиг стали и его влияние на структуру и свойства. Закалка углеродистых сталей. Отпуск сталей.

Тема 4.5. Химико-термическая обработка стали: основные закономерности, цементация, азотирование.

Отжиг и нормализация стали. Традиционно сложившееся понятие «отжига» охватывает несколько отличающихся друг от друга по режиму операций термической обработки, объединенных единой целью – привести сталь в термодинамически равновесное состояние.

Основные виды отжига:

1. Диффузионный отжиг (гомогенизация) применяется для устранения в легированных сталях дендритной ликвации и заключается в длительном нагреве (18-24 ч) до очень высоких температур (1100-1200⁰С).

2. Полный отжиг – это нагрев стали выше линии A_3 на 30-50⁰С с выдержкой и медленным охлаждением (вместе с печью). При нагреве происходит полная перестройка структуры в аустенит, а при охлаждении – его распад в феррито-цементитную смесь. Структура получается мелкозернистой, вязкой и мягкой. Внутренние напряжения снимаются полностью.

3. Неполный отжиг - это нагрев стали выше линии A_1 на 30-50⁰С с выдержкой и медленным охлаждением. При нагреве в аустенит переходит только перлит, а феррит остается. При охлаждении получается мелкозернистый перлит, а зерно феррита не меняется. Неполный отжиг более экономичен, чем полный отжиг, но возможен лишь при не слишком крупнозернистой исходной структуре. Внутренние напряжения снимаются полностью. Неполный отжиг заэвтектоидных сталей называется сфероидизацией, так как он ведет к образованию зернистого (сфероидного) перлита, отличающегося хорошей обрабатываемостью резанием.

4. Низкий (рекристаллизационный) отжиг – нагрев ниже A_1 , выдержка и медленное охлаждение. При этом фазовой перекристаллизации не происходит, назначение данного вида отжига – рекристаллизация наклепанного металла и снятие внутренних напряжений.

5. Изотермический отжиг на перлит состоит в нагреве стали выше линии A_3 , охлаждении до температуры на $30-100^{\circ}\text{C}$ ниже A_1 и выдержка при этой температуре до полного распада аустенита, после чего металл охлаждают с любой скоростью. Это сокращает длительность обработки по сравнению с полным отжигом и дает более стабильные результаты.

При отжиге могут возникнуть такие дефекты, как перегрев и пережог.

Перегрев – это интенсивный рост зерна, снижающий уровень ударной вязкости. Его устраняют повторным отжигом.

Пережог – это проникновение кислорода вглубь металла по границам зерен, приводящее к хрупкости. Пережог неустраним, и детали направляют на переплавку.

6. Нормализация – это нагрев стали выше A_3 или $A_{\text{ст}}$ ($A_{\text{цм}}$) выдержка и охлаждение на спокойном воздухе. Так как охлаждение идет быстрее, чем при отжиге, то частицы цементита оказываются дисперснее. Для низкоуглеродистых сталей разницы в свойствах после нормализации и отжига практически нет, а для среднеуглеродистых – нормализация дает большую твердость и заменить отжиг не может, зато позволяет изготовить ответственные детали без дополнительной термической обработки. По сравнению с отжигом нормализация значительно экономнее, так как при охлаждении металла печь не занята.

Закалка стали. При закалке сталь нагревают до аустенитного или аустенитно-карбидного состояния, выдерживают в течение времени, необходимого для завершения фазовых превращений, и охлаждают со скоростью выше критической для получения мартенситной структуры.

В зависимости от температуры нагрева различают полную и неполную закалку:

1) **полная закалка** – это нагрев выше линий A_3 и $A_{\text{ст}}$ на $30 - 50^{\circ}\text{C}$, выдержка и быстрое охлаждение;

2) **неполная закалка** – это нагрев выше линии A_1 на $30 - 50^{\circ}\text{C}$, выдержка и быстрое охлаждение.

Полная закалка применяется только для доэвтектоидных сталей. Микроструктура после полной закалки этих сталей будет состоять из мелкоигльчатого мартенсита и небольшого количества остаточного аустенита. Тогда как неполная закалка доэвтектоидных сталей приведет не только к образованию мелкоигльчатого мартенсита, но и сохранению ферритной составляющей, что недопустимо (в виду снижения твердости) и является

браком, так как сталь, имеющая такую структуру, будет мягкой и недостаточно прочной.

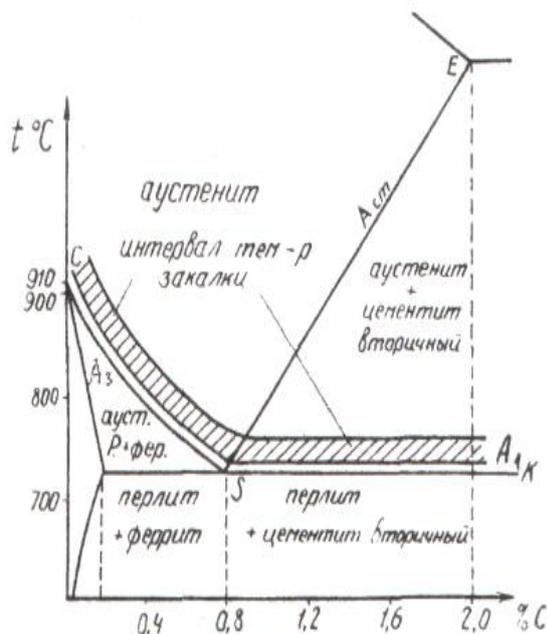


Рис. 24. Участки диаграммы Fe-Fe₃C
(нанесены температуры закалки)

Микроструктура заэвтектоидных сталей после полной закалки состоит из крупноигльчатого мартенсита и повышенного количества остаточного аустенита. Это объясняется тем, что нагрев этих сталей до температур, на 30 - 50 °С превышающих линию A_{СТ}, приводит к сильному росту зерна аустенита и увеличению содержания углерода в аустените (за счет растворенного цементита). Большое зерно аустенита приводит к получению крупноигльчатого мартенсита, а повышенное содержание углерода в аустените - к получению большого процента остаточного аустенита вследствие снижения температуры точек M_H и M_K. Наличие большого количества остаточного аустенита ведет к снижению твердости, крупное зерно - к снижению ударной вязкости, а отсутствие включений цементита - к снижению износостойкости.

При неполной закалке заэвтектоидную сталь нагревают до температур между линиями A_{СТ} и A₁, т.е. до двухфазного состояния аустенит плюс цементит. При последующем охлаждении аустенит превратится в мартенсит. Цементит должен быть в виде мелких равномерно распределенных по объему зернышек. Это можно обеспечить предварительной

термической обработкой - отжигом на зернистый перлит. Если же перед закалкой микроструктура стали состояла из пластинчатого перлита и замкнутой сетки цементита, то после неполной закалки сетка цементита сохраняется. Сталь, имеющая в своей структуре мартенсит, остаточный аустенит и замкнутую сетку цементита, будет хрупкой. Таким образом, *для заэвтектоидных сталей следует рекомендовать неполную закалку* как обеспечивающую более высокие эксплуатационные свойства и экономически более выгодную.

Отпуск стали. Закалка стали сопровождается увеличением объема, что вызывает появление значительных внутренних напряжений, которые могут вызывать коробление изделий и появление трещин. Поэтому закаленные изделия всегда подвергают отпуску. При отпуске сталь нагревают ниже линии A_1 выдерживают при этой температуре и охлаждают (обычно на воздухе или в масле). В зависимости от температуры различают низкий, средний и высокий отпуск.

Низкий отпуск (120 - 250 °С) применяют для инструментов, цементованных, цианированных изделий, которым необходимы высокая твердость (60 - 65 HRC) и износостойкость.

Средний отпуск (350 - 450 °С) на отпущенный троостит применяют для стальных пружин, рессор и упругих элементов приборов, которые в работе должны сочетать свойства высокой упругости, прочности и достаточной вязкости. Твердость троостита отпуска составляет 40 – 45 HRC.

Высокий отпуск (500 - 600 °С) на сорбит отпуска широко применяется к изделиям из машиностроительных сталей, содержащих от 0,35 до 0,5% углерода. Твердость данной структуры – 30 – 40 HRC.

Двойная операция (закалка с высоким отпуском) называется улучшением, так как после такой термической обработки сталь приобретает наиболее благоприятное сочетание механических свойств: высокую вязкость и пластичность.

Химико-термическая обработка (ХТО) – это обработка, заключающаяся в сочетании термического и химического воздействий на металлы и сплавы для изменения в поверхностном слое химического состава, структуры и свойств. ХТО сводится к диффузионному насыщению поверхностного слоя стали неметаллами (углеродом, азотом, бором, кремнием и др.) или металлами (алюминием, хромом и др.) в процессе выдержки в активной жид-

кой или газовой среде при определенной температуре.

При химико-термической обработке одновременно протекают несколько процессов:

– диссоциация исходных веществ с образованием диффундирующего элемента в атомарном состоянии; насыщающая среда должна обеспечивать высокую концентрацию данного элемента на поверхности обрабатываемого металла;

– адсорбция атомов на поверхность металла с образованием химических связей между ионами насыщающего элемента и основного металла;

– диффузия адсорбированных атомов от поверхности вглубь обрабатываемого металла.

В результате такой обработки образуется *диффузионный слой*, отличающийся от исходного слоя по химическому составу, структуре и свойствам. Концентрация диффундирующего элемента уменьшается от поверхности вглубь металла.

Толщина диффузионного слоя до пограничной диффузионной линии, характеризующей предельно допустимые значения свойств (например, определенной твердости) называют эффективной толщиной. Продолжительность ХТО определяется требуемой глубиной диффузионного слоя.

Процесс диффузии характеризуется коэффициентом диффузии D :

$$D = D_0 \cdot e^{-\frac{Q}{RT}},$$

где D_0 – коэффициент, зависящий от вида кристаллической решетки; Q – энергия активации; R – газовая постоянная, $R = 8,3$ Дж/(моль·К); T – абсолютная температура.

Химико-термическую обработку широко применяют для упрочнения деталей машин. ХТО повышает твердость, износостойкость, коррозионную стойкость и создает на поверхности благоприятные остаточные напряжения сжатия, увеличивает надежность и долговечность деталей машин.

Цементация – это вид химико-термической обработки, заключающийся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали углеродом при нагреве в соответствующей среде – карбюризаторе. Как правило, цементацию проводят при температурах выше точки A_{c3} (930-950⁰С). Окончательные свойства цементованные изделия приобретают в результате последующей термической обработки.

Назначение цементации и последующей ТО – придать поверхностному слою изделия высокую твердость и износостойкость, повысить предел контактной выносливости.

Для цементации в основном используют низкоуглеродистые (0,1-0,18 % C), чаще легированные стали. При цементации крупногабаритных изделий применяют стали с более высоким содержанием углерода (0,2-0,3 % C). Выбор стали определяется тем, что при цементации сердцевина изделия, не насыщающаяся углеродом, должна сохранять высокую вязкость после закалки.

Концентрация углерода в поверхностном слое должна составлять 0,8 - 1,0 %. Для повышения сопротивления высокой контактной усталости содержание углерода может быть повышено до 1,1- 1,2 %. В случае цементации сталей, легированных карбидообразующими элементами, при температуре диффузии возможно образование двухфазного слоя из аустенита и карбидов глобулярной формы.

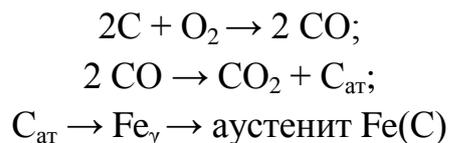
Цементованный слой имеет переменную концентрацию углерода по толщине, убывающую от поверхности к сердцевине детали.

Наибольшее распространение на производстве имеют цементация в твердом карбюризаторе и газовая цементация.

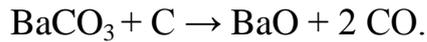
Цементация в твердом карбюризаторе. Основная составляющая всех твердых карбюризаторов – уголь различного происхождения: древесный, каменный, костный. Древесный уголь менее активный, но содержит минимальное количество вредных примесей. Каменные угли (кокс) менее пригодны для цементации, так как содержат серу и при нагреве выделяют большое количество летучих продуктов. Поэтому их практически не используют.

Детали, подлежащие цементации, упаковывают в цементационные ящики. В производстве применяют смесь из свежего и отработанного карбюризатора.

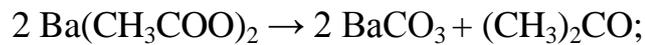
Цементация стали осуществляется атомарным углеродом. При этом протекают следующие реакции:



Помимо угля в состав карбюризатора входит углекислый барий (BaCO_3) и углекислый натрий (Na_2CO_3) в количестве 10-40 % массы угля. Это ускорители процесса:

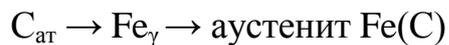


В качестве активизатора еще применяются ацетат натрия (CH_3COONa) или ацетат бария ($\text{Ba}(\text{CH}_3\text{COO})_2$):



Газовая цементация осуществляется при нагреве изделия в среде газов в печах с герметичной камерой. Наиболее качественный цементованный слой получается при использовании в качестве карбюризатора природного газа, состоящего почти полностью из метана (CH_4) и пропанбутановых смесей, подвергнутых специальной обработке.

Основной реакцией, обеспечивающей науглероживание при газовой цементации, является:



При высоком содержании в атмосфере метана возможна реакция:



По сравнению с цементацией в твердом карбюризаторе газовая цементация имеет следующие преимущества:

- сокращение процесса нагрева до температуры цементации и времени самой цементации (отсутствие малотеплопроводного твердого карбюризатора);
- возможность регулирования количества и состава подаваемого в печь карбюризатора;
- высвобождение производственных площадей (отсутствие смесеприготовительного оборудования);
- возможность автоматизации процесса цементации;
- значительно упрощается последующая термическая обработка деталей (закалку можно проводить непосредственно из цементационной печи);
- чистота процесса и улучшение условий труда из-за отсутствия угольной пыли.

Термическая обработка цементованных стальных деталей. Задача цементации – получить высокую поверхностную твердость и износостойкость при вязкой сердцевине – не решается одной цементацией. Цементацией достигается лишь выгодное распределение углерода по сечению. Окончательно формирует свойства цементованной детали последующая закалка,

при которой на поверхности получается высокоуглеродистый мартенсит, а в сердцевине сохраняется низкая твердость и высокая вязкость.

Для деталей, от которых требуется только поверхностная твердость, применяют закалку с цементационного нагрева, т.е. с 900-950⁰С. Недостатком такой обработки является получение крупноиглочатого мартенсита на поверхности и крупнозернистой структуры сердцевины. Это связано с тем, что за время проведения цементации вырастает зерно аустенита. Также вследствие заковки с высокой температуры в цементационном слое наблюдается повышенное содержание остаточного аустенита.

Недостатки эти в значительной степени можно устранить, если использовать:

- наследственно мелкозернистую сталь;
- газовую цементацию (благодаря меньшей продолжительности процесса, наблюдается меньший рост зерна);
- подстуживание при закалке до 750-800⁰С; хотя это не ведет к измельчению зерна, но снижает внутренние напряжения;
- обработку холодом, что приводит к превращению остаточного аустенита и к повышению поверхностной твердости.

При повышенных требованиях к структуре и свойствам детали после цементации охлаждают на воздух, затем их закалывают с температуры 850-900⁰С в зависимости от марки стали. При этом в сердцевине произойдет полная перекристаллизация и измельчение зерна, на поверхности тоже произойдет перекристаллизация. Вследствие нагрева выше линии A_{c3} цементитная сетка растворится, хотя для высокоуглеродистой поверхности такой нагрев сопровождается некоторым перегревом.

При особо высоких требованиях к механическим свойствам применяют двойную закалку с последующим низким отпуском. Первая закалка (850-900⁰С) измельчит структуру сердцевины и устранит цементитную сетку на поверхности. Для формирования окончательной твердости проводят вторую закалку (750-800⁰С). Мелкоиглочатый мартенсит с вкрапленным избыточным цементитом обеспечивает высокую износоустойчивость.

Цементованные детали обязательно после заковки для снятия внутренних напряжений подвергают отпуску при низкой температуре (150 - 200⁰С). В результате такой обработки (заковка с последующим низким отпуском) поверхность должна иметь твердость 58-62HRC, сердцевина – для легированных сталей 25-35 HRC.

Азотирование – это вид химико-термической обработки, заключающийся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали азотом.

Азотирование сильно повышает твердость поверхностного слоя и его износостойкость, предел выносливости и сопротивление коррозии в таких средах, как атмосфера, вода, пар и др. В сравнении с цементованным слоем, твердость азотированного слоя значительно выше, его теплостойкость (сохранение твердости при высоких температурах) составляет 450-500⁰С (цементованного – 200-225⁰С).

Для получения стальных изделий с высокой твердостью и износостойкостью поверхности широко применяют сталь 38Х2МЮА. Одновременное присутствие хрома, молибдена и алюминия позволяет получить твердость азотированного слоя на поверхности 1200 НV. Молибден устраняет отпускную хрупкость, которая может возникнуть при медленном охлаждении от температуры азотирования.

Азотирование ведут в диссоциированном аммиаке NH₃. На обрабатываемой поверхности происходит диссоциация аммиака с образованием ионов азота, которые адсорбируются поверхностью и диффундируют в глубь металла:



Микроструктура азотированного слоя различна при насыщении азотом железа и при азотировании 38Х2МЮА. Так как в структуре слоя присутствует большое количество высокотвердых дисперсных нитридов, после насыщения упрочняющая термическая обработка не требуется.

Технология процесса азотирования. Технологический процесс предусматривает проведение следующих операций:

1. Предварительная термическая обработка, состоящая из закалки и высокого отпуска (600-675⁰С) стали, для получения повышенной прочности и вязкости в сердцевине изделия. Структура стали после этого – сорбит.
2. Механическая обработка деталей, включая шлифование, которое придает окончательные размеры детали
3. Защита участков, не подлежащих азотированию, нанесением тонкого слоя (0,01-0,015 мм) олова электролитическим методом или жидкого стекла.
4. Азотирование (500-520⁰С). Для ускорения процесса азотирования применяют двухступенчатый процесс: сначала при температуре 500-520⁰С, затем при 540-560⁰С. Рекомендованный слой 0,3-0,6 мм.
5. Окончательное шлифование (доводка) изделия.

Ионное азотирование. Широко применяется азотирование в тлеющем разряде (ионное азотирование), которое проводят в разреженной азотсодержащей атмосфере (NH_3 или N_2) при подключении обрабатываемых деталей к катоду. Анодом является контейнер установки. Между катодом (деталью) и анодом возбуждается тлеющий разряд. Ионы газа, бомбардируя поверхность катода, нагревают деталь до температуры насыщения. Азотирование ведут при температуре $470\text{-}580^\circ\text{C}$ в течение 1-24 ч.

Азотирование в жидких средах (тенифер-процесс) проводят при температуре 570°C в течение 0,5-3,0 ч в расплавленных цианистых солях (85% соли, содержащие 40 % KCNO и 60 % NaCN , и 15 % NO_2CO_3 или 55 % карбамида $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ и 45 % Na_2CO_3), через которые пропускают сухой воздух. Вследствие низкой температуры в сталь диффундирует в основном азот, образующийся при разложении солей.

ЛЕКЦИЯ 6

Сплавы на основе железа (продолжение).

План лекции 6

Тема 4.5. Химико-термическая обработка стали (продолжение): цианирование, нитроцементация, силицирование, борирование. Диффузионная металлизация: хромирование и алитирование.

Тема 4.6. Основы легирования стали. Влияние легирующих элементов на структуру и свойства стали. Классификация легированных сталей.

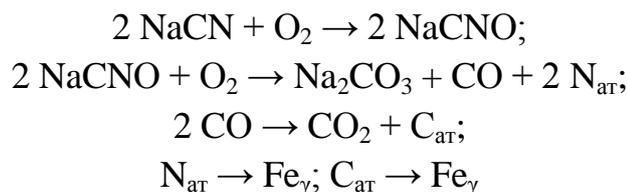
Цианирование – это вид химико-термической обработки, заключающийся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом при температурах $820\text{-}950^\circ\text{C}$ в расплавленных солях, содержащих группу NaCN .

Установлено, что при одновременной диффузии углерода и азота ускоряется диффузия углерода.

Среднетемпературное цианирование проводят для получения слоя небольшой толщины (0,15-0,35 мм). В этом процессе изделие нагревают до $820\text{-}860^\circ\text{C}$ в расплавленных солях, содержащих группу NaCN .

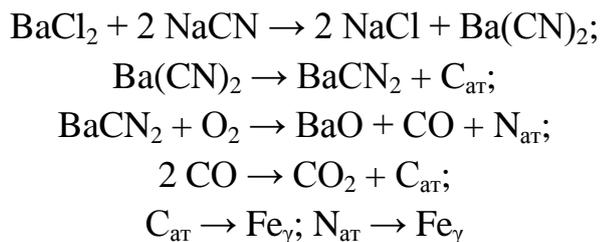
Процесс ведут в ваннах, содержащих 20-25 % NaCN , 25-50 % NaCl и

25-50 % Na_2CO_3 , с продувкой кислородом воздуха в течение 30-90 мин. При этом протекают следующие реакции:



Выделяющийся атомарный азот и углерод диффундирует в сталь. Цианированный слой содержит 0,8-1,2 % N и 0,7% C. Твердость после термической обработки (закалки с последующим низким отпуском 180-200⁰C) составляет 58...62 HRC. Цианированный слой по сравнению с цементованным обладает более высокой износостойкостью и эффективно повышает предел выносливости.

Высокотемпературное цианирование проводят для получения слоя большой толщины (0,5-2,0 мм). В этом процессе изделие нагревают до 930-950⁰C в ванне, содержащей 8 % NaCN, 82 % BaCl₂ и 10 % NaCl в течение 1,5-6 ч. При этом протекают следующие реакции:



Выделяющийся атомарный углерод и азот диффундирует в сталь. Цианированный слой содержит 0,8-1,2 % C и 0,2-0,3 % N. После высокотемпературного цианирования стальные изделия охлаждают на воздухе, а затем для измельчения зерна их закаливают на воздухе с нагревом в соляной ванне или печи и подвергают низкому отпуску. Твердость после термообработки составляет 58...60 HRC.

Цианирование по сравнению с цементацией требует меньшего времени для получения слоя заданной толщины, характеризуется значительно меньшими деформациями и короблением деталей сложной формы и более высоким сопротивлением износу и коррозии.

Нитроцементация – это вид химико-термической обработки, заключающийся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом при температурах 840-860⁰C в газовой среде, состоящей из науглероживающего газа и аммиака, в течение 4-10 ч.

Скорость роста нитроцементованного и цементованного слоев на глубину 0,5 мм практически одинакова, но температура нитроцементации ниже температуры цементации почти на 100°C . Для устранения вредных последствий внутреннего окисления азота в слое должно быть около 0,1-0,15 %. Рекомендуемая толщина нитроцементованного слоя составляет 0,2 - 0,8 мм, но она не должна превышать 1,0 мм. При большей толщине в нем образуется темная составляющая, которая обнаруживается на поверхности в виде темной точечной сетки, и другие дефекты, снижающие механические свойства стали (особенно предел выносливости). Темная составляющая, вероятно, представляет собой поры, образующиеся в результате выделения из твердого раствора молекулярного азота под давлением.

Оптимальное содержание углерода в нитроцементованном слое в сумме $\text{C} + \text{N}$ зависит от марки стали и колеблется в широких пределах (1,0-1,65 %). При низкой концентрации углерода в структуре нитроцементованного слоя по границам зерен мартенсита появляется троостит. При высоком содержании в стали, содержащей Cr , Mn , Ti , V , образуются карбонитриды, располагающиеся преимущественно по границам зерен в виде сплошной или разорванной сетки. Переход углерода и легирующих элементов в карбонитриды понижает устойчивость аустенита, что ведет к образованию в слое троостита. Образование сетки карбонитридов и троостита снижает предел выносливости, пластичность и вязкость стали.

Рекомендуется использовать контролируемую эндотермическую атмосферу, к которой добавляют 1,5-5,5 % необработанного природного газа и 1-3,5 % NH_3 .

После нитроцементации проводят закалку непосредственно из печи, реже после повторного нагрева применяют ступенчатую закалку, затем следует провести низкий отпуск ($160-180^{\circ}\text{C}$). Твердость слоя после термообработки 58...60HRC.

При оптимальных условиях насыщения структура нитроцементованного слоя должна состоять из мелкокристаллического мартенсита, небольшого количества мелких равномерно распределенных карбонитридов и 30-50 % остаточного аустенита. Высокое содержание остаточного аустенита обеспечивает хорошую прирабатываемость, что обеспечивает бесшумную работу зубчатых передач.

Нитроцементации обычно подвергают детали сложной конфигурации, склонные к короблению. Данный вид ХТО имеет следующие преимущества по сравнению с газовой цементацией: процесс происходит при более низкой

температуре, меньше толщина слоя, меньшие деформации и коробления, повышается сопротивление износу и коррозии.

Борирование – это вид химико-термической обработки, заключающийся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали бором при нагреве в соответствующей среде.

Борирование чаще выполняют при электролизе буры ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) при температуре $930\text{-}950^\circ\text{C}$ в течение 2-6 часов. Изделие является катодом.

Процесс можно вести и без электролиза в ваннах с расплавленными хлористыми солями (NaCl , BaCl_2), в которые добавляют 20 % ферробора и 10 % карбида бора (B_4C).

Хорошие результаты получаются при газовом борировании при температуре $850\text{-}900^\circ\text{C}$ в среде диборана (B_2H_6) или треххлористом боре (BCl_3) в смеси с водородом.

Диффузионный слой состоит из боридов FeB (на поверхности) и Fe_2B . Рекомендуемая толщина слоя 0,1 - 0,2 мм. Борированный слой обладает высокой твердостью (1800-2000 HV), износостойкостью (главным образом, абразивной), коррозионной стойкостью, окалиностойкостью (до 800°C) и теплостойкостью.

Средне- и тяжелонагруженные детали после борирования подвергают термической обработке: закалке и отпуску. Закалку желательно проводить с температуры борирования или с более низких температур с предварительным подстуживанием. При выполнении закалки, как самостоятельной операции, борированные детали нагревают под закалку в хорошо раскисленных соляных ваннах, так как нагрев под закалку в печах с воздушной средой недопустим.

Силицирование - это вид химико-термической обработки, заключающийся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали кремнием.

Силицированный слой является твердым раствором кремния в α – железе. Под диффузионным слоем часто наблюдается слой перлита, так как происходит отеснение углерода из диффузионного слоя вследствие пониженной растворимости его в кремнистом феррите.

Силицированный слой отличается повышенной пористостью. Рекомендуемая толщина слоя 0,3-1,0 мм. Силицированный слой имеет низкую твердость (200-300 HV), но после предварительной его пропитки маслом

при температуре 170-200⁰С износостойкость слоя становится высокой.

Диффузионное насыщение металлами – это процесс поверхностного насыщения стали алюминием, хромом, цинком и другими элементами.

Наиболее детально изучены процессы диффузионного насыщения хромом и алюминием. Процессы насыщения молибденом, бериллием и другими элементами менее исследованы.

Диффузионную металлизацию можно проводить в твердых, жидких и газообразных средах.

При диффузионной металлизации в твердой среде металлизатором является ферросплав (ферроалюминий, феррохром) с добавлением хлористого аммония (NH₄Cl). В результате реакции металлизатора с HCl или Cl₂ образуется летучее соединение хлора с металлом (AlCl₃, CrCl₂ и т.п.), которое в результате контакта с металлической поверхностью диссоциирует с образованием свободных атомов.

Газовую диффузионную металлизацию проводят в газовых средах, являющихся хлоридами различных металлов.

Жидкую металлизацию проводят погружением в расплавленный металл, если диффундирующий элемент имеет низкую температуру плавления (например, алюминий, цинк).

Диффузия алюминия, хрома и других металлов протекает значительно медленнее, чем углерода и азота, потому что углерод и азот образуют с железом растворы внедрения, а металлы – раствор замещения. Именно малая скорость диффузии препятствует широкому распространению диффузионной металлизации в промышленности. Процесс приходится проводить при высоких температурах (1000-1200⁰С) длительное время, а это существенно увеличивает себестоимость изделия.

Алитирование – насыщение поверхностного слоя стального изделия алюминием, обеспечивающее высокую окислительную стойкость (850-900⁰С), хорошее сопротивление коррозии в атмосфере и морской воде.

Алитированный слой является твердым раствором алюминия в α – железе, концентрация алюминия в поверхностном слое около 30%. Толщина слоя 0,2-1,0 мм, твердость (на поверхности) до 500HV, износостойкость низкая.

Хромирование - насыщение поверхностного слоя стального изделия хромом, обеспечивающее высокую коррозионную стойкость в морской воде

и азотной кислоте и окалиностойкость до 800⁰С.

Диффузионный слой, получаемый при хромировании стали с содержанием 0,3 % С, приобретает высокую твердость (1200-1300 НV) и износостойкость. Он состоит из твердого раствора хрома в α – железе и карбидов хрома.

Диффузионный слой, получаемый при хромировании технического железа, состоит из твердого раствора хрома в α – железе, его твердость составляет 250-300 НV.

Легированные стали. Углеродистые стали в ряде случаев не отвечают требованиям, предъявляемым к металлам и сплавам в современном производстве, так как не обладают достаточно высокими физико-химическими и механическими свойствами. Легирование значительно повышает твердость и прочность стали при сохранении достаточной вязкости, также придает сталям ряд особых свойств: жаропрочность, окалиностойкость, коррозионную стойкость и др. Для получения необходимых свойств в сталь вводят такие элементы, как Cr, Ni, Mo, Ti, W, V, Si, Mn, Al, Co, B и др., которые называют *легирующими* элементами. Данный процесс называется легированием, а получаемые стали – *легированными сталями*.

Легирующие элементы вводятся в сталь в определенных концентрациях с целью изменения её строения и свойств:

- Легирующие элементы, растворяясь в феррите, изменяют параметры решетки и повышают твердость, снижая пластичность. Однако никель, интенсивно упрочняя феррит, не снижает его вязкость и понижает порог хладноломкости.
- Все легирующие элементы при нагреве сдерживают рост зерна аустенита, т.е. способствуют образованию мелкозернистой структуры; кроме марганца и бора.
- Все легирующие элементы расширяют область существования α - железа, т.е. являются α – стабилизаторами. Исключение: марганец и никель – γ - стабилизаторы.
- Все легирующие элементы, растворяясь в аустените, замедляют диффузию углерода, что замедлит распад аустенита и повышают прокаливаемость стали. Исключение: кобальт.
- Легирующие элементы не влияют на кинематику мартенситного превращения, их влияние сказывается на температурном интервале мартен-

ситного превращения. Некоторые элементы повышают мартенситную точку и уменьшают количество остаточного аустенита (алюминий, кобальт), другие не влияют на нее (кремний), но большинство снижает мартенситную точку и увеличивает количество остаточного аустенита.

- Легирующие элементы замедляют процесс распада мартенсита. Никель и марганец влияют незначительно, тогда как большинство (хром, молибден, кремний и др.) – весьма заметно, что позволит поднять температуру отпуска и увеличит его продолжительность.

В зависимости от суммарного содержания легирующих элементов различают *низколегированные* стали, содержащие не более 2,5% легирующих элементов, *среднелегированные* стали – 2,5 - 10% и *высоколегированные* стали – более 10%.

Необходимый комплекс свойств в легированных сталях выявляется только после термической обработки, в результате которой можно получить наиболее оптимальную структуру, а, следовательно, и изменение свойств.

Применение легирующих элементов существенно влияет на стоимость стали. Чем выше степень легирования стали, тем больше её стоимость. Высокой стоимостью отличаются стали, содержащие большое количество Ni, Mo, W, Co.

Легированные стали, как правило, классифицируют по структуре в равновесном состоянии, по структуре после охлаждения на воздухе, по количеству легирующих элементов и по назначению.

Приведенная ниже классификация отражает назначение сталей:

Классификация легированных сталей:

I. Строительные стали – 15ХСНД, 17ГС, 18Г2АФ;

II. Конструкционные стали:

2.1. стали общего назначения:

- *цементуемые* – 15ХН, 12Х2Н4А, 18ХГТ;
- *улучшаемые* – 35ХГСА, 38ХМЮА, 40ХН, 45Х;
- *высокопрочные* – Н18К9М5Т, Н9Х12Д2ТБ, 30Х9Н8М4Г2С2;

2.2. специализированного назначения:

- *шарикоподшипниковые* – ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ;
- *рессорно-пружинные* – 50С2, 50ХГСФА, 60С2Н2А;
- *износостойкие* – 110Г13, Х12Ф1;

III. Инструментальные стали:

- режущие стали – Х, ХВГ;
- быстрорежущие – Р18, Р6М5;
- штамповые стали:
 - для штампов холодного деформирования – Х12Ф1, Х6ВФ;
 - для штампов горячего деформирования – 5ХНМ, 3Х2В8Ф;

IV. Стали и сплавы с особыми свойствами:

- нержавеющие стали – 12Х13, 12Х18Н10Т, 15Х25Т;
- жаропрочные стали – 12Х2МФБ, Х10С2М, Х25Н20С2;
- с особыми магнитными свойствами:
 - ферромагнитные – ЮНДК15, 80ХНС;
 - парамагнитные – 110Г13, 55Г9Н9;
- с особыми электротехническими свойствами – 79ХН, 1211, 3411;
- с особыми тепловыми и упругими свойствами – Н36, Н48, Н35ХМВ.

ЛЕКЦИЯ 7

Цветные металлы и сплавы

План лекции 7

Раздел 5. Цветные металлы и сплавы.

Тема 5.1. Медь, её свойства и область применения. Сплавы на основе меди. Медно-никелевые сплавы. Бронзы и их термическая обработка. Латунни и их термическая обработка. Применение медных сплавов.

Тема 5.2. Алюминий, его свойства и область применения. Сплавы на основе алюминия. Литейные и деформируемые алюминиевые сплавы. Дюралюмины и их термообработка. Применение алюминиевых сплавов.

Тема 5.3. Титан, его свойства и область применение. Сплавы на основе титана.

Медь – металл красного цвета. Температура плавления 1083°C . Медь имеет кристаллическую решетку ГЦК с периодом $a = 0,3608$ нм. Плотность меди $8,94$ г/см³. Удельное электрическое сопротивление меди $0,0175$ мкОм·м. Медь характеризуется высокими теплопроводностью и электропроводностью, коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, пресной и морской воде, едких щелочах, органических кислотах и других агрессивных средах.

Механические свойства меди относительно низки. Так, в литом состоянии $\sigma_{\text{в}} = 150...200$ МПа, $\delta \approx 15...25$ %. Поэтому в качестве конструкционного материала медь находит ограниченное применение. Повышение механических свойств достигается созданием различных сплавов на медной основе.

Медные сплавы подразделяются на

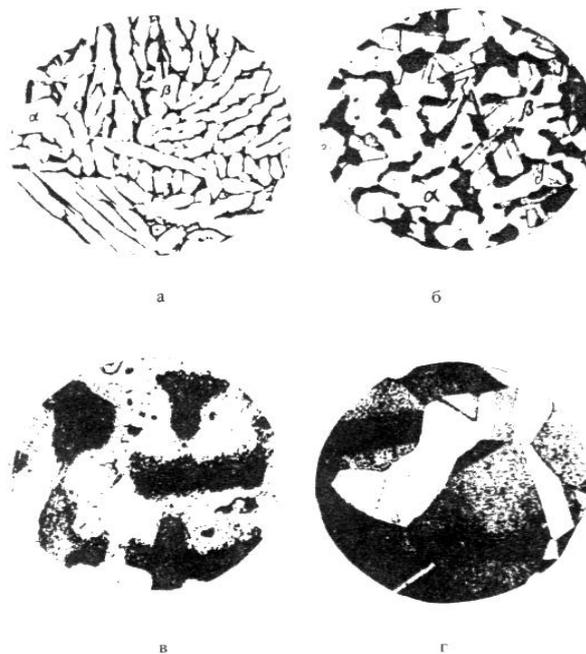
- латуни,
- бронзы,
- медно-никелевые сплавы.

Латуни - сплавы меди с цинком содержат не более 45 % цинка с небольшим количеством других компонентов. Латуням присущи все положительные свойства меди (высокая электро- и теплопроводность, коррозионная стойкость, пластичность) при более высокой прочности и лучших технологических свойствах.

В зависимости от числа компонентов различают простые (двойные) и специальные (многокомпонентные) латуни. Строение и свойства простых латуней зависят от содержания в них цинка.

Латуни, содержащие до 39 % цинка (Л90, Л80, Л68), имеют однофазную структуру (α -раствор), представляют собой твердый раствор цинка в меди. Они не упрочняются при термической обработке, так как при нагревании до температуры плавления их структура не изменяется, такие латуни пластичны, хорошо обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии.

Латуни, содержащие 40-45 % цинка (Л60, Л59, ЛЦ40Мц1,5), имеют двухфазную структуру ($\alpha + \beta$ – раствор), β - фаза представляет собой твердый раствор на основе химического соединения $CuZn$ (рис.25). Латуни, имеющие двухфазную структуру, обладают повышенной твердостью, хорошо обрабатываются давлением в горячем состоянии, но в холодном состоянии пластичность их невелика.



*Рис.25. Микроструктуры (x 100): а - литая латунь Л59 ($\alpha + \beta$);
б - латунь ($\alpha + \beta$) после деформирования; в - литая бронза Бр05;
г - бронза после деформирования и рекристаллизации*

Применяются сложные латуни, в которые для изменения механических и химических свойств дополнительно вводят свинец, олово, кремний, алюминий (свинец улучшает обрабатываемость резанием ЛС59-1), олово

повышает коррозионную стойкость (ЛО 60-1), кремний и алюминий повышают механические свойства (ЛК 80-3, ЛА77-2).

По технологическим признакам различают литые и деформируемые латуни (табл. 4).

Таблица 4

Химический состав и механические свойства
некоторых марок латуней

Марки латуни	Структура	Содержание, %		σ_B , МПа	δ , %
		Cu	легирующие элементы		
<i>Деформируемые латуни</i>					
Л90	α	88-91	–	260	45
Л80	α	79-81	–	320	52
Л62	$\alpha + \beta$	62-65	–	330	50
ЛС59-1	$\alpha + \beta$	57-60	0,8-1,9 Pb	400	45
ЛЖМц59-1-1	$\alpha + \beta$	57-60	0,6-1,2 Fe; 0,1-0,4 Al; 0,3-0,7 Sn; 0,5-0,8 Mn	450	50
ЛАЖ60-1-1	$\alpha + \beta$	58-61	0,75-1,5 Al; 0,75-1,5 Fe; 0,1-0,6 Mn	450	45
<i>Литейные латуни</i>					
ЛЦ16К4	$\alpha + \beta$	78-81	3,0-4,5 Si	300	15
ЛЦ40МцЗЖ	$\alpha + \beta$	53-58	3,0-4,0 Mn; 0,5-1,5 Fe	500	10
ЛЦ23А6Ж3Мц2	$\alpha + \beta$	64-68	4,0-7,0 Al; 2,0-4,0 Fe; 1,5-3,0 Mn	700	7

Бронзы - это сплавы меди с оловом, алюминием, кремнием, свинцом, бериллием (в настоящее время бронзами называют все сплавы меди, кроме латуней и медно-никелевых сплавов). По химическому составу бронзы делятся на оловянные и безоловянные (специальные), а по технологическим свойствам – на обрабатываемые давлением (деформируемые) и литейные.

Сплавы меди с оловом - *оловянные бронзы* (Бр010, БрО10Ф1) очень давно и широко применяются в промышленности благодаря высокой коррозионной стойкости и антифрикционным свойствам. Микроструктура литой оловянной бронзы (рис.25) состоит из неоднородного твердого α -раствора (твердого раствора олова в меди) и эвтектоида $\alpha + Cu_{31}Sn_8$. Темные участки неоднородного твердого α -раствора богаты медью, светлые - оловом, в эвтектоиде, на светлом фоне соединения $Cu_{31}Sn_8$ видны темные точечные включения α -фазы.

Химический состав и механические свойства некоторых марок оловянных бронз представлены в табл. 5.

Таблица 5

Химический состав и механические свойства
некоторых марок оловянных бронз

Марка сплава	Содержание, %				σ_b , МПа	δ , %
	Sn	Zn	Pb	P		
<i>Бронзы, обрабатываемые давлением</i>						
БрОФ4-0,25	3,5-4,0	–	–	0,2-0,3	340	52
БрОФ6,5-0,15	6-7	–	–	0,1-0,25	400	65
БрОЦ4-3	3,5-4,0	2,7-3,3	–	–	350	40
<i>Литейные бронзы</i>						
БрО10Ф1	9-11	–	–	0,4-1,1	250	7
БрО5Ц5С5	4-6	4-6	4-6	–	180	4
БрО6Ц6С2	5-7	5-7	1-3	–	–	–

В последнее время широко применяются безоловянные бронзы (табл.6).

Таблица 6

Механические свойства и назначение безоловянных бронз

Марка бронзы	Содержание, %	Механические свойства		Назначение
		σ_b , МПа	δ , %	
<i>Алюминиевые бронзы</i>				
БрАЖ9-4	9 Al, 4 Fe	600	40	Для изготовления проката, штампованных шестерен, втулок, труб
БрАЖН10-4-4	10 Al, 4 Fe, 4 Ni	650	35	Арматура, обоймы подшипников
БрА10Ж3Мц2	10 Al, 3 Fe, 2 Mn	390	10	
<i>Кремнистая бронза</i>				
БрКМц3-1	3Si, 2 Mn	380	35	Прутки, лента, проволока для пружин
<i>Свинцовая бронза</i>				
БрС30	30Pb	600	4	Антифрикционные детали
<i>Бериллиевая бронза</i>				
БрБ2	2Be	1200	4	Полосы, лента, прутки, проволока, пружины, мембраны, контакты

Алюминиевые бронзы содержат до 11% алюминия (БрАЖ9-4, БрА10Ж3Мц2), для повышения механических свойств в них добавляют железо и никель.

В отожженном состоянии бронзы очень пластичны. Для повышения твердости проводят термическую обработку, которая состоит из закалки с 900°C в воду и отпуска 650°C. После закалки они имеют игольчатую струк-

туру, состоящую из зерен α и β твердых растворов. Алюминиевые бронзы имеют хорошие механические и высокие антифрикционные свойства.

Кремнистые бронзы содержат до 3,0 % Si (Бр КМц3-1). Они превосходят алюминиевые бронзы и латуни в прочности и стойкости в щелочных средах. Кремнистые бронзы легко обрабатываются давлением, резанием и свариваются.

Бериллиевые бронзы содержат 1,8...2,5 % Be (Бр Б2), применяются в промышленности после упрочнения (закалки и отпуск).

Свинцовистые бронзы содержат 27...33 % Pb (Бр С30). Свинец практически не растворяется в жидкой меди. Структура обеспечивает ее высокие антифрикционные свойства.

Медно-никелевые сплавы выделяются в отдельную группу. Данные сплавы могут использоваться в качестве конструкционных (МН19, МНЦ15-20) и электротехнических (МНМц40-1,5) материалов.

Алюминий – металл серебристо-белого цвета. Температура плавления 600°C . Алюминий имеет кристаллическую решетку ГЦК с периодом $a = 0,4041$ нм. Наиболее важной особенностью алюминия является низкая плотность – $2,7$ г/см³. Алюминий обладает хорошими теплопроводностью и электрической проводимостью, высокой коррозионной стойкостью вследствие образования на его поверхности тонкой прочной пленки Al_2O_3 . Чем чище алюминий, тем выше его коррозионная стойкость.

Алюминиевые сплавы классифицируются по технологии изготовления (деформируемые, литейные и спеченные (порошковые)), по способности к термической обработке (упрочняемые и неупрочняемые термической обработкой), по свойствам (сплавы повышенной пластичности, низкой прочности, нормальной прочности, высокопрочные, жаропрочные и др.).

Типичными представителями деформируемых сплавов на алюминиевой основе являются дуралюминий (Д1, Д16) и литейных - силумин АЛ2. Химический состав и свойства наиболее применяемых алюминиевых сплавов приведены в табл. 7.

Силумины – литейные сплавы на основе алюминия с кремнием (4...13 %, иногда до 23 % Si) и некоторыми другими элементами (медь, марганец, магний, цинк, титан, бериллий). Сплавы, содержащие до 11,3 % Si, являются доэвтектическими и имеют структуру из первичных кристаллов α – раствора (кремния в алюминии) и эвтектики ($\alpha + \text{Si}$). При более вы-

сокой концентрации кремния (заэвтектические сплавы) в структуре сплавов кроме эвтектики присутствуют первичные кристаллы кремния в виде пластинок.

Таблица 7.
Химический состав и свойства алюминиевых сплавов

Марка сплава	Содержание элементов, %				Режим термо-обработки	Механические свойства		
	Cu	Mg	Mn	Прочие		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Литейные сплавы</i>								
АК12 (АЛ2)	—	—	—	10-13 Si	Литье в землю	180	80	6
					Литье в кокиль	220	90	5
АК9 (АЛ4)	—	0,17-0,3	0,2-0,5	8-10 Si	Литье в землю (закалка-старение)	260	200	4
АМ5 (АЛ19)	4,5-5,3	—	0,6-1,0	0,15-0,35 Ti	Литье в землю (закалка-старение)	360	250	3
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Деформируемые сплавы, не упрочняемые термической обработкой</i>								
АМц	0,1	0,2	1,0-1,6		Отжиг	130	50	20
АМг2	0,1	1,8-2,6	0,2-0,6		Отжиг	190	100	23
АМг5	0,1	5,8-6,8	0,5-0,8		Отжиг	340	170	20
<i>Деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой</i>								
Д1	3,8-4,8	0,4-0,8	0,4-0,8		Закалка + старение	400	240	20
Д16	3,8-4,9	1,2-1,8	0,3-0,9		Закалка + старение	440	330	18
В95	1,4-2,0	1,8-2,8	0,2-0,6	0,01-0,25 Cr 5-7 Zn	Закалка + старение	540	470	10
В96	2,0-2,6	2,3-3,0	0,3-0,8	8-9 Zn	Закалка + старение	750	720	7
АК6	1,8-2,6	0,4-0,8	0,4-0,8	0,7-1,2 Si	Закалка + старение	400	300	12

Силумины обычно модифицируют натрием, который в виде хлористых и фтористых солей вводят в жидкий сплав в виде 2-3 % от массы сплава. Натрий сдвигает эвтектическую точку в системе Al - Si в сторону больших содержаний кремния.

Обычный силумин содержит 12-13 % Si и по структуре является заэвтектическим, но если перед самой отливкой внести в сплав незначительное

количество хлористых и фтористых солей натрия, то структура резко изменится. Сплав становится доэвтектическим. При модифицировании температура выделения кремния и кристаллизации эвтектики понижается. Так как кристаллизация происходит при более низких температурах, следовательно, продукты кристаллизации становятся более мелкозернистыми. Измельчение структуры и отсутствие первичных выделений хрупкого кремния улучшают механические свойства.

Дуралюминий (дуралюмин) – сплав шести компонентов: алюминия, меди, магния, марганца, кремния и железа. Указанный сплав можно причислить к сплавам системы Al – Cu – Mg, кремний и железо являются постоянными примесями. Перечисленные компоненты образуют ряд растворимых соединений (CuAl_2 , фаза S, Mg_2Si) и нерастворимых соединений (железистые и марганцовистые соединения). Структура дуралюмина в отожженном состоянии состоит из твердого раствора и вторичных включений различных интерметаллидных соединений.

Дуралюмин относится к сплавам, в которых не происходят полиморфные превращения при нагреве. Поэтому они могут подвергаться упрочняющей термической обработке, состоящей из закалки с последующим естественным и искусственным старением.

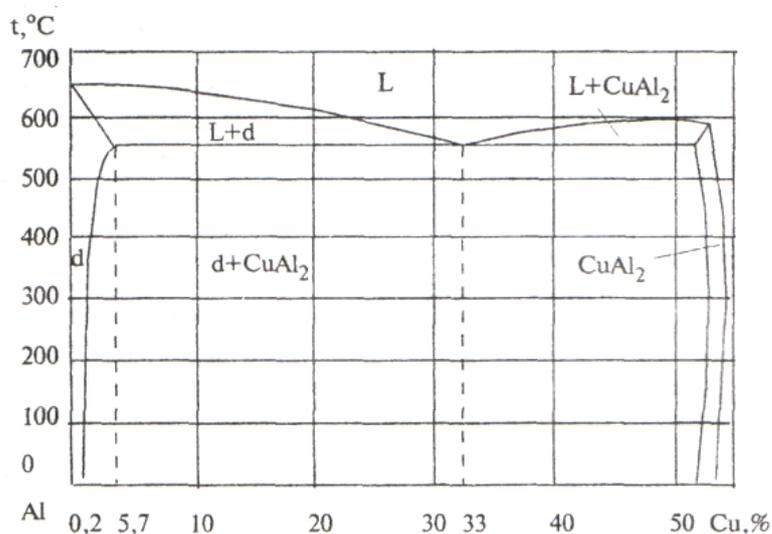


Рис. 26. Диаграмма состояния сплавов Al – Cu

После закалки с оптимальных температур (500°C) основное количество соединений CuAl_2 и Mg_2Si растворяется в алюминии, соединения железа не растворяются. Поэтому в закаленном состоянии структура состоит из алюминиевого твердого раствора (пересыщенного α – раствора) и нераство-

римых включений соединений железа. Такая структура будет отличаться большей пластичностью, но меньшей твердостью и прочностью, т.е. в результате закалки дуралюмин становится мягким и пластичным. Старению предшествует 2...3 – часовой инкубационный период, в течение которого сплав сохраняет высокую пластичность. Но полученный в результате закалки α – раствор является неустойчивым. Выдержка при комнатной температуре (естественное старение) или при искусственном повышении температуры (искусственное старение) приводит к изменениям в твердом растворе, ведущем в конечном итоге к выделению соединений (в сплавах дополнительно легированных магнием также выделяется S – фаза – CuMgAl_2).

Дуралюмины после закалки подвергают естественному старению, так как оно обеспечивает получение более высокой коррозионной стойкости, но естественное старение продолжается в течение 5 – 7 суток. Длительность старения значительно сокращается при увеличении температуры до 40°C особенно 100°C , температура искусственного старения различных алюминиевых сплавов колеблется от 20°C до 200°C .

имеет две полиморфные модификации: до 882°C существует α – титан, который кристаллизуется в гексагональной решетке с периодами $a = 0,2951$ нм и $c = 0,4684$ нм, а при более высоких температурах – β – титан, имеющий ОЦК-решетку с периодами $a = 0,3282$ нм. Плотность титана $4,5$ г/см³.

Титан благодаря защитной пленке из TiO_2 обладает очень высокими коррозионной и химической стойкостью, сохраняющимися в интервале температур от -250 до 550°C .

Сплавы на основе титана получили значительно большее применение, чем технический титан.

Титановые сплавы классифицируются по способу производства, структуре, механическим свойствам и способности упрочняться термической обработкой.

По способу производства титановые сплавы делятся на деформируемые и литейные сплавы. *По механическим свойствам* – нормальной прочности, высокопрочные, жаропрочные и повышенной пластичности. *По способности упрочняться термической обработкой* различают упрочняемые и неупрочняемые титановые сплавы.

подавляющее большинство металлов образуют с титаном диаграммы состояния с эвтектоидным превращением. *По структуре* титановые сплавы

делят на α – , $(\alpha+\beta)$ – и β – сплавы. Все легирующие элементы по влиянию на полиморфизм титана можно разделить на три группы:

1. α – стабилизаторы (алюминий, галлий, индий, углерод, азот, кислород);
2. β – стабилизаторы (молибден, ванадий, хром, марганец, железо, медь, никель, кобальт);
3. нейтральные элементы (олово, цирконий, германий).

Наилучшее сочетание свойств достигается в $(\alpha+\beta)$ – сплавах. Эти сплавы более прочны, чем однофазные, хорошо куются и штампуются, поддаются термической обработке.

Титановые сплавы подвергают термической обработке – отжигу, закалке и старению, химико-термической обработке (азотированию, силицированию). Упрочняющая обработка, состоящая из закалки с последующим старением, применима только для $(\alpha+\beta)$ – сплавов. Сплавы, имеющие структуру α – раствора, нельзя упрочнить термической обработкой.

С целью повышения твердости, износостойкости и жаропрочности титановые сплавы могут подвергать азотированию. Азотирование проводят в газовой среде при температуре 900°C , процесс длителен (до 50 ч). Для уменьшения хрупкости азотированного слоя заготовки подвергают вакуумному отжигу при $800-900^{\circ}\text{C}$.

Превращения при закалке и старении в титановых сплавах похожи на соответствующие превращения в стали. Однако такого существенного упрочнения, как в сталях, в титановых сплавах не происходит.

Состав и свойства некоторых титановых сплавов приведены в табл. 8.

Титановые сплавы обладают хорошими литейными свойствами; они отличаются высокой жидкотекучестью и плотностью отливок, а также малой склонностью к образованию горячих трещин. Однако литейные титановые сплавы имеют более низкие механические свойства по сравнению с деформируемыми сплавами.

Титан и его сплавы благодаря высокой удельной прочности и хорошей коррозионной стойкости применяют в разных отраслях промышленности, особенно в авиа- и ракетостроении, судостроении и химической промышленности. Широкое использование титановых сплавов сдерживается их сравнительно высокой себестоимостью.

Таблица 8.

**Химический состав и механические свойства некоторых
ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

Сплав	Химический состав, %				Механические свойства			
	Al	V	Mo	Прочие	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	KCU, МДж/м ²
α - сплавы								
BT5	4,5-6,2	1,2	0,9	0,3 Zr	700-950	650-850	12	0,4
BT5-1	4,3-6,0	1,0	–	2-3 Sn	700-950	650-850	12	0,45
псевдо-α - сплавы								
OT4-1	1,5-2,5	–	–	0,7-2 Mn	600-750	470-650	30	0,5
OT4	3,5-5,0	–	–	0,8-2 Mo	700-900	550-650	18	0,5
BT20	5,5-7,0	0,8-2,5	0,5-2,0	1,5-2,5 Zr	950-1150	950-1150	8	0,45
($\alpha + \beta$) - сплавы								
BT6	5,3-6,8	3,5-5,3	–	–	1100-1150	1000-1050	15	0,3
BT14	3,5-6,3	0,9-1,9	2,5-3,8	0,3Zr	1150-1400	1080-1300	8	0,5
BT16	1,6-3,8	4,0-5,0	4,5-5,5	0,8-1,2 Cr	1250-1450	1100-1200	5	0,5
BT22	4,4-5,7	4,0-5,5	4,0-5,5	0,8-1,2 Cr	1100-1200	–	9	0,4
Примечание. 1. Псевдо- α –сплавы имеют структуру α – раствора с небольшим количеством β -фазы (1-4%) вследствие легирования β -стабилизаторами (Mn, Mo, V и др.). 2. Свойства сплавов BT6, BT14, BT22 приведены после закалки и старения; остальных – после отжига.								

ЛЕКЦИЯ 8

Материалы с особыми физическими свойствами. Наноматериалы. Научные основы выбора материалов.

План лекции 8

(лекция консультация в активной форме)

Раздел 6. Материалы с особыми физическими свойствами.

Тема 6.1. Материалы с особыми магнитными свойствами. Ферромагнетики. Магнитомягкие материалы. Магнитотвердые материалы.

Тема 6.2. Материалы с особыми тепловыми свойствами: сплавы с заданным температурным коэффициентом линейного расширения и сплавы с заданным коэффициентом модуля упругости.

Тема 6.3. Материалы с высокой электрической проницаемостью, их строение, свойства и область применения. Полупроводниковые материалы, их строение и свойства. Методы получения сверхчистых материалов. Диэлектрики.

Раздел 7. Наноматериалы.

Тема 7.1. Общая характеристика и классификация. Свойства и применение наноматериалов.

Раздел 8. Научные основы выбора материалов.

Тема 8.1. Проблема выбора материала. Эксплуатационная надежность материала. Технологичность материала. Экономичность материала.

Тема 8.2. Общие рекомендации по выбору материалы.

Магнитные свойства материалов. Все вещества в разной степени обладают магнитными свойствами, так как электроны, протоны и нейтроны, из которых построены атомы, имеют магнитное взаимодействие (магнитный момент). По значению и знаку магнитной восприимчивости все вещества можно разделить на три основных группы: диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

Диамагнетики – вещества, у которых при внесении их в магнитное поле во всем объеме индуктируются незатухающие вихревые микротоки, создающие собственное магнитное поле, направленное навстречу внешнему. Диамагнетизм присущ всем веществам, но у некоторых он перекрывается более сильными эффектами.

К диамагнитным металлам относятся медь, серебро, золото, ртуть, цинк, кадмий, сурьма, бериллий, висмут и др.

Парамагнетики – вещества, которые, находясь во внешнем магнитном поле, приобретают намагниченность, совпадающую по направлению с напряженностью этого поля. Парамагнетизм обусловлен ориентацией во внешнем магнитном поле постоянных магнитных моментов атомов парамагнитного вещества, которыми они обладают независимо от напряженности намагничивающего поля.

К парамагнитным металлам относятся молибден, вольфрам, алюминий, кальций, барий и др.

Ферромагнетики – вещества, которые самопроизвольно намагничиваются, обладают высокими значениями магнитной проницаемости (до $10^5 \dots 10^6$), изменяют форму и размеры под действием магнитного поля (магнитострикция). Характерными представителями ферромагнетиков являются железо, никель, кобальт и их сплавы, а также ряд редкоземельных металлов – гадолиний, тербий и их сплавы.

Магнитотвердые (магнитожесткие) материалы – ферромагнитные материалы, которые намагничиваются и перемагничиваются в сильных

магнитных полях, характеризующиеся высокой коэрцитивной силой и остаточной магнитной индукцией. В технике используют литые и порошковые магнитные материалы на основе железа и кобальта с добавлением других веществ (в т. ч. и редкоземельных). Из магнитотвердых материалов делают постоянные магниты, используемые в измерительных приборах, электродвигателях и других устройствах.

Ални – общее название группы магнитотвердых сплавов на основе железа, образованное от первых букв главных компонентов: алюминия (11...18%) и никеля (20...34%). Легирующими элементами могут быть кобальт, медь, кремний, титан.

Кроме того, известен магнитотвердый материал *магнико* на основе железа, содержащий кобальт (24%), никель (14%), алюминий (8%) и медь (3%). Этот сплав имеет высокое значение остаточной магнитной индукции и коэрцитивной силы. Анизотропию магнитных свойств магнико получают термической обработкой в магнитном поле.

Постоянные магниты изготавливают из материалов, которые способны намагничиваться и сохранять намагниченность. Для сердечников электромагнитов применяют металл, который намагничивается во включенном состоянии и размагничивается в выключенном. Мощные магниты отливают из сплавов железо – никель – кобальт и алюминий – никель – кобальт (*альнико*), содержащий 10...12% алюминия, 20...21% никеля и 5...10% кобальта. Поскольку этот материал хрупок, обработку отливки выполняют шлифованием.

Магнитомягкие материалы – это ферромагнитные материалы, которые намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в слабых магнитных полях. Эти материалы характеризуются высокими значениями магнитной проницаемости ($10^2...10^5$) и небольшой коэрцитивной силой (напряженность магнитного поля для полного размагничивания). К ним относятся широко известные сплавы – железоникелевые (*пермаллой*), железокобальтовые (*пермендюр*), смешанные ферриты, а также электротехнические стали для электрических машин и специального назначения термомагнитные сплавы и магнитоstrictionные материалы.

Магнитоstriction – это явление, связанное с изменением размеров и формы тела при его намагничивании. По своему значению магнитоstriction значительна у ферромагнитных материалов и может быть продольной, когда удлинение образца происходит в направлении магнитного поля, и поперечной, когда это явление происходит перпендикулярно направлению

магнитного поля. Кроме того, этот эффект может быть обратимым, т. е. магнитоупругим (эффект Вилари), когда происходит изменение намагниченности образца при его деформации.

К магнитомягким материалам, кроме названных, относятся также никель, алфер, ряд ферритов и некоторые редкоземельные металлы, их сплавы и соединения. Из указанных материалов изготавливают магнитоострикционные преобразователи, в которых энергия переменного электрического и магнитного полей преобразуется в энергию механических УЗ-колебаний или, наоборот, благодаря обратимому эффекту магнитоострикции – в магнитное поле при механическом воздействии на преобразователь. Устройства с магнитоострикционными преобразователями используются в УЗ-установках для очистки электронных блоков, разделения твердых и хрупких материалов, для измерения вибрации разных сооружений, в фильтрах и стабилизаторах электрических и радиотехнических устройств.

Электротехническая сталь относится к магнитомягким материалам. Ее разделяют на два вида: динамную (изотропную) и трансформаторную (анизотропную). Эта сталь кроме железа и 0,1% углерода содержит 0,3...6,0% кремния и 0,1...0,3% марганца.

Все материалы характеризуются электрической проводимостью, которая обусловлена их природой – имеющимися в них носителями тока – подвижными электрическими зарядами. По виду этих носителей различают электронную проводимость (металлы, полупроводники), ионную проводимость (электролиты) и электронно-ионную проводимость (плазма). В зависимости от удельной электропроводности все вещества условно делят на три группы: проводники (удельная электропроводность более 10^6 См/м), полупроводники (удельная электропроводность 10^{-8} ... 10^6 См/м) и диэлектрики (изоляторы, удельная электропроводность менее 10^{-8} См/м).

Электрическое сопротивление – величина, характеризующая противодействие, оказываемое электрической цепью (проводником), движущимся в ней электрическим зарядом, выражаемое в омах (Ом). Электрическое сопротивление и электрическая проводимость – понятия обратные одно другому: чем выше электрическая проводимость и наоборот.

В технике используются материалы с высокими и проводимостью, и сопротивлением. Медь и алюминий обладают самым малым из всех металлов (за исключением серебра) электрическим сопротивлением, поэтому они в основном используются для производства электрических проводов, в которых потери электроэнергии должны быть минимальными. Медь как

материал для электрических проводов предпочтительнее, так как она хорошо проводит тепло и электрический ток, механически прочна и коррозионно-стойка. Электропроводность чистого алюминия составляет около 60% электропроводности меди, но это компенсируется вдвое меньшей плотностью, алюминия, позволяющей делать провода из него более толстыми. Недостатком алюминия является его незначительная стойкость при изгибах и перегибах.

Такие материалы, как вольфрам, нихром, фехраль, хромаль и др., имеют большое электрическое сопротивление и применяются в тех случаях, когда электрическую энергию необходимо превратить в свет или тепло. Чистый вольфрам в виде проволоки используют для производства нитей ламп накаливания благодаря его высокой рабочей температуре – 2200...2500⁰С. Большая светоотдача, а также очень высокая температура испарения гарантируют длительный срок их службы. Вольфрамовые прутки и проволоку применяют для изготовления нагревательных элементов высокотемпературных печей (до 2500⁰С). Удельное электрическое сопротивление вольфрама составляет 5,03 мкОм·м. Вольфрам и молибден являются дорогими и дефицитными металлами, поэтому там, где это возможно, стараются заменить эти металлы другими.

Константан – это сплав меди с никелем (39...41%) и марганцем (1...2%), обладающий удельным электрическим сопротивлением 0,48 мкОм·м, которое слабо зависит от изменения температуры. Этот материал используют для изготовления резисторов, элементов измерительных приборов и термопар.

Манганин – медный сплав, легированный 11,5...13,5% марганца и 2,5...3,5% никеля, обладающий стабильным удельным электрическим сопротивлением при изменении температуры. Его удельное электрическое сопротивление составляет 0,4 мкОм·м. Из манганина делают проволоку и ленты для электронагревательных приборов.

Нихром – сплав никеля (65...80%) с хромом (15...30%) и некоторыми добавками кремния, алюминия и других элементов, обладающий удельным электрическим сопротивлением 1,08 мкОм·м. Сплав характеризуется высокой жаростойкостью и используется для изготовления нагревателей электрических печей, бытовых приборов, резисторов, реостатов. Сплав нихрома, в котором до 20% никеля заменено железом, называется *ферронихромом*.

Хромаль – жаростойкий (до 1000 ... 1400⁰С) сплав железа с хромом (15 ... 30 %) и алюминием (4,5 ... 6,0), имеющий удельное электрическое сопротивление 1,3 ... 1,5 мкОм·м. Название сплава образовано от слов «хром» и «алюминий». Хромаль марок Х23Ю5Т и Х27Ю5 используют для изготовления нагревателей сопротивления электрических цепей. Зарубежные аналоги хромаля – это *канталь*, *мегапир*.

Фехраль – жаростойкий (до 1100⁰С) сплав железа с хромом (8 ... 12,5) и алюминием (3,5 ... 5,5 %), имеющий высокое удельное электрическое сопротивление – 1,1 ... 1,35 мкОм·м. Название сплава образовано от слов «феррум», «хром» и «алюминий». Используется фехраль для производства нагревательных элементов электрических установок.

Молибден – тугоплавкий металл с удельным электрическим сопротивлением 5,17 мкОм·м, применяемый в производстве осветительных и электровакуумных приборов, а также для изготовления электронагревателей, например, для колпаковых печей, работающих в атмосфере азота и водорода.

В качестве нагревателей электрических печей служат силитовые стержни, которые получают при спекании смеси порошков корборунда и кремния. Такие нагреватели способны длительное время работать при высокой температуре до 2000⁰С в воздушной атмосфере.

Тепловые свойства материалов определяются тремя известными способами передачи теплоты: теплопроводностью, конвекцией и излучением (радиацией). Механизм теплопередачи и электропередачи у металлов одинаковый – свободными электронами, поэтому хорошие проводники теплоты, как правило, являются хорошими проводниками электричества.

Тепловые свойства характеризуются рядом параметров – температурой плавления, теплопроводностью, температурным коэффициентом линейного (объемного) расширения и др.

По *температуре плавления* различают легкоплавкие, тугоплавкие и занимающие промежуточное положение металлы. К легкоплавким металлам, применяющимся в промышленности, относится ртуть (температура плавления – 39⁰С), олово (232⁰С), свинец (327⁰С), цинк (419⁰С) и алюминий (660⁰С). К тугоплавким относятся вольфрам (2400⁰С), молибден (2695⁰С), хром (1860⁰С), титан (1800⁰С) и ванадий (1720⁰С).

Известны сплавы, температура плавления которых получается выше температуры плавления компонентов.

Теплопроводность характеризуется коэффициентом теплопроводности, показывающем количество теплоты в джоулях (Дж), проходящей за 1с от одной точки тела к другой при разности температур на двух противоположных гранях образца в 1К.

Среди металлов наивысшим коэффициентом теплопроводности обладает серебро – 420Вт/(м·К), на втором месте – 395 Вт/(м·К). Из неметаллов уникальные коэффициенты теплопроводности имеют бромеллитовая керамика и природные алмазы. Бромеллитовая керамика (*бромеллит*) нашла применение в технике благодаря чрезвычайно высокой теплопроводности и хорошим электроизоляционным свойствам. Теплопроводность бромеллита при 29⁰С составляет $(1,67...2,52) \cdot 10^2$ Вт/(м·К), что в 7 раз выше теплопроводности корундовой керамики (*корунда*) и соответствует уровню теплопроводности стали, алюминия и свинца. Бромеллитовая керамика имеет высокую термическую стойкость, обусловленную ее уникальной теплопроводностью.

По значению коэффициента теплопроводности все материалы можно разделить на хорошие проводники теплоты и плохие (теплоизоляционные материалы). К хорошим проводникам теплоты относятся прежде всего металлы.

Теплоизоляционные материалы (теплоизоляторы) – это материалы, имеющие низкую теплопроводность, обычно в пределах 0,02 ... 0,20 Вт/(см·К), как правило, с пористостью более 60 %. Прежде всего к ним относятся строительные материалы.

Теплоизоляторы используют для строительства печей разного назначения, тепловой изоляции паровых котлов, тепловых трубопроводов и других устройств, в которых очень важно снизить тепловые потери.

Температурный коэффициент линейного расширения разных материалов очень мал (миллионные доли первоначальной длины, измеренной при 0⁰С), но его необходимо учитывать, например, в литейном производстве или при изготовлении сварных конструкций, в которых из-за неравномерного охлаждения возникают внутренние напряжения и образуются трещины. Особо важно влияние температурного коэффициента линейного расширения на точность измерительных приборов, инструмента и прецизионных устройств.

В измерительной технике используют ферромагнитный сплав (*инвар*) на основе железа с добавкой 36% никеля, который имеет малый и неизменный в интервале температур -80...+100⁰С температурный коэффици-

ент линейного расширения, равный $1,5 \cdot 10^{-6} 1/\text{K}$. Известен *суперинвар*, в составе которого наряду с железом содержится 32% никеля и 4% кобальта. Детали из указанных сплавов используются в качестве эталонов сравнения в dilatометрах при определении температурного коэффициента линейного расширения других материалов.

Тепловое сопротивление – это параметр, характеризующий изменение температуры на границе двух тел, находящихся в тепловом контакте, относительно мощности, проходящей через них. Данное явление специфично, его измеряют в тех случаях, когда очень важно передать максимальную мощность при минимальных размерах изделия с сохранением его работоспособности.

Нanomатериалы. Значительный интерес научных и технических кругов к изучению способов получения, структуре и свойствам наноразмерных систем обусловлен многообразием и уникальностью вариантов их практического применения.



Рис. 27. Виды наноматериалов

К *наноструктурным материалам* (нанокристаллическим, нанофазным, наноразмерным и т.п.) относятся объекты с характерным структурным размером менее 100 нм. Нанокристаллические материалы и нанотехнологии – одни из самых модных быстроразвивающихся направлений современной науки. Особое строение и свойства малых атомных агрегаций представляют значительный научный интерес, так как являются промежуточными между строением и свойствами изолированных атомов и массивного (объемного) твердого тела.

Малый размер зерна приводит к появлению уникальных физических, химических, механических и других свойств, что привлекает внимание широкого круга специалистов в области материаловедения, физики и химии твердого тела, биологии и перспективных технологий. Формирование нанокристаллической структуры позволяет существенно изменить физические свойства материала: повысить предел текучести и прочности, теплоемкость, электросопротивление, диффузионную способность материала, понизить его упругость, температуру магнитных переходов и т.п. Изменяются и свойства других структурных уровней: атомного, электронного (снижается работа выхода электронов) и ядерного.

Необычные свойства наноматериалов обусловлены как особенностями отдельных частиц (кристаллитов), так и их коллективным поведением, зависящим от характера взаимодействия между наночастицами. Такие эффекты появляются, когда размер кристаллических зерен не превышает 100 нм, и наиболее отчетливо наблюдаются, когда размер зерен менее 10 нм. Таким образом, изучение свойств сверхмелкозернистых материалов требует учета не только их состава и структуры, но и дисперсности.

Отличие свойств малых частиц от свойств массивного материала известно уже достаточно дано и используется в разных областях техники. Примерами могут служить широко применяемые аэрозоли, получение цветных стекол благодаря окрашиванию их коллоидными частицами металлов, суспензии металлических наночастиц размером от 30 нм используют как присадки к моторным маслам для восстановления изношенных деталей автомобильных и других двигателей непосредственно в процессе работы.

Фуллерены, фуллериты, нанотрубки. Углерод является достаточно распространенным элементом. В твердом состоянии в природе он присутствует в виде графита и алмаза. Искусственно были созданы также такие

модификации углерода, как карбин и лонсдейлит. Последний был также обнаружен в составе метеоритов.

В 1985 г. при исследовании паров графита, полученных испарением лазерным лучом при длительности лазерного импульса 5 нс с поверхности вращающегося графитового диска, были обнаружены кластеры (или многоатомных молекул) углерода.

Фуллерены представляют собой замкнутые молекулы углерода, в которых все атомы расположены в вершинах правильных шестиугольников или пятиугольников, покрывающих поверхность сферы или сфероида. Название фуллеренов связано с именем известного американского архитектора и математика Фуллера. Как архитектор он предложил строительные конструкции в виде многогранных сфероидов, предназначенные для перекрытия помещений большой площади, а как математик – использовал системный подход к анализу структур различного происхождения и показал, что структура является самостабилизирующейся системой.

Фуллерены отличаются необычной кристаллографической симметрией и уникальными свойствами.

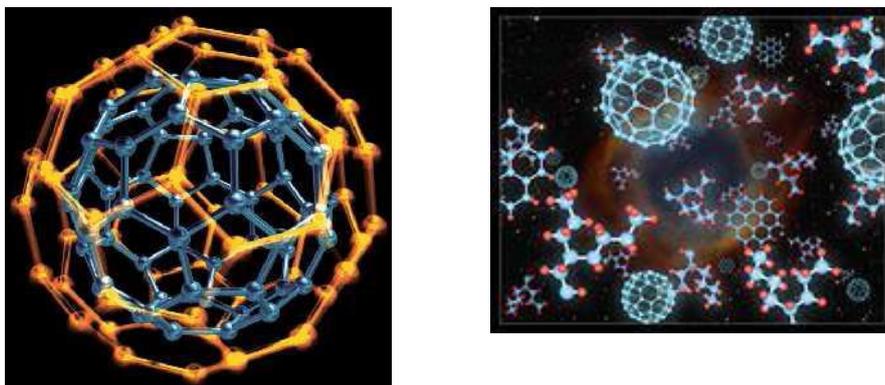


Рис. 28. Фуллерены

В настоящее время понятие «*фуллерены*» применяется к широкому классу многоатомных молекул углерода с общей формулой C_n (n – четное), имеющих форму замкнутого полого многогранника. Фуллерены являются четвертой аллотропной формой углерода (первые три – алмаз, графит и карбин). Наиболее известные фуллерены – C_{60} и C_{70} (C_{60} имеет сферическую форму схожую с футбольным мячом, а C_{70} – ближе к форме дыни). По мере исследования фуллеренов были синтезированы и изучены и другие

молекулы фуллеренов, содержащих различное число атомов углерода – от 36 до 540 и более.

Молекула C_{60} – самая симметричная из всех известных до сих пор. Она состоит из шестидесяти атомов углерода, расположенных на сферической поверхности с диаметром ~ 1 нм.

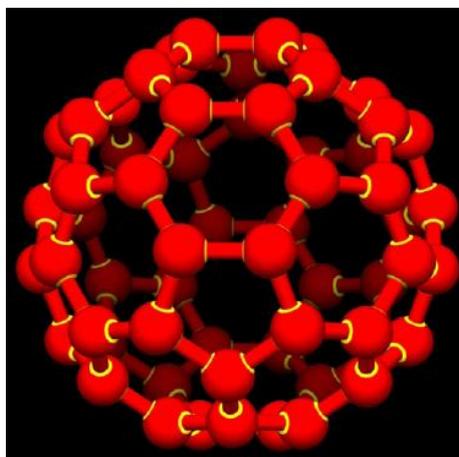


Рис. 29. Молекула фуллерена C_{60}

Атомы углерода располагаются на поверхности сферы в вершинах пятиугольников (пентагонов) и шестиугольников (гексагонов). Эта молекула напоминает футбольный мяч, имеющий 12 черных пентагонов и 20 белых гексагонов. В молекуле C_{60} атомы углерода связаны между собой ковалентной связью. Такая связь осуществляется обобществлением валентных (внешних) электронов атомов. Каждый атом углерода в молекуле C_{60} связан с тремя другими атомами, образуя при этом правильные пятиугольники (их 12) и неправильные шестиугольники (их 20).

При определенных условиях молекулы C_{60} упорядочиваются в пространстве, располагаясь в узлах кристаллической решетки.

Твердофазные структуры, образованные на основе молекул фуллерена, называют фуллеритами. Кристалл фуллерита C_{60} обладает кубической структурой с ГЦК решеткой, имеющей постоянную решетки 1,42 нм и плотность $1,65 \pm 0,03$ г/см³. Вещество устойчиво на воздухе, не плавится и не разлагается до 360°C, после чего начинает сублимировать.

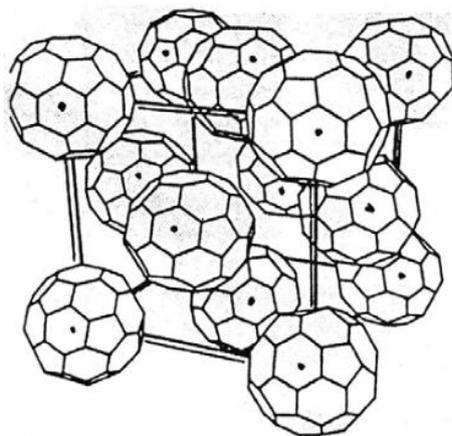


Рис. 30. Кристаллическая решетка C_{60}

При комнатной температуре центры молекул образуют регулярную ГЦК решетку, но сами молекулы при этом свободно вращаются вокруг своих центров. При понижении температуры до 250-260К происходит фазовый переход первого рода: свободное вращение молекул прекращается, они определенным образом ориентируются друг относительно друга и их центры несколько смещаются из положений, соответствующих идеальному кубическому расположению. Происходит изменение кристаллической решетки фуллерита. Низкотемпературная фаза ($T < 260\text{K}$) имеет примитивную кубическую решетку.

Элементарная ячейка ГЦК решетки фуллерита содержит 8 тетраэдрических и 4 октаэдрических пустот (междуузлия). В ГЦК структуре фуллерита на междузлия приходится 26% объема, так что атомы металлов, прежде всего щелочных и щелочземельных с малым атомным радиусом, могут легко разместиться в междузлиях между сферическими молекулами вещества. В процессе взаимодействия металлов с фуллеритами атомы занимают октаэдрические и тетраэдрические пустоты. Октаэдрические междузлия больше тетраэдрических и поэтому атомы металла прежде всего занимают их.

Если заполнены только октаэдрические пустоты, то образуется новый полимерный материал состава M_1C_{60} (M – атом металла). Если же заполнены все пустоты, то состав соответствует формуле M_3C_{60} . Дальнейшее увеличение содержания атомов металла приводит к перестройке кристаллической структуры и устойчивым при этом является соединение M_6C_{60} . Фуллериты с внедренными атомами металлов (M_1C_{60} , M_3C_{60} , M_6C_{60}) соединения называют фуллеридами. В частности, фуллериды фиксируются как

устойчивые комплексы MC_{60} ($M=Na, K, Cs, Sr, Ba, La, Li$). Атомы металла при этом могут находиться внутри фуллерена и вне его, а также могут быть встроены в структуру углеродного каркаса.

Вследствие легирования фуллериды могут обладать либо полупроводниковыми, либо металлическими свойствами. Чистый фуллерен при комнатной температуре является изолятором с величиной запрещенной зоны более 2 эВ или полупроводником с очень низкой проводимостью.

Фуллериды щелочных металлов состава M_3C_{60} ($M - K, Rb, Cs$) обладают сверхпроводящими свойствами.

Другим интересным свойством легированных фуллеренов является их ферромагнетизм. Впервые это явление было обнаружено при легировании фуллерена C_{60} тетрадиметиламиноэтиленом (ТДАЭ).

Ферромагнетизм обнаружен и в другом фуллериде, который получается при легировании фуллерена C_{60} смесью бора и йода в равных пропорциях.

В настоящее время научились получать легированные фуллерены, путем добавления к их молекулам других атомов или молекул, в том числе и помещением атома легирующего элемента во внутренний объем молекулы. С использованием высокого давления или лазерного облучения существует возможность соединения двух фуллереновых молекул в димер или полимеризации исходной структуры мономеров.

Классическим способом получения фуллеренов является испарение в вакууме углерода с получением перегретого (до 10^4 К) углеродного пара. Затем перегретый пар интенсивно охлаждают в струе инертного газа (например, гелия). В результате происходит осаждение порошка в котором присутствует значительное количество кластеров (молекулы) двух групп – малого размера с нечетным числом атомов углерода (до C_{25}) и большого размера с четным числом атомов (C_{60} и C_{70}). Далее с использованием, например, методов порошковой металлургии происходит их разделение. Тем более, что кластеры, относящиеся к первой группе не являются стабильными образованиями. Подбирая параметры процесса возможно получение молекул и с большим числом атомов (C_{100} и более). Существуют и ряд других методов.

Для получения тонких композитных пленок (с толщиной 200 - 600 нм) на основе фуллереновой матрицы используется метод вакуумного термического напыления смеси заданного состава на подложки, например на

GaAs. Смесь порошка C_{60} с чистотой 99,98% и CdTe была приготовлена путём их совместного размельчения до 1 мкм и спекания при температуре $300^{\circ}C$. Напыление проводили в вакууме при давлении 10^{-6} Тор и температуре подложки около $160^{\circ}C$. Полученные пленки не имели заметных пространственных неоднородностей химического состава.

Очень большая твердость фуллеренов позволяет производить из них фуллеритовые микро- и наноинструменты для обработки и испытаний сверхтвердых материалов, в том числе и алмазов. Например фуллеритовые пирамидки из C_{60} используются в атомно-силовых зондовых микроскопах для измерения твердости алмазов и алмазных пленок. Фуллерены также широко исследуются как материалы для электронно-оптической области применения. Фуллерены и соединения на их основе также являются перспективными материалами для создания наноструктур. Фуллереновые плёнки могут быть использованы для создания двумерных фотонных кристаллов. Причем оптические свойства фуллереновых пленок можно изменять за счет введения в них добавок полупроводниковых материалов, например CdSe и CdTe.

Углеродные нанотрубки (УНТ) – это протяженные структуры в виде полого цилиндра, состоящие из одного или нескольких свернутых в трубку графитовых слоев с гексагональной организацией углеродных атомов. Диаметр УНТ колеблется от одного до нескольких десятков нанометров, а длина измеряется десятками микрон и постоянно увеличивается по мере усовершенствования технологии их получения. Концы нанотрубок часто имеют сужения в виде полусферической головки, которая может рассматриваться как половина молекулы фуллерена. УНТ по своей структуре занимают промежуточное положение между графитом и фуллеренами, но многие их свойства не имеют ничего общего ни с графитом, ни с фуллеренами. Это позволяет рассматривать нанотрубки как самостоятельный материал, обладающий уникальными физико-химическими характеристиками.

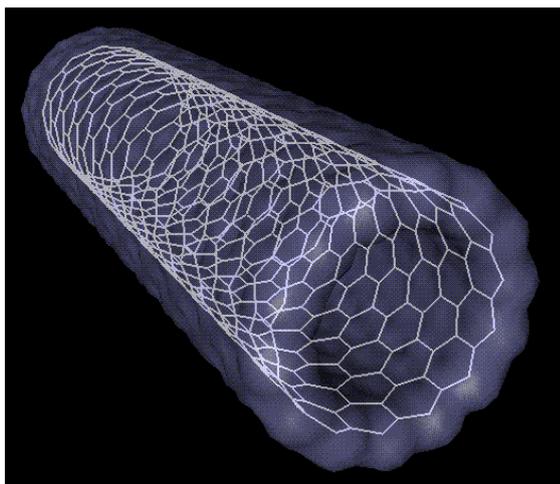


Рис.31. Углеродная нанотрубка.

Можно выделить три основных способа получения УНТ:

- электродуговое распыление графита;
- абляция графита с помощью лазерного облучения;
- каталитическое разложение углеводородов.

Способ получения УНТ электродуговым распылением графита является сравнительно простым и наиболее распространенным.

УНТ могут состоять из двух отдельных поверхностей с различными физическими и химическими свойствами. Первая – боковая (цилиндрическая) часть трубки, вторая – закрытый торец, по форме напоминающий половину молекулы фуллерена.

По своей структуре нанотрубки могут быть однослойными и многослойными. Идеальная однослойная нанотрубка образуется путем сворачивания плоскости графита, состоящей из правильных шестиугольников, в цилиндрическую поверхность. Результат сворачивания зависит от угла ориентации графитовой плоскости относительно оси нанотрубки.

Взаимная ориентация гексагональной сетки графита и продольной оси нанотрубки определяет важную структурную характеристику нанотрубки, которая получила название *хиральности*. Хиральность характеризуется двумя целыми числами (m, n), которые определяют взаимное местонахождение шестиугольных сеток.

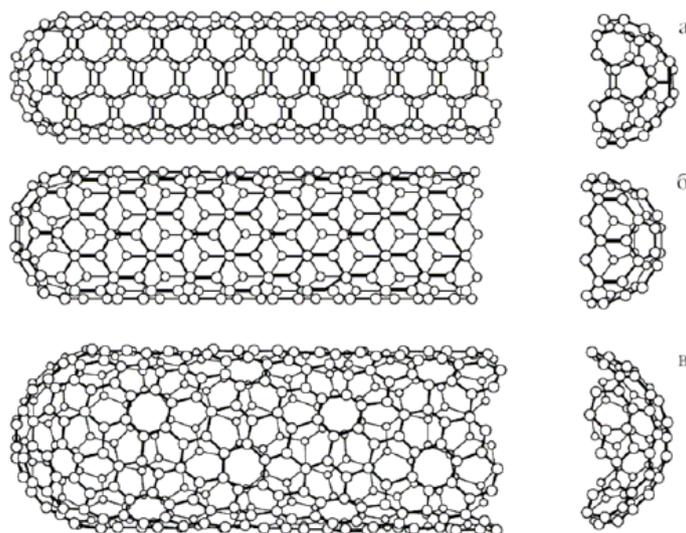


Рис. 32. Примеры возможных структур, зависящих от способа сворачивания графитового листа: а – кресельная структура (тип «кресло»); б – зигзагообразная структура (тип «зигзаг»); в – хиральная структура

В зависимости от способа свертывания сворачивания графитового листа существуют три формы цилиндрических УНТ:

- типа "кресло" (две стороны каждого гексагона ориентированы перпендикулярно оси УНТ),
- типа "зигзаг" (при параллельном положении к оси),
- хиральные (любая пара сторон гексагона расположена к оси УНТ под углом, отличным от 0 или 90°).

Многослойные нанотрубки обладают большим разнообразием формы как в поперечном, так и продольном направлениях. Возможные разновидности показаны на рис.

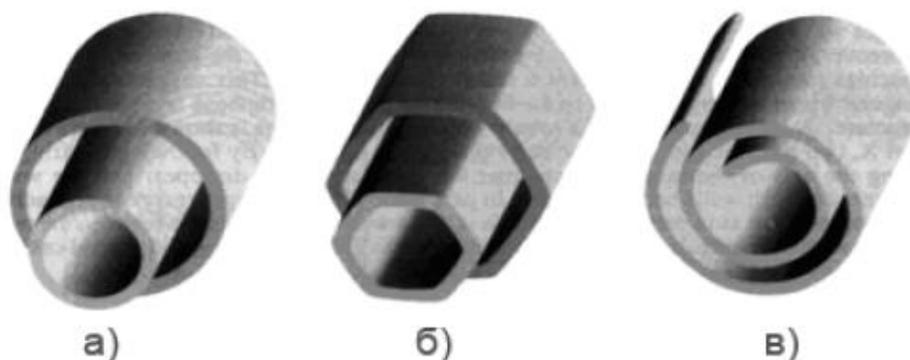


Рис. 33. Модели поперечных структур многослойных нанотрубок: а) «русская матрешка», б) шестигранная призма, в) свиток (сверток)

Наиболее распространена многослойная структура типа «русская матрешка».

Многослойные нанотрубки могут иметь от нескольких до десятков однослойных нанотрубок. Расстояние между стенками приближается до межплоскостного расстояния в графите (0,34 нм). По этой причине минимальный диаметр однослойной нанотрубки составляет 0,7 нм, а последующие диаметры (d_2 , d_3 и т.д.) задаются величиной минимального диаметра. В результате внутренний и внешний диаметры многослойной нанотрубки имеют соответственно величины 0,7 – 4 нм и 5-40 нм.

Последнее время исследования направлены на выяснение физико-химических характеристик нанотрубок.

С одной стороны, это фундаментальный аспект, обусловленный миниатюрными размерами и уникальными физико-химическими характеристиками нанотрубок. С другой стороны – возможности значительного прикладного потенциала нанотрубок. Расширение подобных исследований связано ещё и с тем, что многие свойства нанотрубок зависят от их геометрии.

Наноматериалы конструкционного и функционального назначения на сегодняшний день являются наиболее востребованной областью нанотехнологий. Основные материалы данного класса – это металлические, керамические, полимерные и композиционные.

Применимость того или иного материала определяется комплексом свойств, включающим соотношение между прочностью, пластичностью и вязкостью. Значительный интерес к объемным наноматериалам обусловлен тем, что их конструкционные и функциональные свойства существенно отличаются от свойств крупнозернистых аналогов. В этом плане перспективными являются исследования по усовершенствованию существующих и разработке новых сталей и сплавов с нанокристаллической структурой.

Прирост прочностных свойств сталей и сплавов за последние десятилетия достигался главным образом за счет легирования и изменения фазового состава. В последние годы для улучшения механических характеристик сталей и сплавов стали использовать и другие подходы, основанные на формировании у материалов микро- и нанокристаллическую структуру.

Прочность нанокристаллических материалов при растяжении существенно превышает прочность крупнокристаллических аналогов и при

этом сохраняется лучшее соотношение между прочностью и пластичностью.

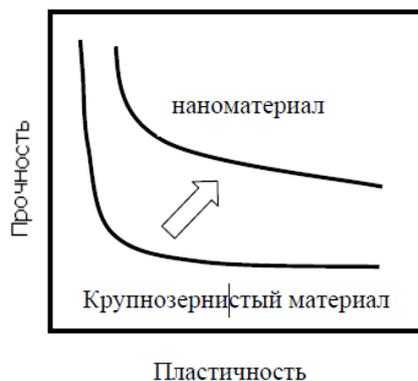


Рис. 34. Соотношение между прочностью и пластичностью для крупнокристаллических и нанокристаллических материалов

Надежность деталей машин определяется множеством факторов: характером нагрузки, распределением и частотой перегрузок, влиянием коррозионной среды, наличием абразивных частиц, концентрацией напряжений и другими факторами – с одной стороны, составом, качеством, состоянием, предшествующей технологией обработки материала и т.п. – с другой стороны.

Можно считать, что надежность деталей $R_{дет}$ определяется, как сочетание двух групп факторов и может быть выражена произведением надежности конструкции R_k на надежность материала R_m :

$$R_{дет} = R_k \cdot R_m .$$

В то время как проблема надежности конструкции основательно разработана в цикле дисциплины технической механики, роль надежности материала пока еще не получила достаточного освещения.

Одна из первых удачных попыток оценить надежность материала была сделана Д.И. Береновым, который предложил ввести понятие работоспособность (а по существу – статической вязкости материала).

Надежность материала по Беренову определяется сочетанием прочности и пластичности:

$$\Delta = k \cdot \sigma_{вр} \cdot \delta ,$$

где k – коэффициент заполнения диаграммы $\sigma - \varepsilon$,
 $\sigma_{вр}$ – предел прочности при растяжении,
 ε – относительное удлинение.

Проблема выбора материала. Рациональный выбор материала – важнейшая задача конструктора, так как надежность, эффективность и экономичность машины зависит с одной стороны от правильности конструкции, а с другой - от правильности выбора материалов для ее деталей.

В настоящее время нет единой методики выбора оптимального материала, а существуют лишь разрозненные рекомендации для подбора пригодного материала в частных случаях различных деталей в различных областях машиностроения, базирующиеся на использовании традиционного материала. Во всех случаях создания новых деталей или изменения условий работы (коррозионная среда, радиация, высокие температуры, космический вакуум и т. п.) приходится начинать поиск с самого начала методом проб и ошибок. Проблема усугубляется тем, что количество новых материалов растет в геометрической прогрессии, тогда как опыт их использования – и арифметической, и все больше отстает от разработки новых материалов. Справочник не может дать рекомендации по использованию нового материала, пока не будет накоплен опыт. Но опыт не накапливается, так как конструкторы не применяют новый материал, поскольку нет рекомендаций. Круг замыкается.

Тем не менее, можно сформулировать некоторые общие положения, которые будут полезны для конструктора и помогут ему грамотно ориентироваться в громадной массе конструкционных и инструментальных материалов. Эти положения основываются на излагаемом курсе материаловедения и могут быть сформулированы таким образом - материал можно считать выбранным правильно, если он наилучшим образом отвечает трем основным требованиям:

- эксплуатационная надежность,
- технологичность,
- экономичность.

Эксплуатационная надежность материала. Наиболее общим требованием, обеспечивающим работоспособность материала, может служить эксплуатационная надежность, под которой следует понимать вероятность того, что данный материал обеспечивает безотказность работы изделия в течение заданного срока.

В каждом конкретном случае ведущая характеристика надежности будет своя: у пружины – выносливость, у подшипника – износостойкость, у лопатки газовой турбины – жаропрочность и т. д. Для правильного выбора материала следует ясно представлять, какие характеристики материала для

данного изделия являются лимитирующими, и подобрать материал, пригодный в первую очередь по этим характеристикам.

Главная трудность здесь – это определение ведущей характеристики с количественной стороны, так как, например, повышение твердости стали может привести к такому снижению ее пластичности, что материал окажется столь же непригодным, как и при недостаточной твердости. Зная природу механических и иных свойств материалов, можно предвидеть, какие из них и в каком состоянии целесообразно использовать для данного изделия, а при необходимости – внести изменения в нужную сторону.

В проблеме надежности большое значение имеет разброс характеристик материала относительно средних значений.

Технологичность материала. Второе важное требование к материалу – его технологичность, т. е. пригодность к обработке теми или иными способами.

Наиболее дешевый способ получения деталей сложной формы – литье. Поэтому, если деталь сложна, - нужно постараться подобрать металл с хорошими литейными свойствами, учитывая его усадку, жидкотекучесть, температуру плавления, горючесть и т. д.

Но, как правило, литые металлы хрупки и не имеют высокой конструкционной прочности. Если эксплуатационные требования не позволяют использовать литье, нужно выбрать материал, обрабатываемый давлением, т. е. обладающий достаточной ковкостью, пластичностью в холодном или горячем состоянии, учитывая при этом наследственное зерно и красноломкость.

Нередко сложные детали могут быть получены сочетанием штамповки со сваркой. В этом случае ведущим технологическим свойством будет наряду со штампуемостью еще и свариваемость, т. е. способность образовывать прочный шов без образования трещин, больших остаточных напряжений и других дефектов.

Точные формы и размеры изделий требуют применения обработки резанием. В этом случае, собирая материал, необходимо учитывать обрабатываемость резанием, т.е. чтобы он не был ни очень твердым, ни очень вязким, не вызывал бы усиленного износа инструмента и обеспечивал бы хорошую чистоту поверхности, причем шлифуемость не совпадает с обрабатываемостью резцом.

Следует также учитывать возможность термической обработки, поскольку она может в несколько раз изменять свойства металла. При этом

надо принимать во внимание закаливаемость, прокаливаемость, наследственное зерно, склонность к короблению и растрескиванию при закалке и к отпускной хрупкости, к образованию шиферного излома, обезуглероживанию и т. д.

Таким образом, технологичность металла играет чрезвычайно важную роль, которую конструкторы не должны забывать, ибо кому же нужен прекрасный по своим эксплуатационным характеристикам материал, если изделие из него невозможно изготовить.

Экономичность материала. Вопросы экономики производства во многих случаях играют решающую роль. Выбирая материал, необходимо стремиться к минимальной его стоимости. Однако такой прямолинейный подход не отражает экономичности производства, поскольку у детали из дешевого материала может оказаться дорогая технология производства изделия, а из дорогого – дешевая. При этом себестоимость продукции может оказаться меньше именно во втором случае, поскольку отходы металла будут меньшими, т. е. выше будет коэффициент использования материала и меньше затраты труда.

Таким образом, выбор оптимального материала должен быть основан на расчете экономических характеристик в тесной увязке с его эксплуатационной надежностью и технологичностью.

ЛЕКЦИЯ 9

Основы обработки материалов

План лекции 9

Раздел 9. Основы обработки материалов.

Тема 9.1. Основные технологические методы получения деталей из конструкционных материалов

Тема 9.2. Сущность литейного производства.

Заключение.

Современными рациональными и распространенными в промышленности являются следующие методы формообразования заготовок и деталей машин:

- литье,
- обработка давлением,
- сварка,
- обработка резанием.

Эти методы в современной технологии конструкционных материалов характеризуются многообразием традиционных и новых технологических процессов, возникающих на их слиянии и взаимопроникновении.

Обработка металлов давлением основана на их способности в определенных условиях пластически деформироваться в результате воздействия на деформируемое тело (заготовку) внешних сил.

Процессы обработки металлов давлением по назначению подразделяют на два вида:

- для получения заготовок постоянного поперечного сечения по длине (прутков, проволоки, лент, листов), применяемых в строительных конструкциях или в качестве заготовок для последующего изготовления из них деталей только обработкой резанием или с использованием предварительного пластического формоизменения, основными разновидностями таких процессов являются прокатка, прессование и волочение;

- для получения деталей или заготовок (полуфабрикатов), имеющих приблизительно формы и размеры готовых деталей и требующих обработки резанием лишь для придания им окончательных размеров и получения поверхности заданного качества; основными разновидностями таких процессов являются ковка и штамповка.

Прокатка (рис. 34, а) заключается в обжатии заготовки 2 между вращающимися валками 1. Силами трения $P_{тр}$ заготовка втягивается между валками, а силы P , нормальные к поверхности валков, уменьшают поперечные размеры заготовки.

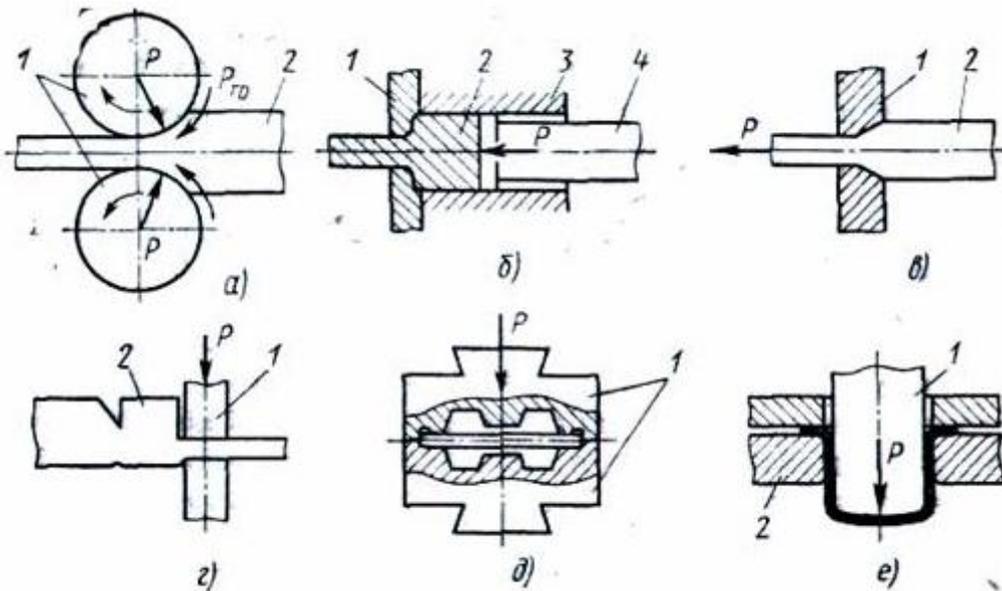


Рис. 34. Схемы основных методов обработки металлов давлением.

Прессование (рис. 34, б) заключается в продавливании заготовки 2, находящейся в замкнутой форме 5, через отверстие матрицы 1, причем форма и размеры поперечного сечения выдавленной части заготовки соответствуют форме и размерам отверстия матрицы, а длина ее пропорциональна отношению площадей поперечного сечения исходной заготовки и выдавленной части и перемещению давящего инструмента 4.

Волочение (рис. 34, в) заключается в протягивании заготовки 2 через сужающуюся полость матрицы 1; площадь поперечного сечения заготовки уменьшается и получает форму поперечного сечения отверстия матрицы.

Ковкой (рис. 34, г) изменяют форму и размеры заготовки 2 путем последовательного воздействия универсальным инструментом 1 на отдельные участки заготовки.

Штамповкой изменяют форму и размеры заготовки с помощью специализированного инструмента – штампа (для каждой детали изготавливают свой штамп). Различают объемную и листовую штамповку.

При *объемной штамповке* сортового металла (рис. 34, д) на заготовку, являющуюся обычно отрезком прутка, воздействуют специализированным инструментом – штампом 1, причем металл заполняет полость штампа, приобретая ее форму и размеры.

Листовой штамповкой (рис. 34, е) получают плоские и пространственные полые детали из заготовок, у которых толщина значительно мень-

ше размеров в плане (лист, лента, полоса). Обычно заготовка деформируется с помощью пуансона 1 и матрицы 2.

Литейное производство – отрасль машиностроения, занимающаяся изготовлением фасонных заготовок или деталей путем заливки расплавленного металла в специальную форму, полость которой имеет конфигурацию заготовки (детали). При охлаждении залитый металл затвердевает и в твердом состоянии сохраняет конфигурацию той полости, в которую он был залит. Конечную продукцию называют отливкой. В процессе кристаллизации расплавленного металла и последующего охлаждения формируются механические и эксплуатационные свойства отливок.

Для изготовления отливок применяют множество способов литья: в песчаные формы (рис. 35), в оболочковые формы, по выплавляемым моделям, в кокиль, под давлением, центробежное литье и др. Область применения того или иного способа литья определяется объемом производства, требованиями к геометрической точности и шероховатости поверхности отливок, экономической целесообразностью и другими факторами.



Рис. 35. Схема технологического процесса получения отливок в песчаных формах

Литейная форма – это система элементов, образующих рабочую полость, при заливке которой расплавленным металлом формируется отливка. На рис. 36, а показана литейная форма для тройника.

Форма обычно состоит из нижней 2 и верхней 6 полуформ, которые изготавливают по литейным моделям 7 (рис. 36, г) в литейных опоках 3, 5. Литейная опока – приспособление для удержания формовочной смеси при изготовлении формы. Верхнюю и нижнюю полуформы взаимно ориентируют с помощью цилиндрических металлических штырей 4, вставляемых в отверстия приливов у опок. Для образования полостей, отверстий или

иных сложных контуров в формы устанавливают литейные стержни 1, которые фиксируют с помощью выступов (стержневых знаков), входящих и соответствующие впадины в форме. Литейные стержни изготавливают по стержневым ящикам (рис. 36, д). Для подвода расплавленного металла в полость литейной формы, ее заполнения и питания отливки при затвердевании используют литниковую систему 8—11. После заливки расплавленного металла, его затвердевания и охлаждения форму разрушают, извлекая отливку (рис. 36, е).

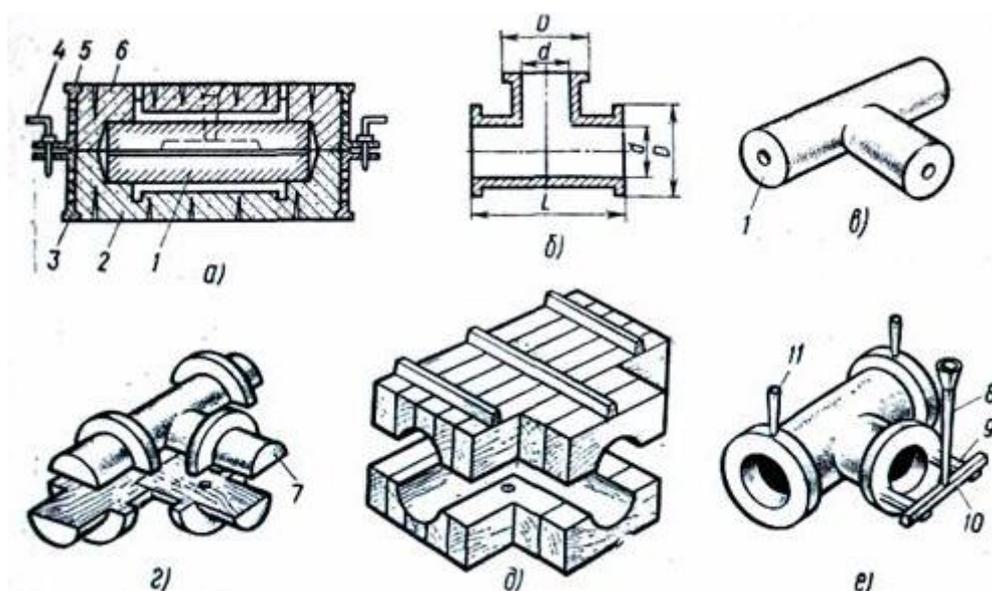


Рис. 36. Литейная форма и ее элементы.

Наиболее важные литейные свойства сплавов: жидкотекучесть, усадка (линейная и объемная), склонность к образованию трещин, склонность к поглощению газов и образованию газовых раковин и пористости в отливках и др.

Жидкотекучесть – это способность металлов и сплавов течь в расплавленном состоянии по каналам литейной формы, заполнять ее полости и четко воспроизводить контуры отливки.

Усадка – свойство литейных сплавов уменьшать объем при затвердевании и охлаждении.

Усадка в отливках проявляется в виде усадочных раковин, пористости, трещин и короблений.

Усадочные раковины – сравнительно крупные полости, расположенные в местах отливки, затвердевающих последними.

Усадочная пористость – скопление пустот, образовавшихся в отливке в обширной зоне в результате усадки в тех местах отливки, которые затвердевали последними без доступа к ним расплавленного металла.

Сварка — технологический процесс получения неразъемных соединений материалов посредством установления межатомных связей между свариваемыми частями при их местном или общем нагреве, или пластическом деформировании, или совместным действием того и другого. Сваркой соединяют однородные и разнородные металлы и их сплавы; металлы с некоторыми неметаллическими материалами (керамикой, графитом, стеклом и др.), а также пластмассы.

Сварка — экономически выгодный, высокопроизводительный и в значительной степени механизированный технологический процесс, широко применяемый практически во всех отраслях машиностроения.

Физическая сущность процесса сварки заключается в образовании прочных связей между атомами или молекулами на соединяемых поверхностях заготовок. Для образования соединений необходимо выполнение следующих условий: освобождение свариваемых поверхностей от загрязнений, оксидов и адсорбированных на них инородных атомов; энергетическая активация поверхностных атомов, облегчающая их взаимодействие друг с другом; сближение свариваемых поверхностей на расстояния, сопоставимые с межатомным расстоянием в свариваемых заготовках.

Свариваемость — свойство металла или сочетания металлов образовывать при установленной технологии сварки соединение, отвечающее требованиям, обусловленным конструкцией и эксплуатацией изделия.

Свариваемость материалов оценивают степенью соответствия заданных свойств сварного соединения одноименным свойствам основного металла и их склонностью к образованию таких сварочных дефектов, как трещины, поры, шлаковые включения и др. По этим признакам материалы разделяют на хорошо, удовлетворительно и плохо сваривающиеся. Многие разнородные материалы, особенно металлы с неметаллами, не вступают во взаимодействие друг с другом. Такие материалы относятся к числу практически несваривающихся.

Свариваемость материалов в основном определяется типом и свойствами структуры, возникающей в сварном соединении при сварке.

Источником теплоты при дуговой сварке служит электрическая дуга, которая горит между электродом и заготовкой. В зависимости от материа-

ла и числа электродов, а также способа включения электродов и заготовки в цепь электрического тока различают следующие способы дуговой сварки: сварка неплавящимся (графитным или вольфрамовым) электродом 1 дугой прямого действия 2 (рис. 37, а), при которой соединение выполняется путем расплавления только основного металла 3 либо с применением присадочного металла 4; сварка плавящимся (металлическим) электродом 1 дугой прямого действия 2 (рис. 37, б) с одновременным расплавлением основного металла 3 и электрода, который пополняет сварочную ванну жидким металлом; сварка косвенной дугой 5 (рис. 37, в), горящей между двумя, как правило, неплавящимися электродами 1; при этом основной металл 3 нагревается и расплавляется теплотой столба дуги; сварка трехфазной дугой 6 (рис. 37, г), при которой дуга горит между электродами 1, а также между каждым электродом и основным металлом 3. Питание дуги осуществляется постоянным или переменным током. При применении постоянного тока различают сварку на прямой и обратной полярностях. В первом случае электрод подключают к отрицательному полюсу (катод), во втором — к положительному (анод).

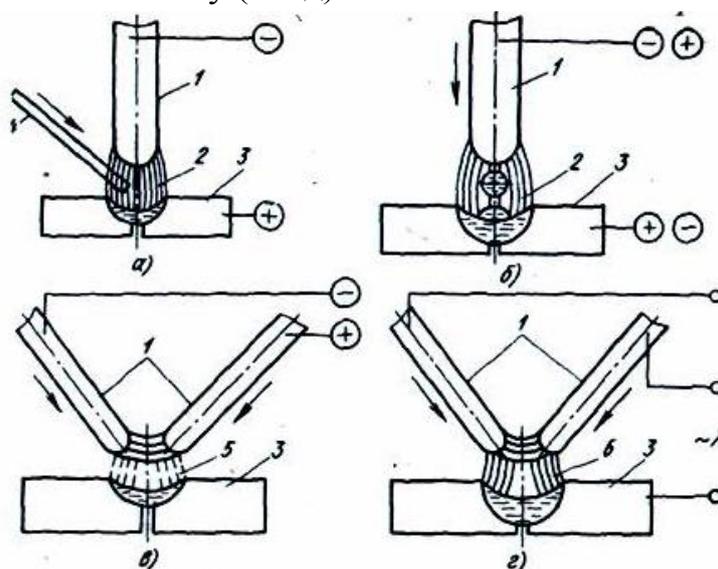


Рис. 37. Схемы дуговой сварки.

Кроме того, различные способы дуговой сварки классифицируют также по способу защиты дуги и расплавленного металла и степени механизации процесса.

Дуга — мощный стабильный разряд электричества в ионизированной атмосфере газов и паров металла. Ионизация дугового промежутка происходит во время зажигания дуги и непрерывно поддерживается в про-

цессе ее горения. Процесс зажигания дуги в большинстве случаев включает три этапа: короткое замыкание электрода на заготовку, отвод электрода на расстояние 3—6 мм и возникновение устойчивого дугового разряда. Короткое замыкание (рис. 38, а) выполняется для разогрева торца электрода 1 и заготовки 2 в зоне контакта с электродом. После отвода электрода (рис. 38, б) с его разогретого торца (катода) под действием электрического поля начинается термоэлектронная эмиссия электронов 3. Столкновение быстро движущихся по направлению к аноду электронов с молекулами газов и паров металла приводит к их ионизации 4. По мере разогрева столба дуги и повышения кинетической энергии атомов и молекул происходит дополнительная ионизация за счет их соударения. Отдельные атомы также ионизируются в результате поглощения энергии, выделяемой при соударении других частиц. В результате дуговой промежуток становится электропроводным и через него начинается разряд электричества. Процесс зажигания дуги заканчивается возникновением устойчивого дугового разряда (рис. 38, в).

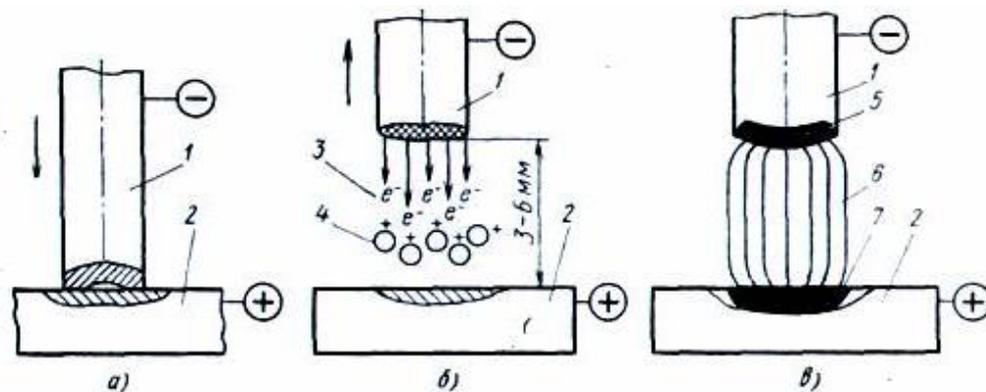


Рис. 38. Схема процесса зажигания дуги.

Обработка металлов резанием – это процесс срезания режущим инструментом с поверхности заготовки слоя металла в виде стружки для получения необходимой геометрической формы, точности размеров, взаиморасположения и шероховатости поверхностей детали. Чтобы срезать с заготовки слой металла, необходимо режущему инструменту и заготовке сообщить относительные движения.

Инструмент и заготовку устанавливают и закрепляют в рабочих органах станков, обеспечивающих эти относительные движения: в шпинделе, на столе, в револьверной головке. Движения рабочих органов станков подразделяют на движения резания, установочные и вспомогательные.

Движения, которые обеспечивают срезание с заготовки слоя металла или вызывают изменение состояния обработанной поверхности заготовки, называют движениями резания. К ним относят главное движение и движение подачи.

Для любого процесса резания можно составить схему обработки. На схеме условно изображают обрабатываемую заготовку, ее установку и закрепление на станке, закрепление и положение инструмента относительно заготовки, а также движения резания (рис. 39). Инструмент показывают в положении, соответствующем окончанию обработки поверхности заготовки. Обработанную поверхность на схеме выделяют другим цветом или утолщенными линиями. На схемах обработки показывают характер движений резания и их технологическое назначение, используя условные обозначения. Существуют подачи: продольная s_{np} , поперечная s_n , вертикальная s_v , круговая $s_{кр}$, окружная s_o и др. В процессе резания на заготовке различают обрабатываемую поверхность 1, обработанную поверхность 3 и поверхность резания 2 (рис. 39, а).

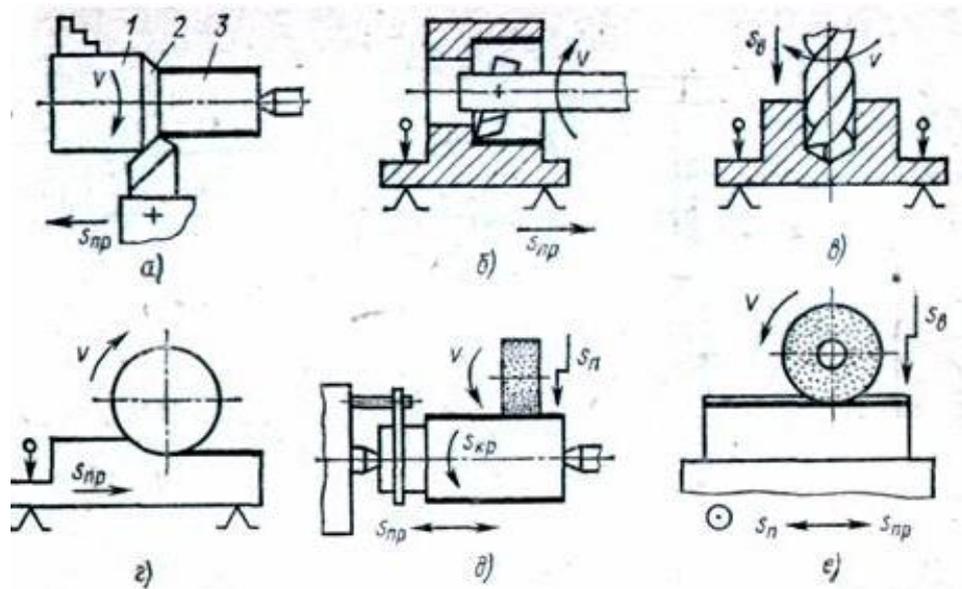


Рис. 39. Схемы обработки заготовок:

а – точение; б – растачивание; в – сверление; г – фрезерование; д – шлифование на круглошлифовальном станке; е – шлифование на плоскошлифовальном станке

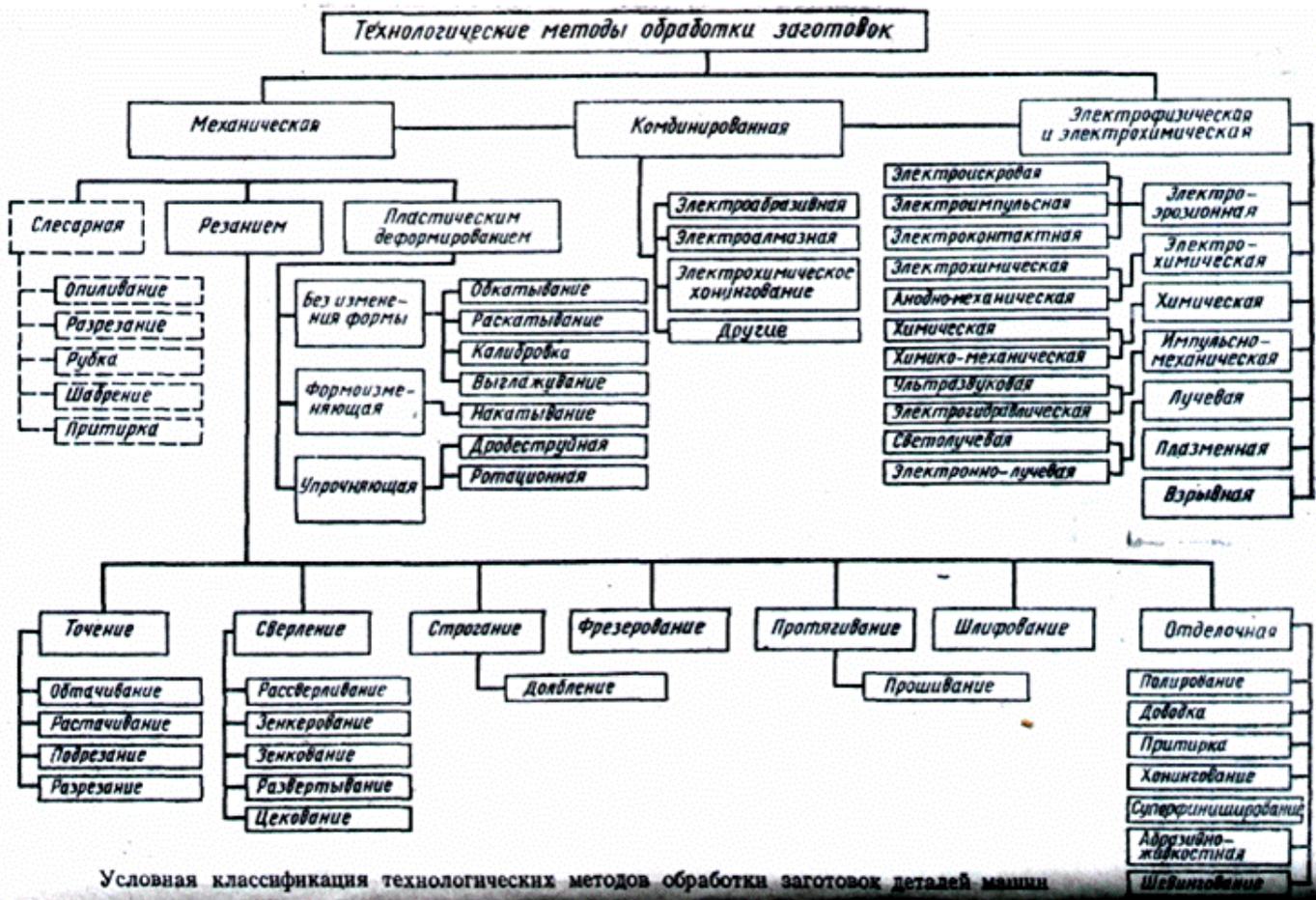


Рис. 40. Условная классификация технологических методов заготовок деталей машин

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

При выборе металлов и сплавов необходимо учитывать механические, технологические, физические, химические и служебные (эксплуатационные) свойства.

Известные способы термической обработки позволяет перераспределить противоположные механические свойства, оставляя материал на определенном «уровне прочности». Термическая обработка повышает работоспособность металлического материала, в определенных силовых и температурных условиях, но обычно неспособна повышать одновременно прочность и пластичность. Это объясняется тем, что прочность металла определяется, главным образом, сопротивлением движению дислокаций. А оно, как известно, находится в прямой зависимости от механизмов торможения дислокаций (тормоз порогов, тормоз замков, облака Коттрелла, тормоз дисперсионных частиц, напряжения третьего рода и механизм Пет-

ча). Способность же дислокаций свободно перемещаться и составляет в основном сущность пластичности на субмикроскопическом уровне металла (типа зерен феррита в ферритно-перлитной структуре) повышает прочность, как, например, в сорбите, но исключает «пластические шарниры». Закалка вызывает рост напряжений третьего рода, а отпуск на троостит или сорбит ввиду дисперсности структуры приводит в действие механизм дисперсионного твердения. Вместе закалка с отпуском повышают однородность, но пластичность металла невысока, так как в его структуре отсутствует свободный феррит. Отжиг и нормализация дают гетерогенную перлитно-ферритную структуру, но зерна при этом расположены хаотично (хотя и равномерно), что и дает усреднение, «посредственные» свойства. Видно, что при этом невозможно одновременно достигнуть повышения и прочности, и пластичности. А именно такое комплексное повышение характеристик прочности и пластичности наиболее эффективно для обеспечения надежной работы конструкционного материала, а следовательно, и самого изделия.

Другим методом улучшения механических свойств деталей является химико-термическая обработка. Но у этого метода, основанного на диффузионном насыщении обрабатываемого материала легирующими элементами, есть свои недостатки и ограничения. Во-первых, химико-термическая обработка дает только поверхностное упрочнение, и, во-вторых, достигаемое увеличение значений прочности происходит при снижении пластичности и вязкости упрочненного слоя по тем же причинам, что и при закалке.

Проблема радикального повышения надежности на обычных путях развития упрочняющей обработки представляется неразрешимой. В работе над этой проблемой можно, конечно, искать резервы увеличения эффективности термической и химико-термической обработок, устранять недостатки известных технологий. Но эти исследования не вносят качественных изменений, а лишь совершенствуют существующие технологии, ослабляя отрицательные проявления. Этот путь мало эффективен.

В таких условиях важен поиск нетрадиционных решений.

Одна из главных задач машиностроения – дальнейшее развитие, совершенствование и разработка новых технологических методов обработки заготовок деталей машин, применение новых конструкционных материалов и повышение качества обработки деталей. Особенно большое внимание уделяется чистовым и отделочным технологическим методам обработки, объем которых в общей трудоемкости обработки деталей постоянно

возрастает. Наряду с механической обработкой резанием применяют методы обработки пластическим деформированием, с использованием химической, электрической, световой, лучевой и других видов энергий. Весьма прогрессивны комбинированные методы обработки (рис. 39).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Адаскин, Анатолий Матвеевич.** Материаловедение в машиностроении: учебник для бакалавров / А.М. Адаскин, Ю.С. Седов, А.К. Онегина, В.Н. Климов. – Москва: Издательство Юрайт, 2013. – 535 с.: ил. – (Серия: Бакалавр. Углубленный курс). – Библиогр.: с. 533-535. – ISBN 978-5-9916-2867-9
2. **Волков, Георгий Михайлович.** Материаловедение: учебник для технических вузов по немашиностроительным направлениям и специальностям / Г. М. Волков, В. М. Зуев. – Москва: Академия, 2008. – 398 с.: ил. – (Высшее профессиональное образование, Технические специальности). – Библиогр.: с. 394.— ISBN 978-5-7695-4248-0.
3. **Гелин, Феликс Давыдович.** Металлические материалы: Справочник. Минск: Высшая школа, 1987. – 368 с. – Библиогр.: с. 361. – Предм. указ.: с. 362-366.
4. **Геллер, Юлий Александрович.** Материаловедение: учебное пособие для вузов/ Ю. А. Геллер, А. Г. Рахштадт; под ред. А. Г. Рахштадта. – Изд. 6-е, перераб. и доп. – Москва : Металлургия, 1989. – 456 с.: ил., табл. – Библиогр.: с. 452. – Предм. указ.: с. 453-455. – ISBN 5-229-00228-X.
5. **Гуляев, Александр Павлович.** Металловедение: учебник для вузов / А. П. Гуляев. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва: Металлургия, 1986. – 542 с.: ил., табл. – Библиогр. в конце гл. – Предм. указ.: с. 538-542.
6. **Дриц, Михаил Ефремович.** Технология конструкционных материалов и материаловедение: учебник для немашиностроительных специальностей вузов/ М. Е. Дриц, М. А. Москалев. – Москва : Высшая школа, 1990. – 447 с. : ил. – Библиогр.: с. 434-435. – Предм. указ.: с. 436-440. – ISBN 5-06-000144-X.
7. **Журавлев, Виталий Никанорович.** Машиностроительные стали: справочник/ В. Н. Журавлев, О. И. Николаева. – 4-е изд., перераб. и

доп. – Москва: Машиностроение, 1992. – 480 с.: ил., табл. – Библиогр.: с. 470-474. – ISBN 5-217-01306-0.

8. **Золоторевский, Вадим Семенович.** Механические свойства металлов: учебник для вузов по специальности "Металловедение, оборудование и технология термической обработки металлов"/ В. С. Золоторевский. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва: Металлургия, 1983. – 350 с.: ил., табл. – Библиогр.: с. 347. – Предм. указ.: с. 348-350.

9. **Иванов, Генрих Павлович.** Надежность материала в технических расчетах/ Г.П. Иванов, А.А. Худошин, В.С. Котельников, Ю.В. Кадушкин/ Под ред. Д.В. Бушенина. – Владимир: Издательство «Посад», 2002. – 128 с.: ил., табл. – Библиогр.: с. 124-125.

10. **Колачев, Борис Александрович.** Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов : учебное пособие для вузов по специальности " Металловедение и технология термической обработки металлов"/ Б. А. Колачев, В. А. Ливанов, В. И. Елагин. – Изд. 3-е, испр. и доп. – Москва: МИСИС, 2001. – 414 с.: ил., табл. – Библиогр.: с. 412-413. – ISBN 5-8763-027-8

11. Композиционные материалы : справочник/ В. В. Васильев [и др.]; под общ. ред. В. В. Васильева; Ю. М. Тарнопольского. – Москва: Машиностроение, 1990. – 510 с.: ил., табл. – Библиогр. в конце гл. – Предм. указ.: с. 502-510. – ISBN 5-217-01113-0.

12. Конструкционные материалы: справочник/ Б. Н. Арзамасов [и др.]; под ред. Б. Н. Арзамасова.— Москва: Машиностроение, 1990.— 687 с.: ил., табл. — (Основы проектирования машин).— Библиогр. в конце гл. — Предм. указ.: с. 683-687 .— ISBN 5-217-01112-2.

13. **Лахтин, Юрий Михайлович.** Материаловедение: учебник для вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1990. – 528 с.: ил. – (Для вузов). – Библиогр.: с. 520. – Предм. указ.: с. 521-523. – ISBN 5-217-00858-X.

14. **Лейкин, Абрам Ефимович.** Материаловедение. Учебник для для машиностроительных специальностей вузов/ А.Е. Лейкин, Б.И.Родин. – М.: Высшая школа, 1971. – 416 с.: ил. – Библиогр.: с.409.

15. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учебное пособие для вузов по направлению "Электротехника, электромеханика и электротехнологии"/ А. В. Шишкин [и др.]; под ред. В. С. Черденченко. – 2-е изд., стер. – Москва: Омега-Л, 2006. – 752 с. : ил., табл. –

(Высшее техническое образование). – Библиогр.: с. 719-720. – Предм. указ.: с. 721-742. – ISBN 5-365-00041-2.

16. **Материаловедение: учебник для вузов/ Б. Н. Арзамасов [и др.]; под ред. Б. Н. Арзамасова. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (МГТУ), 2001. – 646 с., [1] л. портр.: ил., табл. – (Учебник для технических вузов). – Библиогр.: с. 630-631. – Предм. указ.: с. 632-637. – ISBN 5-7038-1860-5.**

17. **Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учеб. пособие для вузов / Под ред. В.С. Чередниченко. – 2-е изд., перераб. – М.: Омега-Л, 2006. – 752 с. – ISBN 5-365-00041-2**

18. **Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебник для вузов по направлению "Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств" и "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств"/ В. Б. Арзамасов [и др.]; под ред. В. Б. Арзамасова, А. А. Черепахина. – 2-е изд., стер. – Москва: Академия, 2009. – 447 с. : ил., табл. – (Высшее профессиональное образование, Машиностроение). – Библиогр.: с. 442-443. – ISBN 978-5-7695-6499-4.**

19. **Материаловедение и технология металлов: учебник для вузов / Г. П. Фетисов [и др.]; под ред. Г. П. Фетисова. – Изд. 4-е, испр. и доп. – Москва: Высшая школа, 2006. – 862 с. – Авт. указаны на обороте тит. л. – Библиогр.: с. 849-854. – ISBN 5-06-004418-1.**

20. **Материалы в машиностроении: выбор и применение: справочник в 5 т. / под ред. И. В. Кудрявцева.— Москва: Машиностроение, 1967. – Т. 1: Цветные металлы и сплавы / И. А. Алексахин [и др.]; под ред. Л. П. Лужникова. – 1967. – 304 с. : ил. – Библиогр. в конце гл. – Предм. указ.: с. 292-304.**

21. **Мозберг, Рудольф Карлович.** **Материаловедение: учебное пособие для вузов / Р. К. Мозберг. – Изд. 2-е, перераб. – Москва: Высшая школа, 1991. – 448 с.: ил. – ISBN 5-06-001909-8.**

22. **Пикунов, Михаил Владимирович.** **Металловедение/ М.В.Пикунов, А.И. Десипри. – М.: Металлургия, 1980. – 256 с. – Библиогр.: с. 250-251. – Предм. указ.: с. 252-254.**

23. **Плошкин, Всеволод Викторович.** **Материаловедение: учебное пособие/ В.В. Плошкин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство**

Юрайт, 2011. – 463 с. – Серия: Основы наук. – Библиогр.: с. 496. – ISBN 978-5-9916-1222-7

24. **Ржевская, Светлана Владимировна.** Материаловедение: учебник для вузов в области техники и технологии/ С. В. Ржевская. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – Москва: Логос, 2006. – 421 с.: ил. – Библиогр.: с. 414-415. – Алф. указ.: с. 406-413. – ISBN 5-98704-179-X.

25. **Рогов, Владимир Александрович.** Современные машиностроительные материалы и заготовки: учебное пособие для вузов по направлениям "Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств", "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств"/ В. А. Рогов, Г. Г. Позняк. – Москва: Академия, 2008 . – 330 с.: ил. – (Высшее профессиональное образование, Машиностроение). – Библиогр.: с. 324-325. – ISBN 978-5-7695-4254-1.

26. **Рощин, Василий Ефимович.** Электрометаллургия и металлургия стали: учебник/ В.Е. Рощин, А.В. Рощин.– 4-е изд., перераб. и доп.– Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 572 с. – Библиогр.: с.571-572. – ISBN 978-5-696-04354-8

27. **Рыжонков, Дмитрий Иванович.** Наноматериалы: учебное пособие / Д. И. Рыжонков, В. В. Лёвина, Э.Л. Дзидзигури.— Москва : Бинوم. Лаборатория знаний, 2008 .— 365 с.: ил. — (Нанотехнология).— Библиогр.: с. 363 .— ISBN 978-5-94774-724-9.

28. **Сильман, Григорий Ильич.** Материаловедение: учеб. пособие для вузов/ Г.И. Сильман. – Москва: Издательский центр «Академия», 2008. – 336 с. – Библиогр.: с. 330-331. – ISBN 978-5-7695-4255-8

29. **Солнцев, Юрий Порфирьевич.** Материаловедение: учебник для вузов по металлургическим, машиностроительным и общетехническим специальностям/ Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин; под ред. Ю. П. Солнцева. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2004. – 735 с.: ил., табл.,схемы. – (Федеральная целевая программа "Культура России") (Учебник для вузов). – Библиогр.: с. 733 -735. – ISBN 5-93808-075-4.

30. **Технология конструкционных материалов/ А.М. Дальский, И.А. Арутюнова, Т.М. Барсукова и др.;** Под общ. ред. А.М. Дальского.- 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение,1985. – 448 с.

31. **Химико-термическая обработка металлов и сплавов: справочник / Г. В. Борисенок [и др.]; под ред. Л. С. Ляховича.** – Москва: Металлургия, 1981. – 424 с : ил. – Библиогр.: с. 404-419. – Предм. указ.: с. 420-422.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ЛЕКЦИЯ 1	5
ЛЕКЦИЯ 2	15
ЛЕКЦИЯ 3	25
ЛЕКЦИЯ 4	32
ЛЕКЦИЯ 5	41
ЛЕКЦИЯ 6	50
ЛЕКЦИЯ 7	58
ЛЕКЦИЯ 8	67
ЛЕКЦИЯ 9	87
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	96
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	98