

**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

**ХИМИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**  
(часть II. Материаловедение)

**Курс лекций**

по дисциплине «Химия и материаловедение (часть II. Материаловедение)»  
для студентов ВлГУ, обучающихся по направлению 222000 «Инноватика»  
(сокращенная форма обучения)

Владимир – 2013 г.

**Курс лекций** по дисциплине «Химия и материаловедение (часть II. Материаловедение) для студентов ВлГУ, обучающихся по направлению 222000 «Инноватика» (сокращенная форма обучения)/ Владим. гос. ун-т; Сост.: Л.В.Картонова. Владимир. 2013. - 91 с.

Содержит курс лекций по дисциплине «Материаловедение». Разработано для студентов ВлГУ, обучающихся по направлению 222000 «Инноватика» (сокращенная форма обучения). Могут быть использованы студентами технических направлений подготовки очной и заочной формы обучения

Библиогр.: 22 назв.

## ВВЕДЕНИЕ

Ускорение развития машиностроения во многом зависит от успехов в создании и использовании эффективных и ресурсосберегающих материалов и технологий. Поэтому выпускники должны обладать достаточными знаниями для рационального выбора материала, метода его упрочнения и снижения металлоемкости изделия при одновременном достижении наиболее высокой технико-экономической эффективности. Это основная задача курса "Материаловедение".

Совершенствование производства, выпуск современных машиностроительных конструкций, машин невозможны без дальнейшего развития производства металлических сплавов, которые в настоящее время являются основными материалами машиностроения. В зависимости от назначения к сплавам предъявляются различные требования. Получение тех или иных свойств определяется внутренним строением сплавов. В свою очередь строение зависит от характера предварительной обработки. Поэтому между всеми характеристиками существуют определенные связи: между составом и строением и между строением и свойствами.

**Целью дисциплины "Химия и материаловедение (Часть II. материаловедение)"** является формирование знаний в области физических основ общего материаловедения, изучение современных конструкционных материалов и их свойств, технологии получения деталей из металлических, порошковых и композиционных материалов.

В результате освоения данной дисциплины у студентов формируются основные общекультурные и профессиональные компетенции, отвечающие требованиям ФГОС по направлению 222000 «Инноватика» к результатам освоения ООП ВПО.

Таблица 1. Результаты обучения (компетенции) выпускника ООП

Код	Результат обучения (компетенция) выпускника ООП
1	2
ОК-4	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь
ОК-6	Способность к работе в коллективе, способность находить организационно-управленческие решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность
ОК-7	Способность использовать законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности
ОК-8	Способность применять математический аппарат, методы оптимизации, теории вероятностей, математической статистики, системного анализа для принятия решений

1	2
ОК-13	Способность к письменной и устной деловой (профессиональной) коммуникации на русском языке
ОК-16	Способность собирать, обобщать, обрабатывать и интерпретировать информацию, необходимую для формирования суждений по соответствующим социальным, научным и этическим проблемам
ПК-4	Способность обосновывать принятие технического решения при разработке проекта, выбирать технические средства и технологии, в том числе с учетом экологических последствий их применения
ПК-13	Способность спланировать необходимый эксперимент, получить адекватную модель и исследовать ее
ПК-14	Способность готовить презентации, научно-технические отчеты по результатам выполненной работы, оформлять результаты исследований в виде статей и докладов
ПК-16	Способность использовать информационные технологии и инструментальные средства при разработке проектов

Согласно ФГОС ВПО направления 222000 «Инноватика» (квалификация (степень) бакалавр) «Химия и материаловедение» - дисциплина базовой части математического и естественнонаучного цикла Б.2 ООП ВПО.

Вторую часть данной дисциплины студенты изучают во 2-м семестре.

Для успешного усвоения студентами курса "Химия и материаловедение" необходимо знание основных курсов высшей математики, химии, физики. 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 математического и естественнонаучного цикла Б.2: технологической механики и нанотехнологий в машиностроении; а также дисциплин профессионального цикла Б.3: механики и технологии, перспектив развития машиностроения и др.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

**знать:** основные современные материалы и их физические свойства, технологии получения деталей из металлических, порошковых и композиционных материалов (ОК-4, 13, 16; ПК-4, 14);

**уметь:** обобщать и анализировать информацию; анализировать фазовые превращения при нагревании и охлаждении сплавов, пользуясь диаграммами состояния двойных систем

(ОК-4, 7, 16); работать на световом микроскопе; выявлять на шлифах типичные структурные составляющие; проводить металлографический анализ промышленных материалов; определять твердость и механические свойства при статических и динамических испытаниях; анализировать результаты этих испытаний для сравнительной оценки сплавов и неметаллических материалов (ОК-8, 16; ПК-13); назначать соответствующую обработку для получения заданных структур и свойств обеспечивающих надежность продукции (ПК-4);

**владеть:** практическими навыками исследования материалов; навыками выбора материала и назначения их обработки (ОК-6; ПК-13, 16).

Объем лекционной нагрузки составляет 33,3 % от общего объема аудиторной нагрузки.

Таблица 3. Распределение лекционной нагрузки по формам проведения

№ п/п	Раздел дисциплины	Объем нагрузки (в часах)	
		Лекции в традиционной форме	Лекции-консультации в активной форме
<b>Модуль I</b>			
1	Раздел 1. Введение. Классификация материалов. Кристаллическое строение металлов.	2	
2	Раздел 2. Критерии оценки материалов.		1
3	Раздел 3. Пластическая деформация и рекристаллизация металлов.		0,5
4	Раздел 4. Законы кристаллизации металлов.		0,5
5	Раздел 5. Основы теории сплавов.	1,5	0,5
<b>Модуль II</b>			
6	Раздел 6. Сплавы на основе железа.	2	4
<b>Модуль III</b>			
7	Раздел 7. Цветные металлы и сплавы.		1
8	Раздел 8. Композиционные материалы.		1
9	Раздел 9. Неметаллические материалы. Наноструктурные материалы.		1
<b>Модуль IV</b>			
10	Раздел 10. Научные основы выбора материалов.		1
11	Раздел 11. Способы получения заготовок.	2	
	Итого	7,5	10,5
<b>Всего лекционной нагрузки</b>		<b>18</b>	

## ЛЕКЦИЯ 1

### Введение. Классификация материалов.

### Кристаллическое строение металлов.

#### План лекции 1

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

Тема 1.1. Значение, цель и задачи курса. Классификация материалов.

Тема 1.2. Кристаллическое строение металлов. Дефекты кристаллов и их влияние на свойства. Теоретическая и реальная прочность.

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

**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:

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

где  $\kappa$  – коэффициент заполнения диаграммы  $\sigma - \varepsilon$ ,

$\sigma_{вр}$  – предел прочности при растяжении,

$\varepsilon$  – относительное удлинение.

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 являются телами кристаллическими. Кристаллическое состояние прежде всего характеризуется определенным, закономерным расположением атомов в пространстве.

Металлы образуют в основном три типа решеток (рис. 1): объемно центрированную кубическую (R, Na, Li, Ti<sub>β</sub>, Fe<sub>α</sub> и др.), гранецентрированную кубическую (Ca<sub>α</sub>, Ce, Ag, Au, Cu, Fe<sub>γ</sub>, Ni и др.) и гексагональную плотноупакованную (Mg, Ti<sub>α</sub>, Zn, Ca<sub>β</sub> и др.).

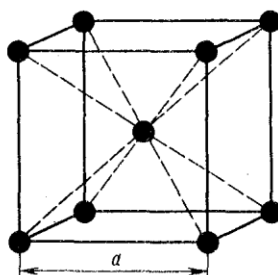
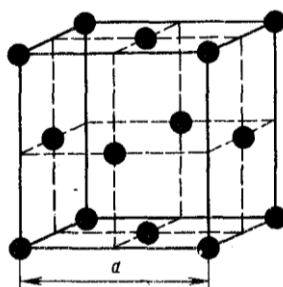


Рис.1. Объемно центрированная кубическая (ОЦК) кристаллическая решетка.

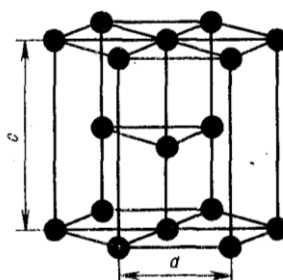
*Объемно центрированная кубическая решетка.* В элементарной ячейке такой решетки девять атомов (восемь – вершинах куба и один – в центре). Каждый угловой атом входит в восемь соседних ячеек, следовательно, на одну ячейку приходится  $8 \cdot 1/8 + 1 = 2$  атома.

*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.



*Рис.2. Гранецентрированная кубическая (ГЦК) кристаллическая решетка.*

*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.



*Рис.3. Гексагональная плотноупакованная (ГПУ) кристаллическая решетка.*



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.4, 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).

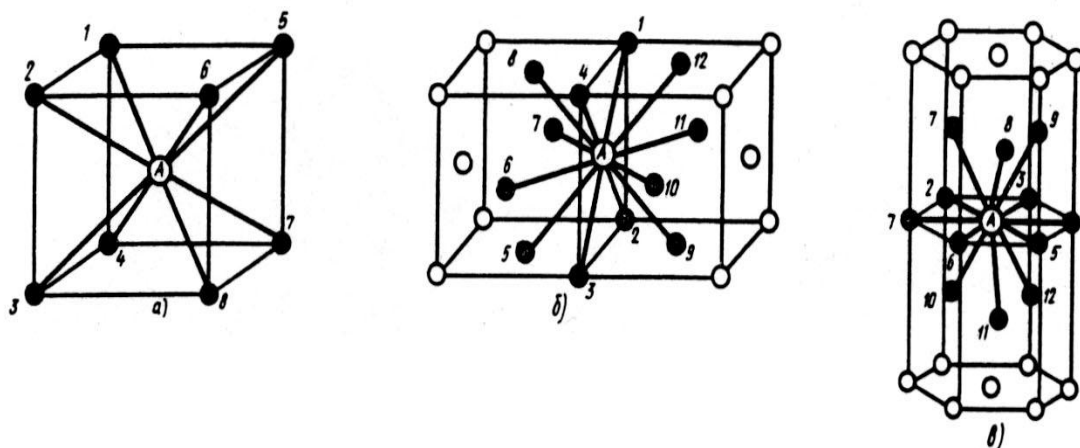


Рис.4 .Координационное число в различных кристаллических решетках для атома А:  
 а - объемно центрированная кубическая (К8);  
 б – гранецентрированная кубическая (К12);  
 в - гексагональная плотноупакованная (Г12).

В гранецентрированной кубической решетке (рис.4, 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.4, 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).

**Анизотропия свойств кристаллов.** Химические, физические и механические свойства каждого кристалла (монокристалла) неодинаковы в различных направлениях, так как неодинакова плотность атомов, встречающихся в этих направлениях. Подобная неодинако-

вость свойств вдоль различных кристаллографических направлений называется анизотропией.

Кристалл – тело анизотропное в отличие от аморфных тел (смола, стекло и др.), свойства которых не зависят от направления.

Реальный металл состоит из большого количества кристаллов, т.е. технические металлы являются поликристаллами. Произвольная ориентированность каждого кристалла приводит к тому, что в любом из направлений располагается приблизительно одинаковое количество различных ориентированных кристаллов. В результате этого получается, что свойства поликристаллического материала одинаковы во всех направлениях (ложная изотропия), несмотря на то, что свойства каждого отдельного кристалла этого тела, зависят от направления.

**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* (образуются в результате перехода атома из узла решетки в междоузлие). Такие дефекты вызывают местное искажение решетки.

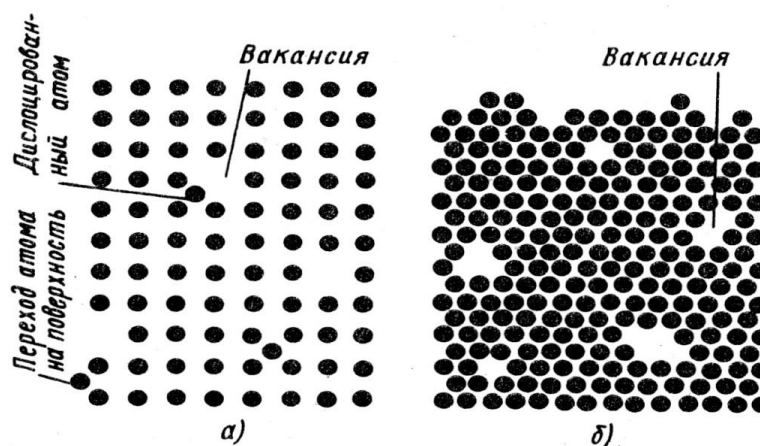


Рис.5. Точечные дефекты кристаллической решетки

Линейные дефекты имеют малые размеры в двух измерениях и большую протяженность в третьем измерении. 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  $\top$ . При закручивании дислокации в спираль образуется винтовая дислокация.

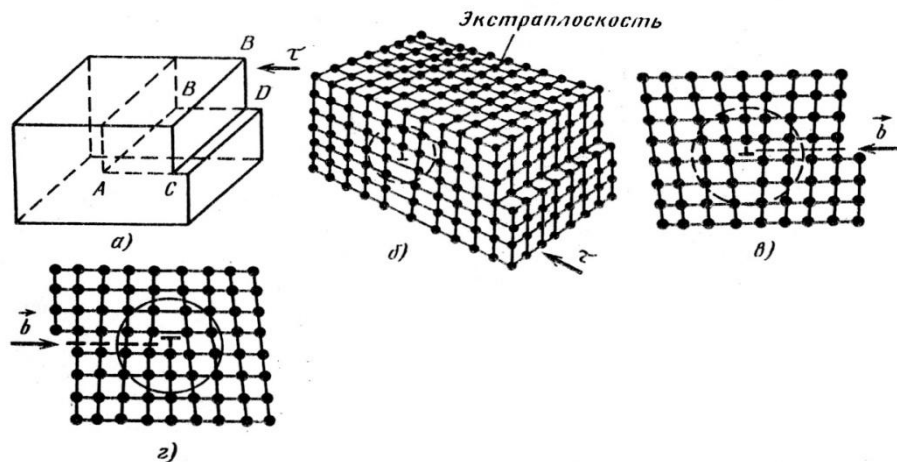


Рис.6. Краевые дислокации ( $\tau$  – вектор сдвига):  
 а – сдвиг, создавший краевую дислокацию;  
 б – пространственная схема краевой дислокации;  
 в, г – схемы расположения атомов у дислокаций

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  $120^\circ$ , 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 зерна в другое дислокация встречает трудно преодолимый барьер – границу зерна. То же происходит и внутри зерна при прохождении через границы блоков. Чем мельче зерна (или блоки), тем чаще дислокации тормозятся границами, тем выше предел текучести металла. Эта зависимость выражается так называемым уравнением Петча:

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

где  $\sigma_T$  – предел текучести;

$\sigma_0$  – 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  $\sigma_0$  охватывает все первые пять механизмов торможения дислокаций, можно развернуть уравнение Петча, придав ему следующий вид:

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

где  $\sigma_{II}$  и  $\sigma_3$  – напряжения, необходимые для преодоления дислокацией порогов и замков соответственно;

$\sigma_K$  – напряжения, необходимые для преодоления дислокацией облаков Коттрелла;

$\sigma_d$  – 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

### Критерии оценки материалов. Пластическая деформация и рекристаллизация металлов. Законы кристаллизации металлов.

#### План лекции 2

(лекция консультация в активной форме)

#### Раздел 2. Критерии оценки материалов.

Тема 2.1. Структура. Микроструктурный анализ. Макроструктурный анализ. Методы обнаружения поверхностных и внутренних дефектов.

Тема 2.2. Механические свойства. Испытания на растяжение. Методы измерения твердости (методы Бринелля, Роквелла, Виккерса, микротвердость, Польди, Шора, Мооса). Определение ударной вязкости металлов и сплавов.

Тема 2.3. Рентгеноструктурное исследование металлов.

#### Раздел 3. Пластическая деформация и рекристаллизация металлов.

Тема 3.1. Влияние наклепа на свойства металлов. Использование наклепа в машиностроении.

Тема 3.2. Рекристаллизационный отжиг. Холодная и горячая обработка металлов давлением.

#### Раздел 4. Законы кристаллизации металлов.

Тема 4.1. Законы кристаллизации металлов. Свободная энергия и энтропия.

Тема 4.2. Управление размером зерна. Строение кристаллического слитка.

### Критерии оценки материалов.

**Методы изучения строения металлов.** Изучение внутреннего строения (структуры) начинается с помощью наиболее простого и широко распространенного метода – световой микроскопии.

Изучение строения металлов и сплавов с помощью металлографического микроскопа (при увеличении в 50-2000 раз) называется *микроскопическим анализом (микроанализом)*.

Задачи микроанализа:

- оценка формы и размеров кристаллических зерен металлов и сплавов;
- определение формы и размеров неметаллических включений – сульфидов, оксидов и др.;
- определение микропороков – микротрещин, раковин, пор и др.;
- анализ изменения микроструктуры сплавов после термической, химико-термической обработки и обработки металлов давлением;

– определение химического состава некоторых структурных составляющих по их характерной форме и окраске после применения избирательных травителей.

Так как металлы – вещества непрозрачные, то микроанализ проводят на специально изготовленных образцах. Для этого из испытуемого материала вырезают образец (микрошлиф) и путем ряда операций (шлифования, полирования, травления) доводят до такого состояния, когда при рассмотрении его в металлографический микроскоп выявляют неметаллические включения, мелкие поры, графит в чугуне (после шлифования и полирования) или микроструктуры (после шлифования, полирования и травления).

Металлографический микроскоп позволяет рассматривать при увеличении непрозрачные тела в отраженном свете. В этом основное отличие металлографического микроскопа от биологического, в котором рассматриваются прозрачные тела в проходящем свете.

Однако оптический микроскоп не позволяет обнаружить кристаллы любого размера. Для изучения более тонких деталей структуры (мельче 0,1 мкм) применяют *методы электронной микроскопии*, основанные на взаимодействии электронов с твердым телом. К таким методам относятся: метод просвечивающей электронной микроскопии и метод растровой электронной микроскопии.

Наиболее простым является изучение в просвечивающем электронном микроскопе тонких пленок (реплик), точно воспроизводящих микрорельеф поверхности изучаемого образца. Реплика создается путем напыления (конденсации) в вакууме паров углерода или других веществ на поверхность изучаемого тела с последующим отделением.

Кроме того, одним из наиболее распространенных методов изучения строения металлов является *рентгеноструктурный анализ*.

Рентгеноструктурный анализ является одним из современных методов исследования атомно-кристаллической структуры материалов рентгеновскими лучами. Наибольшую информацию рентгеноструктурный анализ дает при исследовании кристаллов.

**Механические свойства.** Под *механическими свойствами* понимают характеристики, определяющие поведение металла (или другого материала) под действием приложенных внешних сил. Механические свойства определяются при статических и динамических испытаниях.

По способу приложения нагрузок различают статические испытания на растяжение, сжатие, изгиб, кручение, сдвиг и срез. Наиболее распространены испытания на растяжение (ГОСТ 1497-84).

К механическим свойствам обычно относят прочность, твердость, пластичность и ударную вязкость.

**Прочность** при растяжении определяется критерием, который называется *временным сопротивлением* или *пределом прочности*:

$$\sigma_B = \frac{P_{\max}}{F_0},$$

где  $\sigma$  – предел прочности,  $P_{\max}$  – наибольшая нагрузка, предшествующая разрушению образца,  $F_0$  – площадь поперечного сечения образца до разрушения.

**Пластичность** характеризуется *относительным удлинением*  $\delta$ :

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\%, \text{ и}$$

*относительным сужением*  $\psi$ :

$$\psi = \frac{F_k - F_0}{F_0} \cdot 100\%,$$

где  $l_0$  и  $F_0$  – начальная длина и площадь поперечного сечения образца;  $l_k$  – конечная длина образца;  $F_k$  – площадь поперечного сечения в месте разрыва.

**Твердость** – это 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 пирамида) изготавливается из прочных материалов: закаленной стали, твердого сплава или алмаза.

По характеру воздействия индикатора на поверхность испытуемого материала различают:

- способ вдавливания, понимая под твердостью сопротивление вещества внедрению в него индентора (методы определения твердости по Бринеллю, Виккерсу, Роквеллу и др.);
- способ по отскоку наконечника – шарика, характеризующий упругие свойства материала (метод Шора);
- способ царапания поверхности характеризует сопротивление разрушению путем среза (метод Мооса).

Различают статические, статико-динамические и динамические методы измерения твердости.

Прочность и пластичность при динамических испытаниях оцениваются по **ударной вязкости**.

Под **ударной вязкостью**  $K_C$ , МДж/м<sup>2</sup> понимают работу удара  $K$  (МДж), отнесенную к начальной площади поперечного сечения  $S_0$  (м<sup>2</sup>) образца в месте концентратора:  $K_C = K / S_0$ . Предусматриваются образцы с концентраторами трех видов (ГОСТ 9454-78):  $U$  с радиусом

концентратора  $R = 1$  мм,  $V$  с  $R = 0,25$  мм и углом  $45^\circ$  и  $T$  – усталостная трещина. Соответственно ударная вязкость обозначается КС<sub>У</sub>, КС<sub>В</sub> и КСТ.

Основной критерий ударной вязкости является КС<sub>В</sub>. Она состоит из двух составляющих:

$$КСВ = КС_3 + КС_p,$$

где КС<sub>3</sub> – работа зарождения трещины; КС<sub>р</sub>  $\approx$  КСТ – работа распространения трещины. Чем острее надрез, тем меньше КС<sub>3</sub>. Критерий КСТ является критерием трещиностойкости, оценивающим сопротивление материала распространению трещины.

**Технологические свойства.** К технологическим свойствам относятся литейные свойства, обрабатываемость давлением, свариваемость, обрабатываемость резанием.

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

*Жидкотекучесть* – это способность металлов и сплавов заполнять литейную форму и четко воспроизводить контуры отливки. Она зависит от температурного интервала кристаллизации, вязкости и поверхностного натяжения расплава, температуры заливки и формы, свойств литейной формы и др. Жидкотекучесть определяется по технологическим пробам: прутковой и спиральной. Наибольшей жидкотекучестью обладает серый чугун, наименьшей – магниевые сплавы.

*Усадка* – свойство литейных сплавов уменьшать объем при затвердевании и охлаждении. Различают линейную и объемную усадку, выражаемую в относительных единицах.

Линейная усадка – уменьшение линейных размеров отливки, %:

$$\varepsilon_{лин} = \frac{l_{\phi} - l_{от}}{l_{от}} \cdot 100,$$

где  $l_{\phi}$  и  $l_{от}$  – размеры полости формы и отливки при температуре  $20^\circ\text{C}$ . Она зависит от химического состава сплава, температуры заливки, скорости охлаждения, конструкции отливки и литейной формы.

Объемная усадка – уменьшения объема сплава при его охлаждении в литейной форме при формировании отливки. Объемную усадку определяют соотношением, %:

$$\varepsilon_{об} = \frac{V_{\phi} - V_{от}}{V_{от}} \cdot 100,$$

где  $V_{\phi}$  и  $V_{от}$  – объем полости формы и объем отливки при температуре  $20^\circ\text{C}$ . Объемная усадка приблизительно равна утроенной линейной усадке:

$$\varepsilon_{об} \approx 3 \varepsilon_{лин}.$$



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

*Ликвация* – это неоднородность химического состава по сечению отливки. Различают ликвацию по удельному весу и зональную ликвацию.

***Обрабатываемость давлением*** – это способность металлов и сплавов изменять свою форму и размеры под действием внешних нагрузок как в нагретом, так и в холодном состоянии без разрушения сплошности. Обрабатываемость давлением определяется пластичностью материала.

***Свариваемость*** – свойство металла или сочетания металлов образовывать при установленной технологии сварки соединение, отвечающее установленным требованиям, то есть давать прочное сварное соединение. Она оценивается соответствием свойств шва свойствам основного металла и несклонностью к образованию трещин, пор и шлаковых включений.

***Обрабатываемость резанием*** – это способность металлов и сплавов подвергаться обработке резанием по ряду технологических показателей: скорости резания, силе резания и т.п.

**Физические свойства.** К *физическим свойствам* относятся плотность, электрические, магнитные и тепловые свойства.

Для обозначения показателей физических свойств используются буквы греческого алфавита:

$\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения,  $K^{-1}$ ;

$\gamma$  – удельный вес,  $H/cm^2$ ;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $Вт/(м \cdot K)$ ;

$\rho$  – удельное электрическое сопротивление,  $Ом \cdot м$ .

*Удельная теплоемкость* обозначается латинской буквой  $c$ ,  $Дж/(кг \cdot K)$ .

Удельный вес, как известно, определяется следующим произведением:

$$\gamma = \rho g,$$

где  $\rho$  – плотность,  $г/см^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81 м/с^2$ .

В электротехнической промышленности именно физические свойства определяют возможность применения материалов, от которых может требоваться либо высокая электропроводность, либо высокое электрическое сопротивление.

Именно под воздействием электромагнитного поля ферромагнетики могут намагничиваться и оставаться в намагниченном состоянии, а чтобы размагнитить образец его нужно обработать магнитным полем противоположного знака. Напряженность магнитного поля, необходимого для полного размагничивания намагниченного образца, называют коэрцитивной силой, которую обозначают  $H_c$ .

**Химические свойства.** Под *химическими свойствами* понимают способность металлов и сплавов взаимодействовать с различными агрессивными средами (щелочной, кислотной).

Процесс химического взаимодействия металлических материалов с активными средами называют *коррозией*.

Для оценки сопротивления металлических материалов воздействию химически активных сред используют термин *коррозионная стойкость*.

*Коррозионная стойкость* – это способность металла противостоять электрохимической коррозии, которая развивается при наличии среды на поверхности металла и ее электрохимической неоднородности.

**Эксплуатационными (служебными)** называют свойства материала, которые определяют работоспособность деталей машин, приборов или инструментов, их силовые, скоростные, стойкостные и другие технико-эксплуатационные показатели. К эксплуатационным свойствам относятся хладостойкость, жаростойкость, жаропрочность, антифрикционные свойства, коррозионная стойкость и др.

Под *хладостойкостью* понимают способность материала сохранять достаточную вязкость при низких температурах (от 0 до  $-269^{\circ}\text{C}$ ).

*Жаростойкость* характеризует способность материала противостоять химической коррозии, развивающейся в атмосфере сухих газов при повышенной и высокой температуре.

*Жаропрочность* – это способность материала длительное время сопротивляться деформированию и разрушению при повышенных температурах (свыше  $0,3 t_{пл}$ ).

*Антифрикционные свойства* характеризуют способность металлов и сплавов прирабатываться друг к другу. Антифрикционные свойства могут оцениваться таким критерием как антифрикционность. Антифрикционность – это способность материала обеспечивать низкий коэффициент скольжения и тем самым низкие потери на трение и малую скорость изнашивания сопряженных деталей.

## **Пластическая деформация и рекристаллизация металлов.**

**Влияние деформации на металл.** *Деформация* - это изменение размеров и формы тела под действием приложенных сил. Деформация вызывается действием внешних сил, приложенных к телу, или различными физико-механическими процессами, происходящими в самом теле.

Различают два вида деформации: *упругую* и *пластическую*. Деформация, которая исчезает после снятия нагрузки, называется *упругой*. Деформация, которая остается после сня-

тия нагрузки, называется *пластической*. В процессе пластической деформации атомы кристаллической решетки смещаются на большие расстояния, чем при упругой деформации, причем это смещение становится необратимым, т.е. после снятия нагрузки в результате пластической деформации размеры и форма тела изменяются.

После снятия внешней нагрузки в теле могут остаться внутренние напряжения. Существует следующая классификация внутренних напряжений:

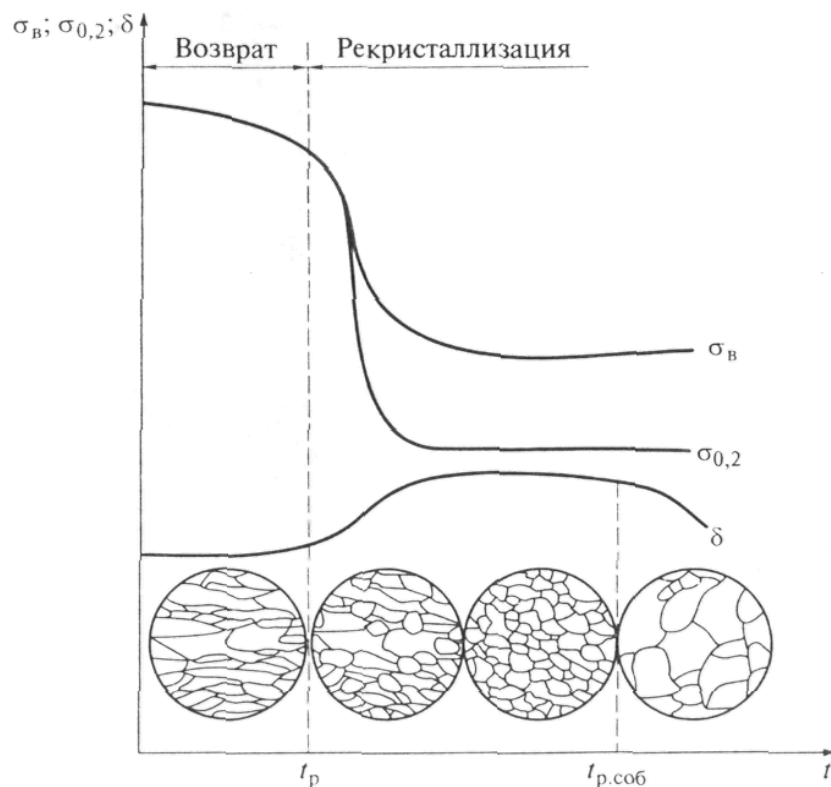
- внутренние напряжения первого рода (макроскопические напряжения, т.е. напряжения, возникающие между крупными частями тела);
- внутренние напряжения второго рода (микроскопические напряжения, т.е. напряжения, возникающие между смежными зернами или внутри зерен);
- внутренние напряжения третьего рода (субмикроскопические напряжения, т.е. напряжения, возникающие внутри объема, охватывающего несколько ячеек кристаллической решетки).

При достаточно высоких напряжениях деформация может завершиться разрушением тела. Под *разрушением* понимается процесс зарождения и развития в металле трещин, приводящих к разделению его на части.

**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 взаимодействие 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.

**Влияние нагрева на структуру и свойства деформированного металла.** 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. Влияние нагрева на механические свойства (предел прочности  $\sigma_{в}$ , предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , относительное удлинение  $\delta$ ) и изменение структуры деформированного металла:  $t_p$  – температура рекристаллизации;  $t_{p,соб}$  – температура собирательной рекристаллизации*

При небольшом нагреве (для железа 300-400<sup>0</sup>С) 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) уменьшает плотность точечных дефектов (вакансий), наблюдается снятие искажений кристаллической решетки, также уменьшается плотность дислокаций в результате их взаимного уничтожения (аннигиляция). В результате твердость и прочность несколько понижается (на 20-30 % по сравнению с исходным состоянием).

Вторая стадии возврата – **полигонизация** (после небольших деформациях при нагреве до  $(0,25-0,3) \cdot T_{пл}$ ). 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  $\alpha$  – 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 – **собираетельная 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*.

## Кристаллизация веществ

**Гомогенная (самопроизвольная) кристаллизация.** Переход металла из жидкого состояния в твердое называется кристаллизацией. При этом образуются кристаллы.

При сближении атомов (конденсация пара) происходит перераспределение зарядов и силы притяжения начинают преобладать над силами отталкивания, так как одноименные заряды стремятся удалиться, а разноименные - сблизиться. Поэтому атомы стремятся притянуться друг к другу и занять положение наиболее плотной упаковки, которое нарушается в жидкостях их соударениями в процессе тепловых колебаний. Местами на мгновение возникают упорядоченные группы атомов (ближний порядок), которые тут же разрушаются.

Дальнейшее охлаждение жидкости ослабляет соударение атомов и силам притяжения удается упаковать их наиболее плотным образом. Возникает дальний порядок – кристаллическое состояние. Металл уплотняется, запасенная в нем свободная энергия  $F$  снижается, т.е. согласно второму началу термодинамики, он переходит в более устойчивое состояние.

Математически это выражается так:

$$F = U - TS,$$

где  $F$  – свободная энергия,  $U$  – внутренняя энергия системы,  $S$  – энтропия (энтропия пропорциональна вероятности  $S = k \cdot \ln P$ ,  $k$  – постоянная Больцмана,  $P$  - вероятность состояния),  $T$  – абсолютная температура.

При температуре  $T_1$  свободная энергия в твердой фазе меньше (рис.5), чем в жидкой, а следовательно, выгоднее твердая фаза, и металл кристаллизуется. При  $T_2$  – наоборот, идет плавление. При  $T_{кр}$  оба процесса уравновешены. Для кристаллизации необходимо переохлаждение  $\Delta T_1$ , а для плавления - перегрев  $\Delta T_2$ .

Температура  $T_{кр}$  и есть *равновесная* или *теоретическая температура кристаллизации*.

При охлаждении расплава теплота  $Q_1$  рассеивается в воздух. При  $T_1$  возникает некоторое переохлаждение  $\Delta T_1$  и начинается кристаллизация. При этом выделяется некоторое количество теплоты кристаллизации  $Q_2$ . Если  $Q_2 < Q_1$ , то охлаждение продолжается,  $\Delta T$  возрастает, кристаллизация ускоряется до тех пор, пока  $Q_2$  не станет равным  $Q_1$ ; т.е. пока отвод тепла компенсируется выделяющейся при кристаллизации *скрытой теплоты кристаллизации*. И на кривой охлаждения появится горизонтальная площадка, Чем быстрее ведут охлаждение, тем интенсивнее идет кристаллизация и тем ниже площадка и больше переохлаждение ( $\Delta T_3 > \Delta T_4$ ). Температура, при которой практически начинается кристаллизация, может быть названа *фактической температурой кристаллизации*.

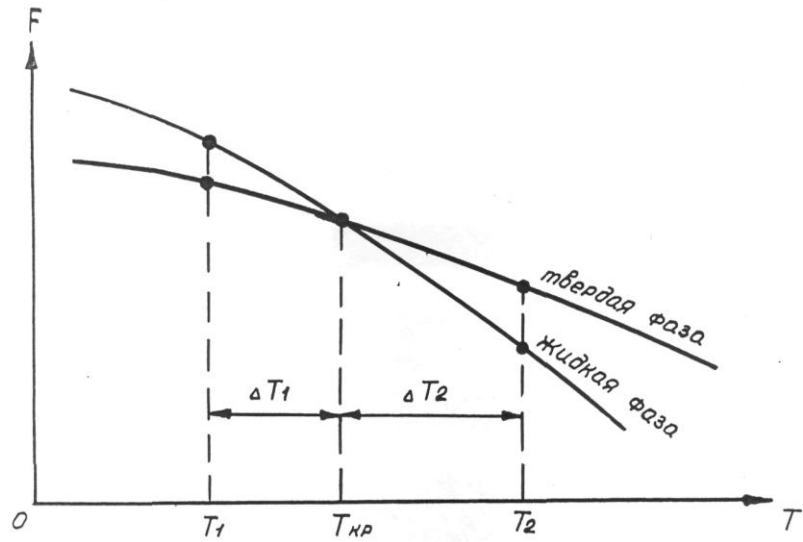


Рис.8. Изменение энергии Гиббса  $F$  (свободной энергии) металла в жидком и твердом состояниях в зависимости от температуры ( $T_{кр}$  – температура, при которой происходит кристаллизация)

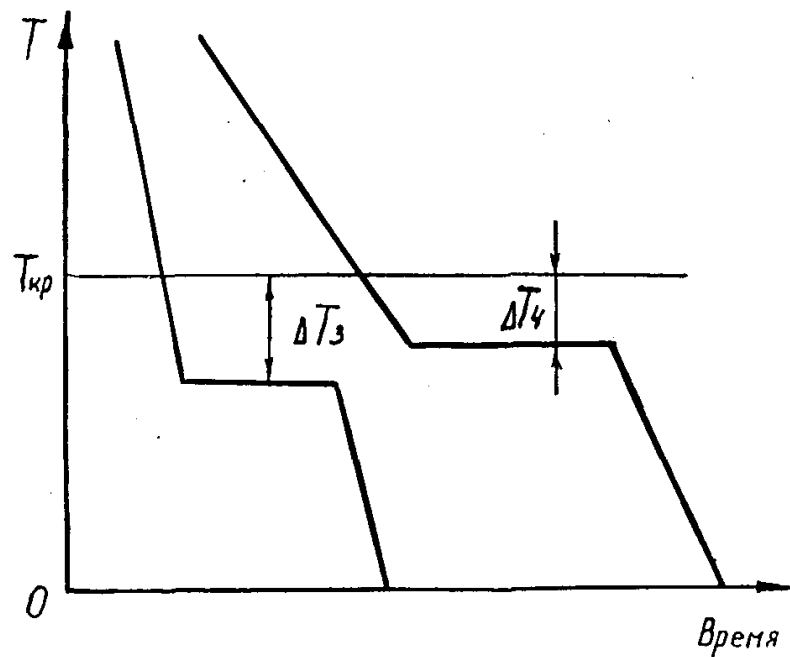
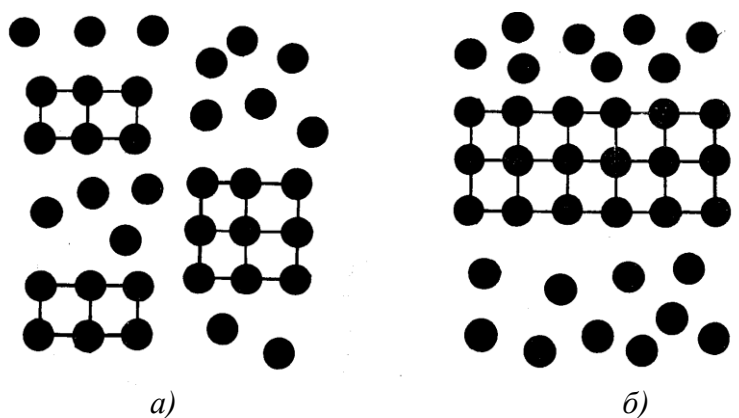


Рис.9. Кривые охлаждения

Разность между теоретической и практической температурами кристаллизации называется *величиной* или *степенью переохлаждения*.

Процесс кристаллизации состоит из двух элементарных процессов. Первый процесс заключается в зарождении центров кристаллизации - зародышей, второй процесс состоит в

росте кристаллов из этих центров (рис.10). Возникающие мельчайшие кристаллы неустойчивы и сразу же распадаются, чтобы возникнуть в другом месте. Крупные – устойчивы и могут расти даже при небольшом переохлаждении.



*Рис.10. Процесс кристаллизации:  
а) зарождение центров кристаллизации;  
б) рост кристаллов*

По мере развития процесса кристаллизации в нем участвуют все большее и большее число кристаллов. Поэтому процесс вначале ускоряется, пока в какой-то момент взаимное столкновение растущих кристаллов не начинает заметно препятствовать их росту; рост замедляется, тем более что и жидкости, в которой образуются новые кристаллы, становится все меньше. Пока кристалл окружен жидкостью, он часто имеет правильную форму, но при столкновении и срастании кристаллов их правильная форма нарушается, внешняя форма кристалла оказывается зависимой от условий соприкосновения растущих кристаллов. Скорость всего процесса кристаллизации количественно определяется двумя величинами: скоростью зарождения центров кристаллизации (ч.ц.,  $\text{мм}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ ) и скоростью роста кристаллов (с.р., мм/мин или мм/с).

Графически изменения величин ч.ц. и с.р. в зависимости от переохлаждения представлены на рис. 11. При теоретической температуре кристаллизации значения ч.ц. и с.р. равны нулю и процесс кристаллизации идти не может. Эти зависимости выражаются кривыми с максимумом. С увеличением переохлаждения значения ч.ц. и с.р. возрастают, достигают максимума и затем понижаются; при больших величинах переохлаждения практически падают до нуля.



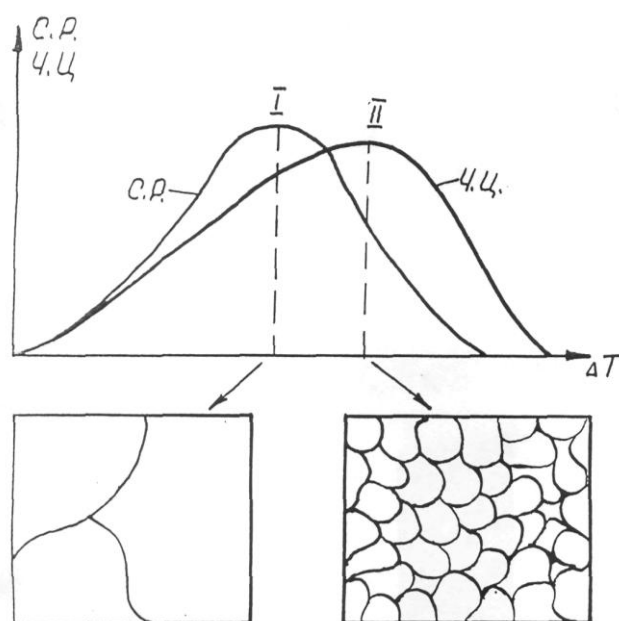


Рис. 11. Скорость зарождения центров кристаллизации (ч.ц.) и скорость роста кристаллов (с.р.) в зависимости от степени переохлаждения

Поэтому для быстрого зарождения большого числа мельчайших центров нужно переохлаждение большее, чем для быстрого роста уже имеющихся кристаллов. Максимум на кривой ч.ц. сдвинут вправо по сравнению с максимумом на кривой скорости роста.

Таким образом, при медленном охлаждении возникает малое переохлаждение, следовательно — мало число центров, но достаточно быстрый рост кристаллов (сплав I, рис.11), ведущий к крупному зерну. А при быстром охлаждении — большое переохлаждение и большое число центров, поэтому кристаллы растут медленно, и образуется мелкозернистая структура (сплав II, рис.11). Следовательно, процессом кристаллизации можно управлять.

**Гетерогенное образование зародышей.** Самопроизвольное образование зародышей может происходить только в высокочистом жидком металле при больших степенях переохлаждения. Чаще источником образования зародышей являются всевозможные твердые частицы, например, неметаллические включения и т.п., которые всегда присутствуют в расплаве. Чем больше примесей, тем больше центров кристаллизации, тем мельче будет зерно. Такое образование зародышей называется *гетерогенным*.

*Модифицирование* — использование специально вводимых в жидкий металл примесей (модификаторов) для получения мелкого зерна. Эти примеси, практически не изменяя химического состава сплава, вызывают при кристаллизации измельчение зерна и в итоге улучшение механических свойств. При литье слитков в фасонных отливках модифицирование чаще

проводят введением в расплав добавок, которые образуют тугоплавкие соединения, такие как нитриды и оксиды, кристаллизующиеся в первую очередь. Выделяясь в виде мельчайших частиц, эти соединения служат зародышами при затвердевании кристаллов – *модификаторы I рода*. В качестве модификаторов при модифицировании стали применяют алюминий, ванадий, титан; алюминиевых сплавов – ванадий, титан, цирконий. Иногда используют растворимые в жидком металле *модификаторы II рода*: для стали используют редкоземельные элементы; для алюминиевых сплавов – литий, натрий, калий. Данные модификаторы, адсорбирующиеся на кристаллическом зародыше, снимают межфазовое поверхностное натяжение и затрудняют рост зерен.

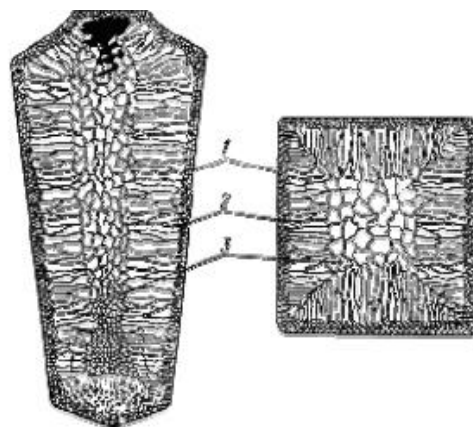
**Форма кристаллических образований.** Реально протекающий процесс кристаллизации усложняется действием различных факторов, в столь сильной степени влияющих на процесс, что роль степени переохлаждения может оказаться второстепенной. При кристаллизации из жидкого состояния для скорости течения процесса и для формы образующихся кристаллов первостепенное значение приобретают такие факторы, как скорость и направление отвода тепла, наличие не растворившихся частиц и др. В направлении отвода тепла кристалл растет быстрее, чем в другом направлении.

Кристалл может расти и в боковом направлении. В результате такого роста образуется древовидный кристалл, который называют *дендритом* (рис.12).



*Рис.12. Схема древовидного кристалла (Д.К. Чернов)*

**Строение литого слитка.** Структура литого слитка состоит из трех основных зон. Наружная *мелкозернистая корка* (зона мелкозернистых кристаллов 1, рис. 13) состоит из дезориентированных мелких кристаллов – дендритов. При соприкосновении жидкого металла со стенками формы в результате резкого перепада температуры и явления переохлаждения происходит образование большого количества центров кристаллизации, в результате зона имеет мелкозернистое строение.



*Рис.13. Строение литого слитка:  
1 – зона мелкозернистых кристаллов,  
2 – зона столбчатых кристаллов,  
3 – зона равноосных кристаллов.*

После образования корки условия теплоотвода меняются. В направлении обратном направлению отвода тепла нормально к поверхности образуется *зона столбчатых кристаллов 2*. Данная зона является более плотной и содержит меньше раковин и пузырей. Однако места стыка таких кристаллов имеют низкую прочность.

*Зона равноосных кристаллов 3* образуется в центре слитка при отсутствии определенной направленности отвода тепла.

## ЛЕКЦИЯ 3

### Основы теории сплавов.

#### *План лекции 3*

*Раздел 5. Основы теории сплавов.*

Тема 5.1. Виды сплавов. Правило фаз. Построение диаграмм состояния.

Тема 5.2. Диаграммы состояния двойных сплавов. Правило отрезков.

Тема 5.3. Правило Курнакова. Связь между типом диаграммы состояния двойных сплавов и свойствами сплавов.

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:

$$C = K + П - Ф$$

где С – 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);

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

$\Phi$  – 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  $\alpha$  - раствора.

*Задача 1:* Построить кривую охладения для чистого металла  $A$  ( $K=1$ ).

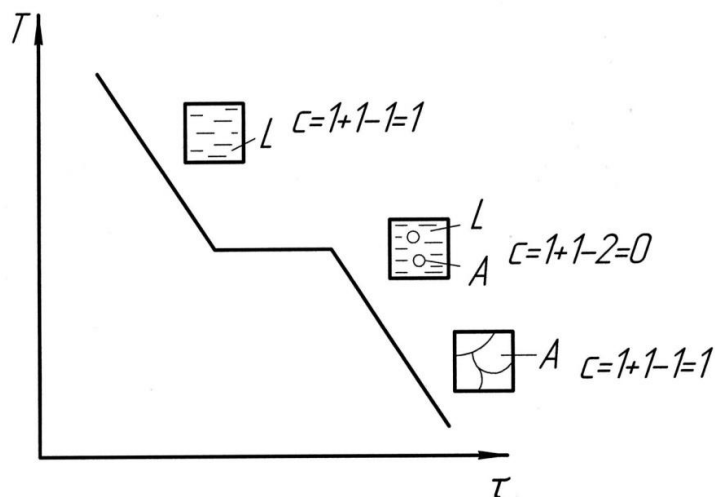


Рис. 14. Кривая охладения чистого металла

*Задача 2:* Построить кривую охладения для твердого  $\alpha$  - раствора, то есть сплава ( $K=2$ ).

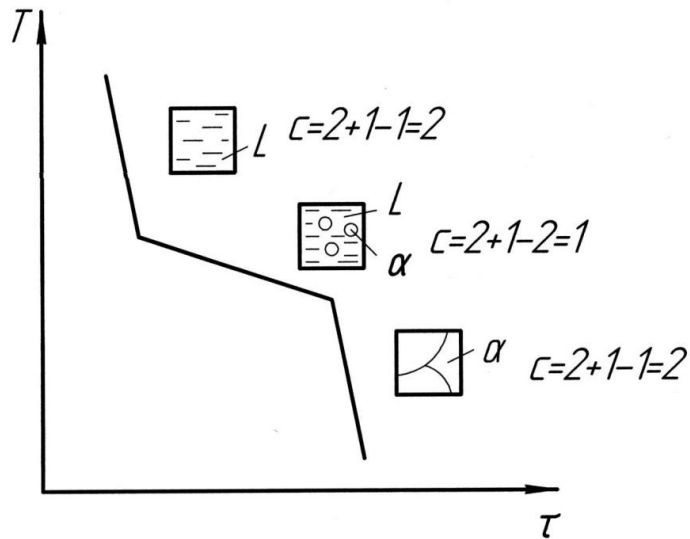


Рис.15. Кривая охлаждения сплава

**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 охлаждений (рис.16).

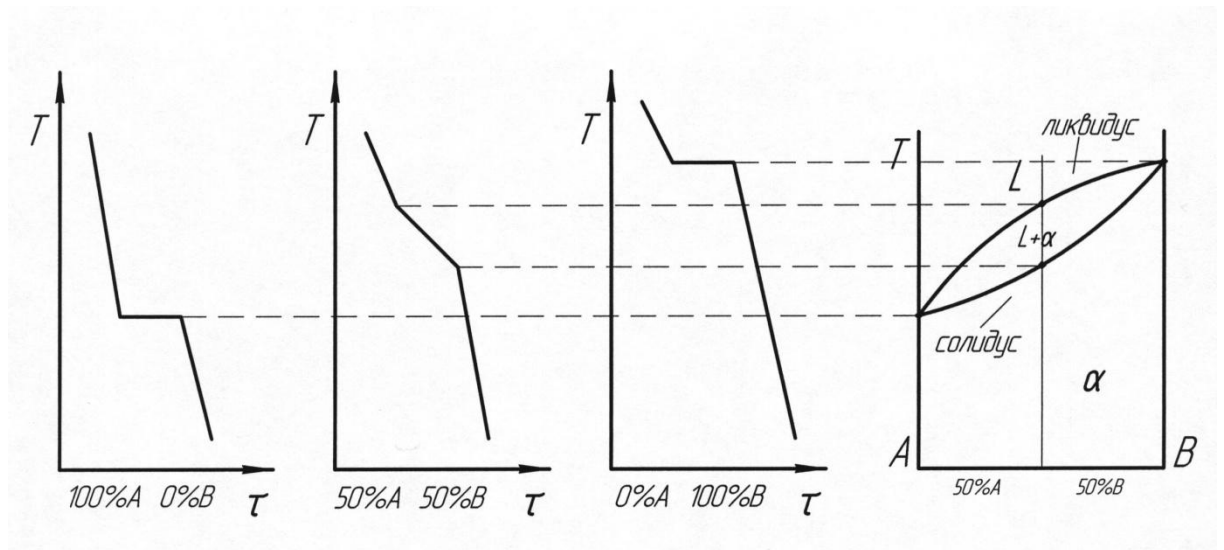


Рис.17. Построение диаграммы состояния двухкомпонентного сплава

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  $\alpha$ . Следовательно, трех фаз быть не может, кристаллизация при постоянной температуре не наблюдается, и горизонтальной линии на диаграмме нет. Диаграмма, изображенная на рис.18, как бы состоит из двух линий: верхняя линия отделяет жидкую фазу, являясь *линией ликвидус*, и нижняя линия отделяет твердую фазу, являясь *линией солидус*.

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

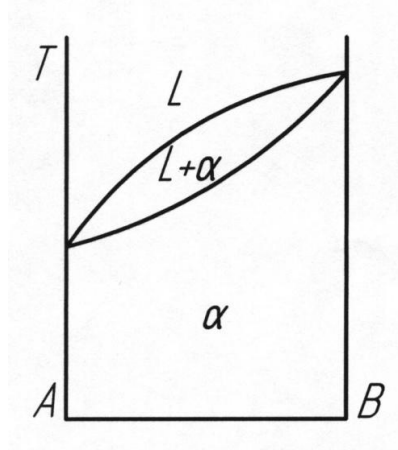


Рис.18. Диаграмма состояния сплавов, образующих неограниченные твердые растворы

**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.19.

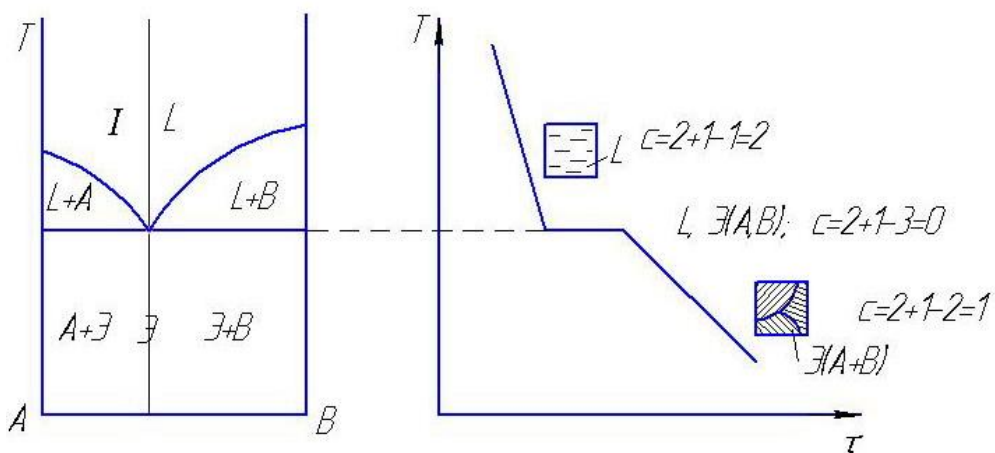


Рис.19. Диаграмма состояния и кривая охлаждения сплавов, образующих механические смеси из чистых компонентов

Сплав  $I$  при охлаждении до температуры кристаллизации затвердевает при одновременном выделении из жидкости кристаллов обоих компонентов  $A$  и  $B$ . 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. 20).

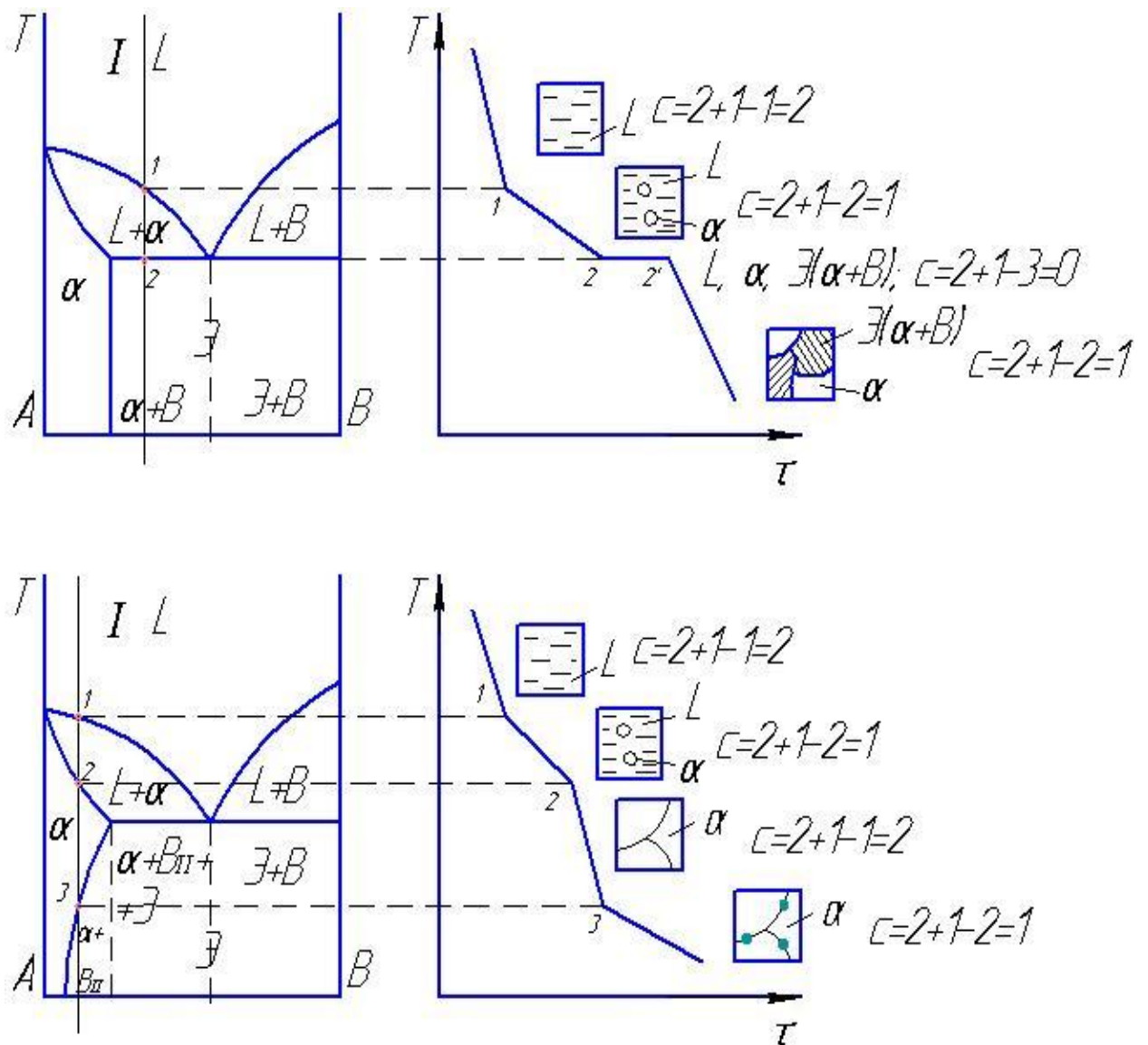


Рис. 20. Диаграммы состояния и кривые охлаждения сплавов, образующих ограниченные твердые растворы с постоянной и переменной растворимостью



В сплавах такого рода возможно существование: жидкой фазы  $L$ , жидкого раствора компонента В в А, который будет называться  $\alpha$ -раствором, и (или) твердого раствора компонента А в В, который обозначается через  $\beta$ . В этих сплавах возможно неинвариантное равновесие при одновременном сосуществовании трех фаз:  $L$ ,  $\alpha$  и  $\beta$ ; в данном случае (рис. 20):  $L$ ,  $\alpha$  и  $B$ . В зависимости от того, какая реакция протекает в условиях существования трех фаз, могут быть два вида диаграмм: диаграмма с эвтектическим превращением (рис. 20) и диаграмма с перитектическим превращением (рис. 21).

В отличие от верхней диаграммы, изображенной на рис.20, на диаграмме, представленной внизу рис.17, видно, что растворимость В в А с понижением температуры уменьшается. Это приводит к пересыщению раствор  $I$ , 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  $B_{II}$ . 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. 21).

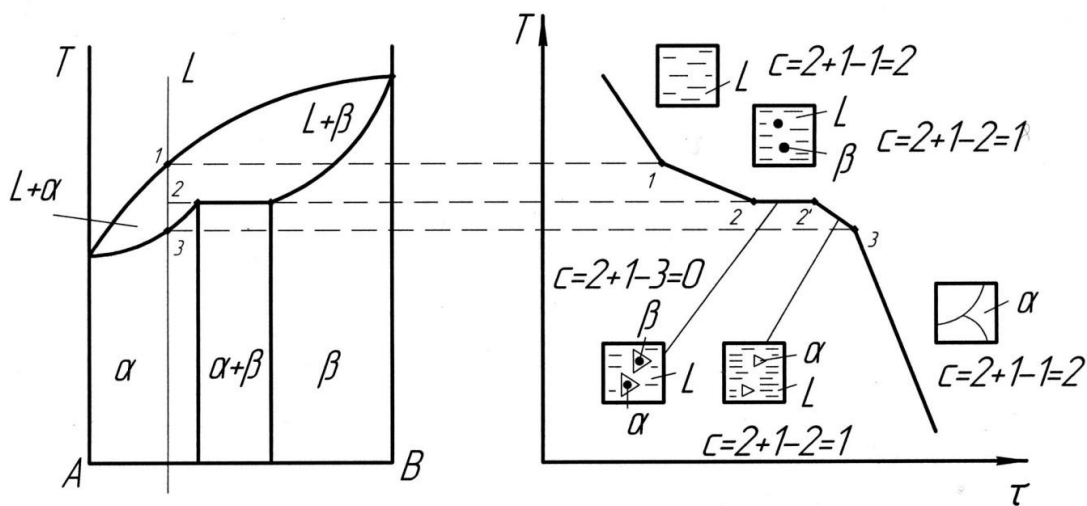


Рис. 21. Диаграмма состояния и кривая охлаждения сплавов с перитектическим превращением

**Диаграммы состояния сплавов, испытывающих полиморфные превращения.** Вид диаграммы состояния зависит от соединений, образующихся между аллотропическими формами обоих компонентов. Если полиморфизм присущ обоим компонентам, и высокотем-

пературные модификации неограниченно растворимы друг в друге, а низкотемпературные - нерастворимы, то диаграмма состояния имеет вид, показанный на рис. 22.

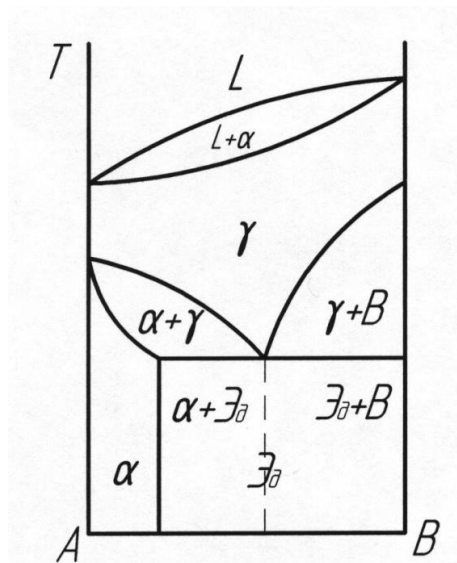


Рис. 22. Диаграмма состояния сплавов, испытывающих полиморфные превращения

Видно, что ниже некоторой температуры образовавшийся твердый раствор  $\gamma$  распадается в механическую смесь, которая подобна эвтектике, но образуется не из жидкой фазы, а из твердого раствора и называется *эвтектоидом*. В данном случае  $\mathcal{E}_0 = \alpha + \beta$ .

**Диаграммы состояния сплавов, образующих химические соединения.** Такая диаграмма представлена на рис. 20. 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 A и B 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 визуальнo разделить такую диаграмму на две части по вертикали, соответствующей химическому соединению, и изучать каждую часть диаграммы отдельно.

В данном случае (рис.23):

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

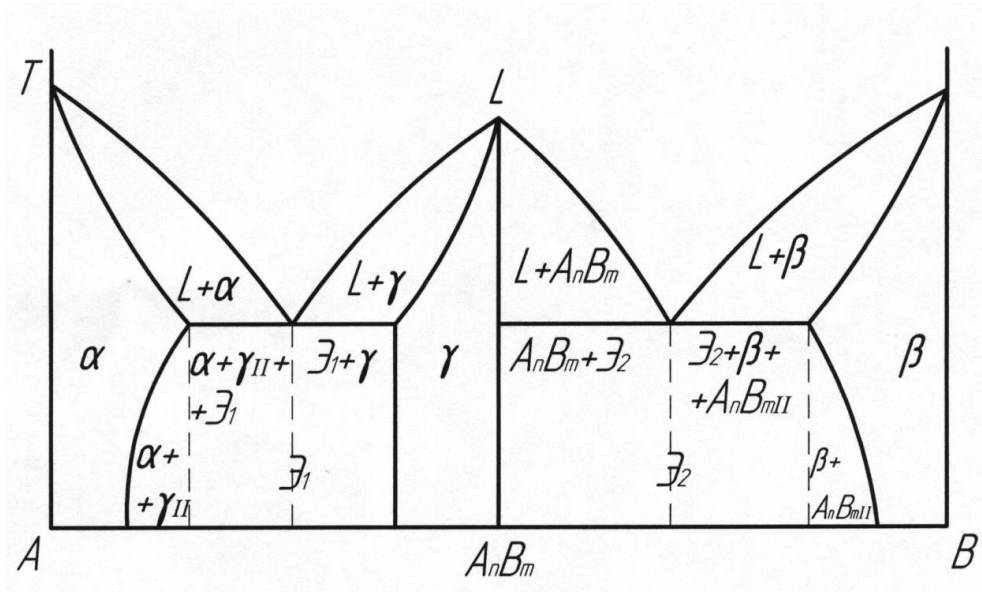


Рис.23. Диаграмма состояния сплавов, образующих химические соединения

**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, ковкие, 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.

## ЛЕКЦИЯ 4

### Сплавы на основе железа.

#### План лекции 4

*Раздел 6. Сплавы на основе железа.*

Тема 6.1. Железо и его сплавы. Полиморфизм железа. Железо и углерод. Диаграмма состояния сплавов железа с углеродом.

Тема 6.2. Углеродистые стали. Влияние химсостава на структуру и свойства стали. Влияние примесей на свойства сталей. Классификация и маркировка углеродистых сталей.

Тема 6.3. Чугуны. Процесс графитизации цементита. Белые, серые, высокопрочные и ковкие чугуны. Получение ковкого чугуна. Влияние примесей на свойства чугунов. Применение чугунов в машиностроении.

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

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

$\gamma$  – железо существует при температуре  $911 - 1392^{\circ}\text{C}$ , оно парамагнитно. Кристаллическая решетка  $\gamma$  – 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. 24.

Ось концентраций двойная: содержание углерода и содержание цементита. Линия *ABCD* является ликвидусом системы, линия *АНЕССF* – солидусом. Железо, кроме того, что образует с углеродом химическое соединение  $\text{Fe}_3\text{C}$ , имеет две аллотропические формы  $\alpha$  и  $\gamma$  (до  $911^{\circ}\text{C}$  атомы железа образуют объемно центрированную кубическую решетку  $\text{Fe}_\alpha$ , выше  $911^{\circ}\text{C}$  гранецентрированную  $\text{Fe}_\gamma$ ), поэтому в системе существуют следующие фазы:

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

*цементит*  $\text{Fe}_3\text{C}$  (линия *DFKL*) обозначается буквой *Ц*;

феррит - твердый раствор углерода в Fe- $\alpha$ , обозначается буквой  $\Phi$ ;

аустенит - твердый раствор углерода в Fe- $\gamma$ , обозначается буквой А.

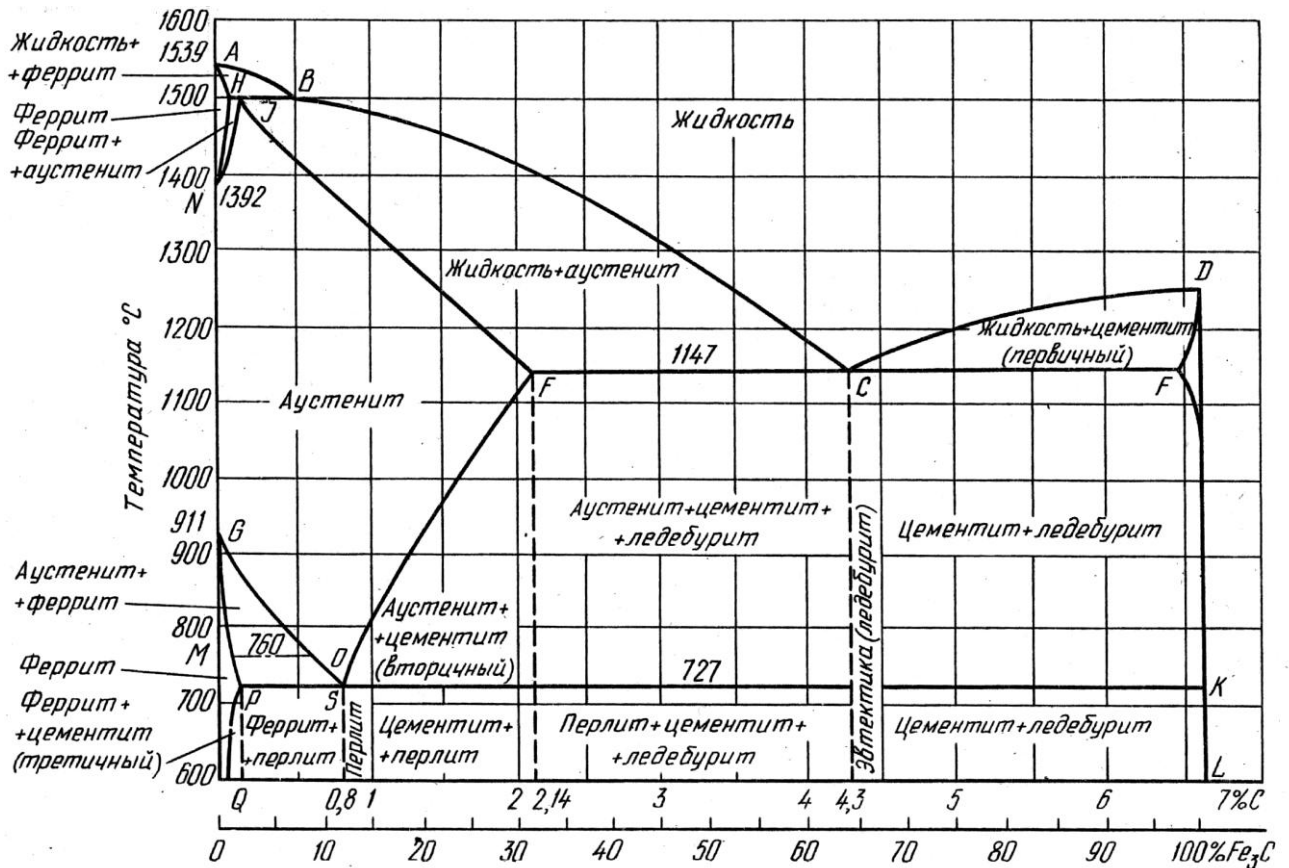


Рис. 24. Диаграмма состояния железо-углерод.

Область существования феррита расположена левее линии  $GPQ$  и  $AHN$ , а область существования аустенита – левее линии  $NJESG$ .

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

1) При  $1499^{\circ}\text{C}$  (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  $1147^{\circ}\text{C}$  (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  $727^{\circ}\text{C}$  (горизонталь  $PSK$ ) протекает эвтектоидная реакция:

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

**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).

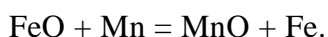
*Доэвтектоидные стали* после отжига имеют *структуру феррита и перлита*. Чем больше в доэвтектоидной стали углерода, тем больше в ее структуре перлита и тем выше прочность стали (одновременно с повышением прочности уменьшается пластичность). *Эвтектоидная сталь* после отжига состоит *из перлита*. Она 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 феррите. Такая зернистая смесь называется *зернистым перлитом*. Микроструктуры сталей приведены на рис.25.

**Влияние постоянных примесей на свойства стали.** Постоянными примесями сталей считают марганец, кремний, фосфор, серу, а также газы (водород, кислород, азот), постоянно присутствующие в технических сортах стали.

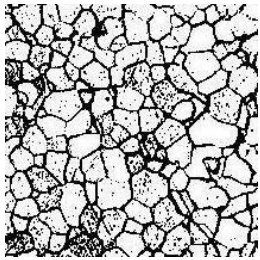
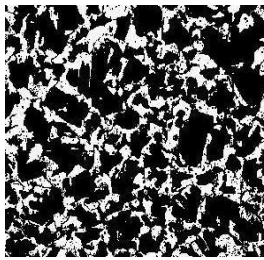
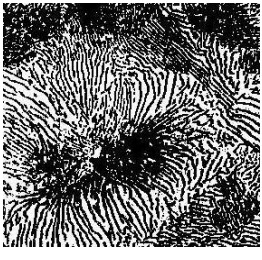
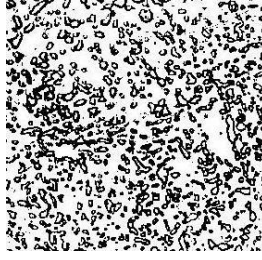
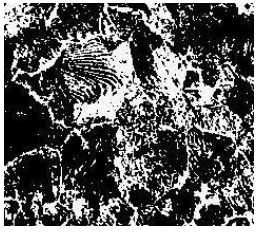
Обычно содержание этих элементов ограничивается следующими верхними пределами, %: 0,8Mn; 0,5Si; 0,05P; 0,05S. При большем их содержании сталь следует отнести к сорту легированных, куда эти элементы введены специально.

**Марганец.** Его вводят в любую сталь для раскисления, т.е. для устранения вредных примесей закиси железа:



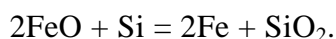
Марганец устраняет также вредные сернистые соединения железа, растворяется в феррите и цементите.

Марганец заметно влияет на свойства стали, повышая прочность в горячекатаных изделиях, изменяя и некоторые другие свойства. Но так как во всех сталях содержание марганца примерно одинаково, то его влияние на сталь разного состава остается примерно постоянным.

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

*Рис.25. Микроструктуры углеродистых сталей*

**Кремний.** Влияние начальных присадок кремния аналогично влиянию марганца. Кремний раскисляет сталь по реакции:



Кремний, остающийся после раскисления в твердом растворе (в феррите), сильно повышают предел текучести. Однако это снижает способность стали к вытяжке и особенно к холодной высадке. В связи с этим в сталях, предназначенных для холодной штамповки и холодной высадке, содержание кремния должно быть снижено.

**Фосфор.** Руды железа, а также топливо и флюсы содержат какое-то количество фосфора, которое в процессе производства чугуна остается в нем в той или иной степени и затем переходит в сталь.

Растворяясь в феррите, фосфор резко повышает температуру перехода в хрупкое состояние или иначе – вызывает хладноломкость стали.

Следует отметить, что в отдельных случаях фосфор желателен, так, например, он облегчает обрабатываемость стали режущим инструментом, а в присутствии меди повышает сопротивление коррозии.

**Сера.** Обычно содержание серы для высококачественной стали не должно превышать 0,02 – 0,03%. Для стали обычного качества допускают более высокое содержание серы: 0,03 – 0,04%.

Сера нерастворима в железе и любое ее количество образует с железом сернистое соединение – сульфид железа FeS, который входит в состав эвтектики, образующейся при 988<sup>0</sup>С.

Наличие легкоплавкой и хрупкой эвтектики, расположенной, как правило, по границам зерен, делает сталь хрупкой при 800<sup>0</sup>С и выше, т. е. в районе температур красного каления. Явление это носит название красноломкости. Вследствие красноломкости сталь с повышенным содержанием серы не поддается горячей обработке давлением. С этой точки зрения сера является вредной примесью в стали.

Обычно феррит сернистой эвтектики (Fe+FeS) объединяется с ферритом основной массы металла, а соединение FeS располагается вокруг зерен. Такая форма включений серы является особенно вредной, т. к. при горячей обработке давлением получают надрывы и трещины. Последнее связано с тем, что в процессе нагрева стали вокруг оторочек сернистого железа, начиная с температуры 988<sup>0</sup>С, происходит оплавление. Отдельные обособленные округлые включения сернистого железа уже менее вредны.

Введение марганца в сталь уменьшает вредное влияние серы, так как при введении его в жидкую сталь протекает реакция образования сульфида марганца:  $FeS + Mn = MnS + Fe$ .

Сульфид марганца плавится при 1620<sup>0</sup>С, т. е. при температурах, значительно более высоких, чем температура горячей обработки.

**Газы.** Водород, азот и кислород содержатся в стали в небольших количествах, зависящих от способа производства.

Водород, азот и кислород могут присутствовать в следующих формах: находиться в различных несплошностях, находится в  $\alpha$  - твердом растворе, образовывать различные соединения.

Очень вредным является растворенный в стали водород, который сильно охрупчивает сталь. Он приводит к образованию в катанных заготовках и крупных поковках флокенов, которые представляют собой очень тонкие трещины овальной или круглой формы (в изломе вид пятен – хлопьев серебристого цвета).

Образованные азотом и кислородом хрупкие неметаллические включения ухудшают свойства металла.

**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.26);
- 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 ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), поэтому этот чугун очень твердый и хрупкий. Структурные превращения происходят в соответствии с диаграммой Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$ . При кристаллизации белых чугунов образуется эвтектика - ледебурит. Как указывалось выше, ледебурит - это механическая смесь аустенита и цементита. Он образуется при температурах  $1147^\circ\text{C}$ ; при  $727^\circ\text{C}$  аустенит, входящий в состав ледебурита, превращается в перлит; ниже  $727^\circ\text{C}$  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.

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 выделяется 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).

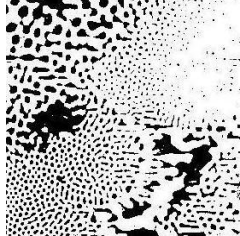
Белый чугун		
доэвтектический	эвтектический	заэвтектический
		

Рис.26. Микроструктуры белых чугунов

Серый чугун (металлическая основа и пластинчатый графит)	Ковкий чугун (металлическая основа и хлопьевидный графит)	Высокопрочный чугун (металлическая основа и шаровидный графит)
		

Рис.27. Микроструктуры чугунов

Ковкий чугун получают при длительном нагреве при высоких температурах (отжиг 900 - 1000°С) 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%.

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).




Серый чугун		
на ферритной основе	на феррито-перлитной основе	на перлитной основе
		

Рис.28. Микроструктуры серых чугунов

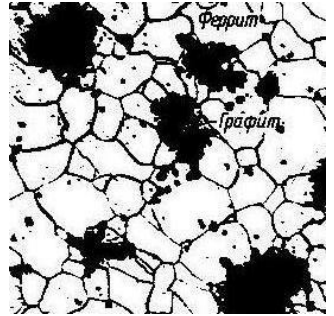
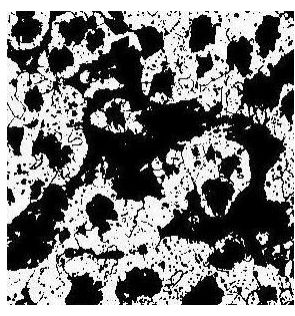
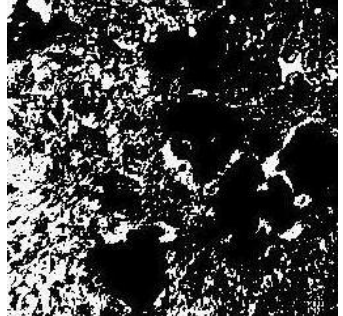
Ковкий чугун		
на ферритной основе	на феррито-перлитной основе	на перлитной основе
		

Рис.29. Микроструктуры ковких чугунов

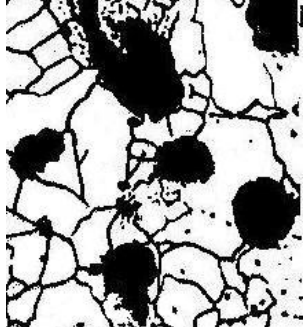
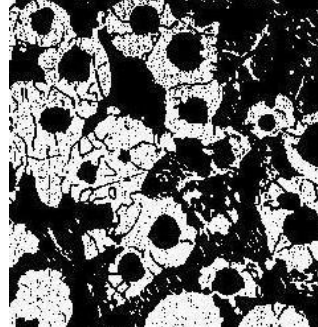
Высокопрочный чугун	
на ферритной основе	на феррито-перлитной основе
	

Рис.30. Микроструктуры высокопрочных чугунов

**Влияние примесей на свойства чугуна.** Обычный промышленный чугун – не двойной железоуглеродистый 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 - 950<sup>0</sup>С). В момент затвердевания эвтектика состоит из аустенита, обогащенного фосфором, цементита и фосфида железа (Fe<sub>3</sub>P).

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.

## ЛЕКЦИЯ 5

### Сплавы на основе железа (продолжение)

#### *План лекции 5*

Тема 6.4. Фазовые превращения в сталях при нагреве и охлаждении. Аустенизация, перлитное и мартенситное превращения. Превращение при отпуске.

Тема 6.5. Практика термообработки стали. Технология нагрева. Отжиг стали и его влияние на структуру и свойства. Закалка углеродистых сталей. Отпуск сталей

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  $Fe_\gamma$  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 превраще-

ния 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.

Превращение 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  $550^{\circ}\text{C}$  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  $\alpha$  - железе, образующийся при резком переохлаждении аустенита (охлаждение со скоро-

стями выше критических). Возникают сильнейшие искажения кристаллической решетки, дислокации блокируются почти полностью, атомы углерода «заклинены» внутри пересыщенного 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<sup>0</sup>С сопровождается лишь перераспределением углерода в мартенсите, мартенсит обедняется углеродом и понижается степень тетрагональности, но также образуются зародыши  $\epsilon$  – карбидной фазы ( $Fe_{2,4}C$ ); такая смесь неоднородного мартенсита с пластинками  $\epsilon$  – карбида называется *мартенситом отпуска*.

2) Нагрев до 200 - 300<sup>0</sup>С приводит к растворению  $\epsilon$  – 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<sup>0</sup>С) 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.

**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 (1100-1200<sup>0</sup>С).

**2. Полный отжиг** – это нагрев стали выше линии  $A_3$  на 30-50<sup>0</sup>С 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 30-50<sup>0</sup>С 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<sup>0</sup>С 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  $A_{ст}$  ( $A_{цм}$ ) 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  $A_{CT}$  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.

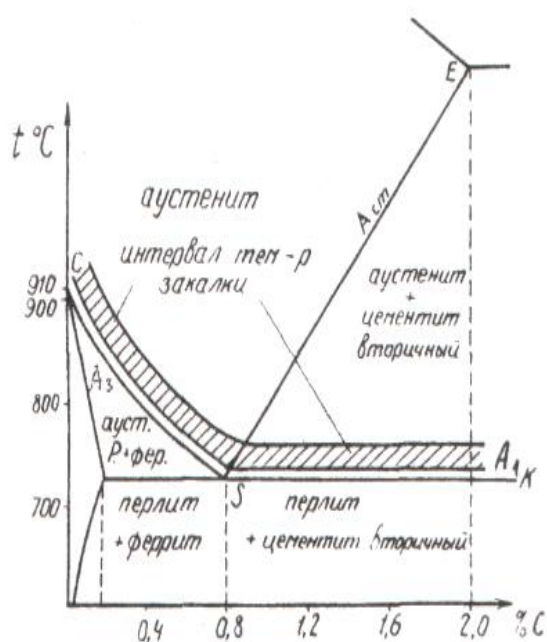


Рис. 31. Участки диаграммы Fe-Fe<sub>3</sub>C (нанесены температуры закалки)

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.

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  $30 - 50^\circ\text{C}$  превышающих линию  $A_{CT}$ , 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  $A_{CT}$  и  $A_1$ , 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 отпускком) называется улучшением, так как после такой термической обработки сталь приобретает наиболее благоприятное сочетание механических свойств: высокую вязкость и пластичность.

## ЛЕКЦИЯ 6

### Сплавы на основе железа (продолжение)

#### План лекции 6

Тема 6.6. Химико-термическая обработка стали: основные закономерности, цементация, азотирование, цианирование, нитроцементация, силицирование, борирование. Диффузионная металлизация: хромирование и алитирование.

Тема 6.7. Основы легирования стали. Влияние легирующих элементов на структуру и свойства стали. Классификация легированных сталей.

Тема 6.8. Конструкционные легированные стали. Инструментальные легированные стали. Стали и сплавы с особыми свойствами.

Химико-термической обработкой (ХТО) называют обработку, заключающуюся в сочетании термического и химического воздействий на металлы и сплавы для изменения химического состава структуры и свойств в поверхностных слоях. 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 жидкой 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 диффундирующего 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 в глубь обрабатываемого металла.

В результате такой обработки образуется *диффузионный слой*, отличающийся от исходного 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 эф-

фективной 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  $A_{c3}$  (930-950<sup>0</sup>С). 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 % С), чаще легированные стали. При цементации крупногабаритных изделий применяют стали с более высоким содержанием углерода (0,2-0,3 % С). 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.

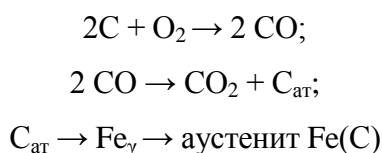
Наибольшее распространение на производстве имеют цементация в твердом карбюризаторе и газовая цементация.

*Цементация в твердом карбюризаторе.* Основная составляющая всех твердых карбюризаторов – уголь различного происхождения: древесный, каменный, костный. Древесный

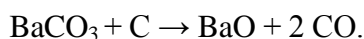
уголь менее активный, но содержит минимальное количество вредных примесей. Каменные угли (кокс) менее пригодны для цементации, так как содержат серу и при нагреве выделяют большое количество летучих продуктов. Поэтому их практически не используют.

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:

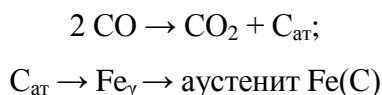


Помимо угля в состав карбюризатора входит углекислый барий ( $\text{BaCO}_3$ ) и углекислый натрий ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) в количестве 10-40 % массы угля. Это ускорители процесса:

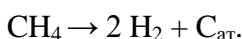


*Газовая цементация* осуществляется при нагреве изделия в среде газов в печах с герметичной камерой. Наиболее качественный цементованный слой получается при использовании в качестве карбюризатора природного газа, состоящего почти полностью из метана ( $\text{CH}_4$ ) и пропанбутановых смесей, подвергнутых специальной обработке.

Основной реакцией, обеспечивающей науглероживание при газовой цементации, является:



При высоком содержании в атмосфере метана возможна реакция:



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.

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

Азотирование сильно повышает твердость поверхностного слоя, 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 450-500<sup>0</sup>С (цементованного – 200-225<sup>0</sup>С).

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 NH<sub>3</sub>. 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:

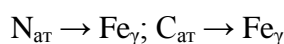
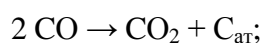
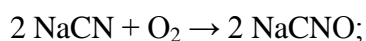
1. Предварительная термическая обработка, состоящая из закалки и высокого отпуска (600-675 °С) стали, для получения повышенной прочности и вязкости в сердцевине изделия. Структура стали после этого – сорбит.
2. Механическая обработка деталей, включая шлифование, которое придает окончательные размеры детали
3. Защита участков, не подлежащих азотированию, нанесением тонкого слоя (0,01-0,015 мм) олова электролитическим методом или жидкого стекла.
4. Азотирование (500-520°С). Для ускорения процесса азотирования применяют двухступенчатый процесс: сначала при температуре 500-520°С, затем при 540-560°С. Рекомендованный слой 0,3-0,6 мм.
5. Окончательное шлифование (доводка) изделия.

**Цианирование** – это вид химико-термической обработки, заключающийся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом при температурах 820-950°С в расплавленных солях, содержащих группу NaCN.

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

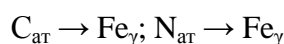
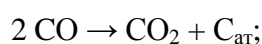
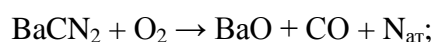
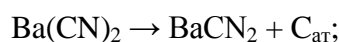
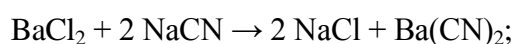
*Среднетемпературное цианирование* проводят для получения слоя небольшой толщины (0,15-0,35 мм). В этом процессе изделие нагревают до 820-860°С в расплавленных солях, содержащих группу NaCN.

Процесс ведут в ваннах, содержащих 20-25 % NaCN, 25-50 % NaCl и 25-50 % Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, 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 180-200<sup>0</sup>C) 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 (0,5-0,5 мм). В этом процессе изделие нагревают до 930-950<sup>0</sup>C в ванне, содержащей 8 % NaCN, 82 % BaCl<sub>2</sub> 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 840-860<sup>0</sup>C 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<sup>0</sup>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 C + 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<sub>3</sub>.

После нитроцементации проводят закалку непосредственно из печи, реже после повторного нагрева применяют ступенчатую закалку, затем следует провести низкий отпуск (160-180<sup>0</sup>С). 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 (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>·10H<sub>2</sub>O) при температуре 930-950<sup>0</sup>С в течение 2-6 часов. Изделие является катодом.

Процесс можно вести и без электролиза в ваннах с расплавленными хлористыми солями (NaCl, BaCl<sub>2</sub>), в которые добавляют 20 % ферробора и 10 % карбида бора (B<sub>4</sub>C).



Хорошие результаты получаются при газовом борировании при температуре 850-900<sup>0</sup>С в среде диборана (B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) или треххлористом боре (BCl<sub>3</sub>) в смеси с водородом.

Диффузионный слой состоит из боридов FeB (на поверхности) и Fe<sub>2</sub>B. 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<sup>0</sup>С) и теплостойкостью.

Средне- и тяжело нагруженные детали после борирования подвергают термической обработке: закалке и отпуску. Закалку желательнее 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 оттеснение 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 170-200<sup>0</sup>С 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 (NH<sub>4</sub>Cl). В результате реакции металлизатора с HCl или Cl<sub>2</sub> образуется летучее соединение хлора с металлом (AlCl<sub>3</sub>, CrCl<sub>2</sub> 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 (1000-1200<sup>0</sup>С) длительное время, а это существенно увеличивает себестоимость изделия.

*Алитирование* – насыщение поверхностного слоя стального изделия алюминием, обеспечивающее высокую окислительную стойкость (850-900<sup>0</sup>С), хорошее сопротивление коррозии в атмосфере и морской воде.

Алитированный слой является твердым раствором алюминия в  $\alpha$  – 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 окислительную стойкость до 800<sup>0</sup>С.

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

Диффузионный слой, получаемый при хромировании технического железа, состоит из твердого раствора хрома в  $\alpha$  – железе, его твердость составляет 250-300 HV.

#### **Влияние легирующих элементов:**

1. 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.

2. Все легирующие элементы при нагреве сдерживают рост зерна аустенита, т.е. способствуют образованию мелкозернистой структуры; кроме марганца и бора.

3. Все легирующие элементы расширяют область существования  $\alpha$  - железа, т.е. являются  $\alpha$  – стабилизаторами. Исключение: марганец и никель –  $\gamma$ - стабилизаторы.

4. Все легирующие элементы, растворяясь в аустените, замедляют диффузию углерода, что замедлит распад аустенита и повышают прокаливаемость стали. Исключение: кобальт.

5. Легирующие элементы не влияют на кинематику мартенситного превращения, их

влияние сказывается на температурном интервале мартенситного 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.

6. 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.

### **Классификация легированных сталей:**

#### **I. Конструкционные стали:**

##### **1. стали общего назначения:**

- 1) *цементуемые* – 15ХН, 12Х2Н4А, 18ХГТ;
- 2) *улучшаемые* – 35ХГСА, 38ХМЮА, 40ХН, 45Х;
- 3) *высокопрочные* – Н18К9М5Т, Н9Х12Д2ТЬ, 30Х9Н8М4Г2С2;

##### **2. специализированного назначения:**

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

#### **II. Строительные стали – 15ХСНД, 17ГС, 18Г2АФ;**

#### **III. Инструментальные стали:**

##### **1. режущие стали – Х, ХВГ;**

##### **2. быстрорежущие – Р18, Р6М5;**

##### **3. штамповые стали:**

- 1) *для штампов холодного деформирования* – Х12Ф1, Х6ВФ;
- 2) *для штампов горячего деформирования* – 5ХНМ, 3Х2В8Ф;

#### **IV. Стали и сплавы с особыми свойствами:**

##### **1. нержавеющие стали – 12Х13, 12Х18Н10Т, 15Х25Т;**

##### **2. жаропрочные стали – 12Х2МФБ, Х10С2М, Х25Н20С2;**

##### **3. с особыми магнитными свойствами:**

- 1) *ферромагнитные* – ЮНДК15, 80ХНС;
- 2) *парамагнитные* – 110Г13, 55Г9Н9;

##### **4. с особыми электротехническими свойствами – 79ХН, 1211, 3411;**

##### **5. с особыми тепловыми и упругими свойствами – Н36, Н48, Н35ХМВ.**

**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, 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 (магнитоstriction). 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.

*Алнии* – 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 магнито 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 ( $10^2 \dots 10^5$ ) 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 магнитострикционные материалы.

*Магнитострикция* – это явление, связанное с изменением размеров и формы тела при его намагничивании. По своему значению магнитострикция 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 магнитострикционные преобразователи, в которых энергия переменного электрического и магнитного полей преобразуется в энергию механических УЗ-колебаний или, наоборот, благодаря обратимому эффекту магнитострикции – в магнитное поле при механическом воздействии на преобразователь. Устройства с магнитострикционными 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.

**Электрические свойства материалов.** 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  $10^{-8} \dots 10^6$  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 –  $2200 \dots 2500^{\circ}\text{C}$ . 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  $2500^{\circ}\text{C}$ ). 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 ... 1400<sup>0</sup>С) 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. За рубежом аналоги хромалия – это *канталь*, *мегапир*.

*Фехраль* – жаростойкий (до 1100<sup>0</sup>С) 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». Используются 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 корбунда и кремния. Такие нагреватели способны длительное время работать при высокой температуре до 2000<sup>0</sup>С 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 промыш-

ленности, относится ртуть (температура плавления – 39<sup>0</sup>С), олово (232<sup>0</sup>С), свинец (327<sup>0</sup>С), цинк (419<sup>0</sup>С) и алюминий (660<sup>0</sup>С). К тугоплавким относятся вольфрам (2400<sup>0</sup>С), молибден (2695<sup>0</sup>С), хром (1860<sup>0</sup>С), титан (1800<sup>0</sup>С) и ванадий (1720<sup>0</sup>С).

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

*Теплопроводность* характеризуется коэффициентом теплопроводности, показывающим 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 29<sup>0</sup>С 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 0<sup>0</sup>С), 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...+100<sup>0</sup>С температурный коэффициент линейного расширения, равный  $1,5 \cdot 10^{-6}$  1/К. Извест-



тен *суперинвар*, в составе которого наряду с железом содержится 32% никеля и 4% кобальта. Детали из указанных сплавов используются в качестве эталонов сравнения в дилатометрах 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.

**Дефекты легированных сталей.** Наряду с преимуществами, легированным сталям свойственны дефекты, не встречающиеся у легированных сталей.

**1. Дендритная ликвация** – результат увеличенного интервала между линиями ликвидус и солидус. При прокатке она приводит к образованию волокна и резкой анизотропии. Так указывалось выше, для устранения дендритной ликвации необходимо применять диффузионный отжиг.

**2. Карбидная ликвация** возникает вследствие разной плотности железа и карбидов легирующих элементов. Карбиды могут образовывать в стали местные скопления, что приводит к резкому колебанию свойств по сечению детали. Данный вид дефекта наблюдается только в сталях, легированных карбидообразующими элементами, например, титаном, ванадием, вольфрамом, молибденом, хромом, марганцем. Термической обработкой карбидную ликвацию устранить невозможно. Однако методами обработки давлением карбидные скопления относительно равномерно распределяются по сечению заготовки.

**3. Флокены** – это трещины, имеющие в изломе вид пятен. Их образование вызывается содержащимся в металле водородом, в процессе быстрого охлаждения в основном хромированных сталей в интервале температур 200-20<sup>0</sup>С. Флокены редко образуются в литой стали, так как выделившийся из раствора водород скапливается в многочисленных литейных порах и неплотностях литого материала. Флокены можно устранить последующей ковкой (прокаткой) на меньший размер.

**4. Нафталинистый излом** – особый вид брака, встречающийся в быстрорежущих сталях: при нормальной твердости и нормальном количестве остаточного аустенита сталь оказывается очень хрупкой, а ее излом - грубозернистый, чешуйчатый, напоминает нафталин.

**5. Шиферный излом** наблюдается только после горячей деформации и вызывается неравномерным распределением соединений серы, фосфора, кислорода и других примесей. Усадочные раковины и газовые пузыри при прокатке вытягиваются, образуя слои загрязненного металла. При разрушении по такому слою излом получается слоистым, с острыми зазубринами

и выступами. Стали, с такими дефектами, обычно направляют на переплав, так как устранить их удастся только перековкой стали, и то не всегда.

**6. Отпускная хрупкость** (II рода) проявляется в легированных сталях при медленном охлаждении в области температур около  $550^{\circ}\text{C}$ . Отпускная хрупкость I рода – результат неравномерного отпуска границ и сердцевины зерен. Границы отпускаются быстрее, теряются прочность и становятся концентраторами напряжений. Отпускная хрупкость II рода – результат диффузии фосфора, азота, углерода и легирующих элементов в границах зерен, где они сильно тормозят движение дислокаций, понижая пластичность. Хром и марганец, вытесняя эти элементы из раствора, усиливают отпускную хрупкость, но молибден не вытесняет, и в то же время затрудняет диффузию элементов, уменьшая отпускную хрупкость. Быстрое охлаждение способно полностью устранить отпускную хрупкость II рода

## ЛЕКЦИЯ 7

### Цветные металлы и сплавы.

### Композиционные материалы.

#### *План лекции 7*

*(лекция консультация в активной форме)*

#### *Раздел 7. Цветные металлы и сплавы.*

Тема 7.1. Сплавы на основе меди. Свойства и применение меди. Медно-никелевые сплавы. Бронзы и их термическая обработка. Латунни и их термическая обработка. Применение медных сплавов.

Тема 7.2. Сплавы на основе алюминия и магния. Свойства алюминия. Литейные и деформируемые алюминиевые сплавы. Дюралюмины и их термообработка. Применение алюминиевых сплавов.

Тема 7.3. Титан и его сплавы. Свойства титана. Классификация титановых сплавов и их применение.

Тема 7.4. Магний и его сплавы.

Тема 7.5. Антифрикционные сплавы, припои, легкоплавкие сплавы. Маркировка цветных металлов и сплавов.

#### *Раздел 8. Композиционные материалы.*

Тема 8.1. Общая характеристика и классификация. Строение, свойства и применение композиционных материалов. Технологии получения композиционных материалов.

**Медь и ее сплавы.** Медь – металл красного цвета. Температура плавления  $1083^{\circ}\text{C}$ . Медь имеет кристаллическую решетку ГЦК с периодом  $a = 0,3608$  нм. Плотность меди  $8,94$  г/см<sup>3</sup>. 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  $\sigma_{\text{в}} = 150\text{...}200$  МПа,  $\delta \approx 15\text{...}25$  %. 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 и 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 ( $\alpha$ ), представляют собой твердый раствор цинка в меди. Такие латуни пластичны, хорошо обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии. Латуни, содержащие 40-45 % цинка (Л60, Л59, ЛЦ40Мц1,5), имеют двухфазную структуру ( $\alpha + \beta$ ),  $\beta$  - фаза представляет собой твердый раствор на основе химического соединения CuZn (рис.32). Латуни, имеющие двухфазную структуру, обладают повышенной твердостью, хорошо обрабатываются давлением в горячем состоянии, но в холодном состоянии пластичность их невелика.

Однофазные латуни состоят из зерен однофазного твердого раствора -  $\alpha$ . Они не упрочняются при термической обработке, так как при нагревании до температуры плавления их структура не изменяется. Повысить прочность однофазных латуней можно только при холодной деформации.

Неодинаковая окраска зерен под микроскопом возникает вследствие анизотропии.

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).

**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 оловянистые и безоловянистые (специальные), а по технологическим свойствам – на обрабатываемые давлением (деформируемые) и литейные.

Сплавы меди с оловом - *оловянистые бронзы* (Бр 010) очень давно и широко применяются в промышленности благодаря высокой коррозионной стойкости и антифрикционным свойствам. Микроструктура литой оловянистой бронзы (рис.32) состоит из неоднородного твердого  $\alpha$ -раствора (твердого раствора олова в меди) и эвтектоида  $\alpha + \text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ . Темные участки неоднородного твердого  $\alpha$ -раствора богаты медью, светлые - оловом, в эвтектоиде, на светлом фоне соединения  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$  видны темные точечные включения  $\alpha$ -фазы.

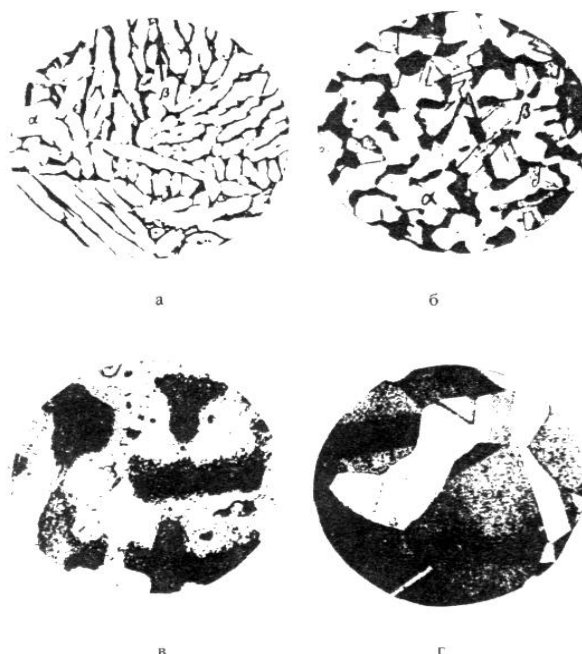


Рис.32. Микроструктуры (x 100): а - литая латунь Л59 ( $\alpha+\beta$ );  
б - латунь ( $\alpha+ \beta$ ) после деформирования; в - литая бронза Бр05;  
г - бронза после деформирования и рекристаллизации

В последнее время оловянистые бронзы заменяются более дешевыми и прочными алюминиевыми бронзами.

*Алюминиевые бронзы* содержат до 11% алюминия, 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  $900^{\circ}\text{C}$  в воду и отпуска  $650^{\circ}\text{C}$ . После закалки они имеют игольчатую структуру, состоящую из зерен  $\alpha$  и  $\beta$  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 и его сплавы.** *Алюминий* – металл серебристо-белого цвета. Температура плавления  $600^{\circ}\text{C}$ . Алюминий имеет кристаллическую решетку ГЦК с периодом  $a = 0,4041$  нм. Наиболее важной особенностью алюминия является низкая плотность –  $2,7$  г/см<sup>3</sup>. Алюминий обладает хорошими теплопроводностью и электрической проводимостью, высокой коррозионной стойкостью вследствие образования на его поверхности тонкой прочной пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . 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 дюралюминий (Д1, Д16) и литейных - силумин АЛ2.

**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  $\alpha$  – раствора (кремния в алюминии) и эвтектики ( $\alpha + \text{Si}$ ). При более высокой концентрации кремния (заэвтектические сплавы) в структуре сплавов кроме эвтектики присутствуют первичные кристаллы кремния в виде пластинок.

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.

**Дюралюминий** (дюралюмин) – 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 ( $\text{CuAl}_2$ , фаза S,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ) и нерастворимых соединений (железистые и марганцовистые соединения). Структура дюралюмина в отожженном состоянии состоит из твердого раствора и вторичных включений различных интерметаллидных соединений.

Дюралюмин 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.

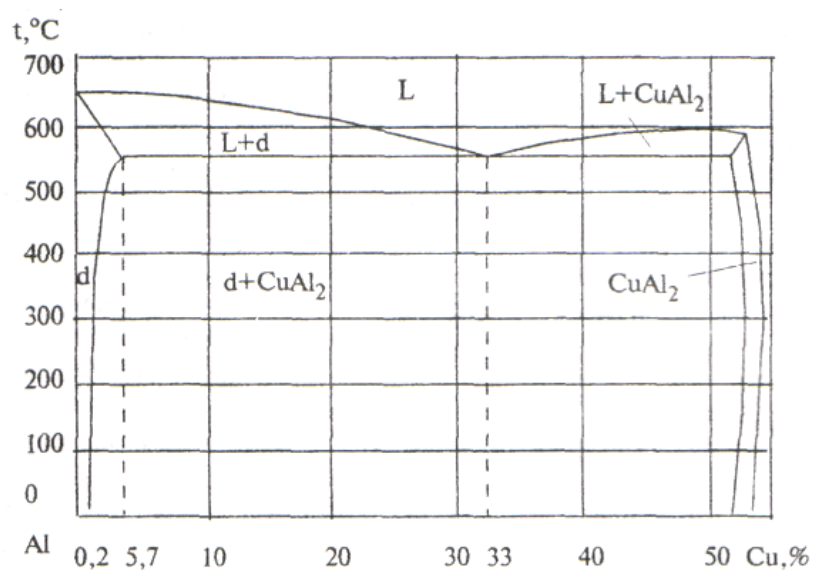


Рис. 33. Диаграмма состояния сплавов Al – Cu

После закалки с оптимальных температур ( $500^{\circ}\text{C}$ ) основное количество соединений  $\text{CuAl}_2$  и  $\text{Mg}_2\text{Si}$  растворяется в алюминии, соединения железа не растворяются. Поэтому в закаленном состоянии структура состоит из алюминиевого твердого раствора (пересыщенного  $\alpha$  – раствора) и нерастворимых включений соединений железа. Такая структура будет отличаться большей пластичностью, но меньшей твердостью и прочностью, т.е. в результате закалки дура-

люмин становится мягким и пластичным. Старению предшествует 2...3 – часовой инкубационный период, в течение которого сплав сохраняет высокую пластичность. Но полученный в результате закалки  $\alpha$  – 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 –  $\text{CuMgAl}_2$ ).

Дюралюмины после закалки подвергаются 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  $40^\circ\text{C}$  особенно  $100^\circ\text{C}$ , температура искусственного старения различных алюминиевых сплавов колеблется от  $20^\circ\text{C}$  до  $200^\circ\text{C}$ .

**Титан и его сплавы.** *Титан* – металл серого цвета. Температура плавления  $1668^\circ\text{C}$ . Титан имеет две полиморфные модификации: до  $882^\circ\text{C}$  существует  $\alpha$  – титан, который кристаллизуется в гексагональной решетке с периодами  $a = 0,2951$  нм и  $c = 0,4684$  нм, а при более высоких температурах –  $\beta$  – титан, имеющий ОЦК-решетку с периодами  $a = 0,3282$  нм. Плотность титана  $4,5$  г/см<sup>3</sup>.

Титан благодаря защитной пленке из  $\text{TiO}_2$  обладает очень высокими коррозионной и химической стойкостью, сохраняющимися в интервале температур от  $-250$  до  $550^\circ\text{C}$ .

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

1.  $\alpha$  – стабилизаторы (алюминий, галлий, индий, углерод, азот, кислород);
2.  $\beta$  – 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.

Композиционные материалы или композиты – это сложные материалы, в состав которых вводят сильно отличающиеся по свойствам нерастворимые или малорастворимые один в другом компоненты, разделенные в материале ярко выраженной границей. Спектр свойств, которые присущи конструкционным материалам, невозможно получить при использовании обычных материалов. Их применение дает возможность создать ранее недоступные принципиально новые конструкции.

Важными характеристиками материалов, работающих в этих условиях, являются удельная прочность  $\sigma_v / \gamma g$  и удельная жесткость  $E / \gamma g$ , где  $\sigma_v$  – временное сопротивление,  $E$  – модуль нормальной упругости,  $\gamma$  – плотность материала,  $g$  – ускорение свободного падения. По удельной прочности и жесткости композиционные материалы превосходят все известные конструкционные сплавы.

**Композиционные материалы.** Различают *искусственные композиты*, уровень свойств которых реализуется подбором компонентов, и *естественные композиты*, получаемые при естественном структурировании. Искусственные композиты могут иметь разную матрицу: металлическую (сплав или монометалл) и неметаллическую (полимерную, углеродную, керамическую). Разработаны также и полиматричные материалы, в которых чередующиеся слои матрицы могут иметь различный состав.

Компоненты, равномерно распределенные в матрице, называются *армирующими наполнителями* или *упрочнителями*. В зависимости от формы наполнителя композиты делят на *дисперсно-упрочненные, волокнистые и слоистые*.

В дисперсно-упрочненных материалах равноосные частицы наполнителя ориентированы беспорядочно, в волокнистых оси волокон могут быть ориентированы вдоль одного из направлений (однонаправленные композиты), в нескольких направлениях (двух или более) или без ориентации в определенном направлении (неориентированные композиты). В слоистых композитах слои не обязательно должны быть сплошными пластинами, они могут быть заполнены расположенными упорядоченно в плоскости частицами либо волокнами, уложенными упорядоченно в параллельных плоскостях. Иногда в одном композиционном материале используют несколько различных наполнителей. Такие композиционные материалы называют *полиармированными*.

**Искусственные композиционные материалы с металлической матрицей.** В дисперсно-упрочненных композиционных материалах наполнителями служат частицы оксидов



(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BeO), карбидов (SiC, B<sub>4</sub>C), нитридов (BN), боридов и других соединений. Обычно такие материалы изготавливают порошковым методом.

В промышленности используются и дисперсно-упрочненные жаропрочные композиты с матрицами на титановой, никелевой и алюминиевой основах.

Упрочнителями *волоконистых композиционных материалов* являются волокна неметаллических материалов (C, B), тугоплавких соединений (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC) или проволока из тугоплавких металлов (W, Mo). Диаметр волокон может быть 1...50 мкм (нитевидные монокристаллы), а диаметр проволоки обычно составляет доли миллиметра. Длина волокон в десятки раз превышает их диаметр.

В промышленности волокнистые композиты используются большей частью для изготовления деталей простой формы (пластин, клиньев, колец и т.п.). Нашли применение волокнистые композиты с алюминиевой матрицей, армированной проволокой из коррозионно-стойких сталей или борными и углеродными волокнами.

**Искусственные композиционные материалы с неметаллической матрицей.** В качестве неметаллических матриц используют полимерные, углеродные и керамические материалы. Из полимерных матриц наибольшее распространение эпоксидная, фенолоформальдегидная и полиамидная. Угольные матрицы получают из синтетических полимеров, подвергнутых пиролизу. Свойства матрицы определяют прочность композиции при сдвиге и сжатии и сопротивление усталостному разрушению.

Упрочнителями служат волокна: стеклянные, углеродные, борные, органические, на основе нитевидных кристаллов (оксидов, карбидов, боридов, нитридов и др.), обладающие высокой прочностью и жесткостью. Армирующие материалы могут быть в виде волокон, жгутов, нитей, лент, многослойных тканей.

По виду упрочнителя композиционные материалы подразделяют на стекловолокниты, карбоволокниты, бороволокниты и органоолокниты.

В слоистых материалах волокна, нити и ленты, пропитанные связующими, укладывают параллельно друг другу в плоскости укладки. Плоскостные слои собирают в пластины. Можно создавать материалы, как с изотропными, так и с анизотропными свойствами. Можно укладывать волокна под разными углами, варьируя свойства композитов.

**Естественные композиционные материалы.** Естественные композиционные материалы получают в результате выделения волокон, пластин или частиц упрочняющей фазы в процессе естественного структурообразования. В естественных композитах упрочняющая фаза кристаллизуется в виде иголок (нитевидных кристаллов), стерженьков, пластинок или

зернистых включений. По виду структура этих материалов мало отличается от структуры искусственных волокнистых и слоистых композиций, но имеют ряд важных особенностей.

В естественных композициях упрочнители по механическим свойствам почти не отличаются от нитевидных кристаллов («усов»), имеющих уникальные механические свойства. Другими особенностями являются исключительно хорошее сопряжение матрицы с упрочнителем и высокая термодинамическая стабильность структуры. Поэтому эффект композиционного упрочнения в таких материалах сохраняется при нагревании до высоких температур (вплоть до  $0,9T_{пл}$ ). Высокая стабильность структуры этих материалов при рабочих температурах обеспечивает значительное сопротивление ползучести и выгодно отличает их от традиционных жаропрочных сплавов.

Естественные композиционные материалы можно классифицировать по нескольким признакам: характеру матричной и упрочняющей фаз, геометрической форме и расположению включений упрочняющей фазы, способу получения композитов.

## **Лекция 8**

### **Неметаллические материалы. Наноструктурные материалы.**

#### **Научные основы выбора материалов.**

#### *План лекции 8*

*(лекция консультация в активной форме)*

*Раздел 9. Неметаллические материалы. Наноструктурные материалы.*

Тема 9.1. Особенности строения и свойства полимерных материалов. Пластмассы, их особенности и области применения в качестве конструкционного материала. Наполнители пластмасс. Свойства и область применения термопластических и терморезистивных пластмасс.

Тема 9.2. Резины. Стекло. Древесина. Керамика.

Тема 9.3. Особенности свойств наноматериалов. Наноструктурные элементы.

*Раздел 10. Научные основы выбора материалов.*

Тема 10.1. Проблема выбора материала. Эксплуатационная надежность материала. Технологичность материала. Экономичность материала.

#### **Пластмассы.**

*Состав и характеристика пластмасс.* К полимерным пластическим материалам относятся искусственные материалы, получаемые на основе природных или синтетических высо-

комолекулярных полимеров при нагреве путем деформирования в размягченном состоянии под давлением и с последующим переходом в твердое состояние сформованной массы при дальнейшем ее нагревании (терморреактивные) или охлаждении (термопластичные). В инженерной практике такие материалы называют **пластмассами**.

Состав композиций, изготовленных на основе полимеров, разнообразен: простые пластмассы – это полимеры без добавок, сложные пластмассы – это смеси полимеров с различными добавками (наполнители, пластификаторы, стабилизаторы, специальные добавки и др.).

*Наполнители* – это органические и неорганические вещества, как правило, инертные по отношению к полимеру, в виде порошков (древесная мука, сажа, графит, слюда и др.), волокон (полимерные, стеклянные, хлопчатобумажные и др.), листов (бумага, ткани из различных волокон, древесный шпон). Их добавляют в количестве 40-70 % для повышения механических свойств, снижения стоимости готовой продукции, изменения других параметров.

*Пластификаторы* – вещества (например, сложные эфиры, стеарин), уменьшающие межмолекулярное взаимодействие и хорошо совмещающиеся с полимерами. Их добавляют в количестве 10-20 % для уменьшения хрупкости, для облегчения обработки, улучшения морозостойкости и огнестойкости.

*Стабилизаторы* – различные органические вещества, которые вводят для сохранения структуры молекул и стабилизации свойств. Их добавляют в количестве нескольких процентов, чтобы замедлить процесс старения.

*Специальные добавки* – смазочные вещества (стеарин, олеиновая кислота), красители (минеральные пигменты, спиртовые растворы органических красок), добавки для уменьшения статических зарядов и горючести, для защиты от плесени, ускорители и замедлители отверждения и другие – служат для изменения или усиления какого либо свойства.

Широкое распространение пластмасс предопределили следующие достоинства: неограниченные запасы сырья, легкость переработки, низкая себестоимость изделий, комплекс ценных свойств (долговечность, хорошие фрикционные и антифрикционные свойства, низкая истираемость, низкое или высокое водопоглощение, диэлектрические свойства, высокие оптические, высокая химическая стойкость, неподверженность коррозии, хорошие декоративность и другие свойства).

Недостатками пластмасс являются следующие их свойства: низкая ударная вязкость, повышенная ползучесть, высокий коэффициент линейного расширения, низкая теплостойкость, старение, токсичность, пожароопасность, способность воспламеняться или подвергаться деструкции под действием огня и другое.

*Классификация пластмасс.* Классифицируют пластмассы по нескольким признакам: по способу синтеза, по виду наполнителя, по отношению к нагреву, по структуре, по применению.

**По способу синтеза** полимеры подразделяют на получаемые полимеризацией, поликонденсацией и химическим модифицированием.

При *полимеризации* молекулы мономера соединяются без образования побочных продуктов.

При *поликонденсации* получают полимеры, состав которых отличается от состава исходных веществ (при реакции образуются дополнительные низкомолекулярные продукты).

При *химическом модифицировании* происходит замена атомов водорода или других элементов на атомы и группы в самой молекулярной цепи.

**По виду наполнителя** различают пластмассы с твердым наполнителем в виде порошков, волокон, слоистых материалов и с газовым наполнителем.

**По отношению к нагреванию** полимеры делятся на термопластичные и термореактивные.

*Термопластичные полимеры* (термопласты) при нагревании размягчаются, а при охлаждении затвердевают. Как правило, их не сочетают с наполнителями. К основным термопластичным полимерам относятся полиэтилен, полиметилакрилат, поливинилхлорид (винипласт) и др. Они характеризуются малой хрупкостью, большой упругостью и способностью к ориентации.

*Термореактивные пластмассы* (реактопласты) на основе термореактивных полимеров (смола) после тепловой обработки (отверждения) переходят в термостабильное состояние. Среди термореактивных полимеров наибольшее распространение получили фенолоформальдегид, а также полиэфирные и полисиликоновые (кремнеорганические) полимеры. Они обладают повышенной теплостойкостью, однако для них характерна хрупкость.

**По структуре** полимеры могут быть аморфными и кристаллическими.

**По применению** пластмассы можно подразделить на конструкционные общего и специального (фрикционные и антифрикционные, уплотнительные, тепло- и электроизоляционные, химически стойкие, декоративные и др.) назначения и с особыми физико-химическими свойствами (оптически прозрачные и др.). Однако это деление условно, так как одна и та же пластмасса может обладать разными свойствами.

**Резинами** называются эластичные многокомпонентные материалы на основе каучука (натурального или синтетического).

Резина как технический материал отличается от других материалов высокими эластичными свойствами, которые присущи главному исходному компоненту резины – каучуку. Резина способна к очень большим деформациям (относительное удлинение достигает 1000%), которые почти полностью обратимы. Следует отметить, что при нормальной температуре резина находится в высокоэластическом состоянии и ее эластические свойства сохраняются в широком диапазоне температур. Для улучшения физико-механических свойств каучуков вводят различные добавки.

Резина получается при помощи специальной обработки – вулканизации: превращение каучука в резины, осуществляемое под действием вулканизирующих веществ (агентов), например, серы, или под действием ионизирующей радиации. При этом линейные молекулы каучука соединяются поперечными химическими связями. Молекулярная структура резины представляет собой объемную сетку, способную к высокоэластичным деформациям благодаря невысокой плотности поперечных связей. По сравнению с каучуком резина прочнее, не склонна к необратимым деформациям под нагрузкой и не растворяется, а лишь набухает в тех растворителях, в которых растворим каучук.

В качестве добавок при производстве резиновых материалов используются вулканизирующие вещества, ускорители вулканизации, активаторы ускорителей, наполнители, противостарители, пластификаторы и красители.

Резиновые материалы классифицируют по виду сырья, виду наполнителя (порошковые и ткани), степени упрочнения макромолекул и пористости (мягкие, жесткие, пористые и пастообразные), технологическим способам переработки (выдавливание, прессование и литье), типам теплового старения и изменению объема после пребывания в нефтяной жидкости.

**Керамические материалы.** Керамика – неорганические поликристаллические материалы, получаемые из сформированных минеральных масс (глины и их смеси с минеральными добавками) в процессе высокотемпературного (1200-2500<sup>0</sup>С). Керамика – это большая группа неметаллических материалов разного химического состава, объединяемая по общности технологий.

Технология керамики заключается в тонком измельчении исходного сырья, формировании изделий методами обработки давлением или по литейной технологии и последующих сушке и обжиге. При этом используются главным образом каолины и глины, а также и другие виды минерального сырья, например чистые оксиды.

При нагреве глины во время спекания в ней начинают последовательно происходить химические и физико-химические процессы, приводящие к полному и необратимому изменению ее структуры:

- 1) удаление химически связанной воды ( $500-600^{\circ}\text{C}$ );
- 2) разложение обезвоженной глины на оксиды ( $800-900^{\circ}\text{C}$ );
- 3) образование новых водостойких и тугоплавких минералов ( $1000-1200^{\circ}\text{C}$ );
- 4) образование некоторого количества расплава из легкоплавких компонентов глины ( $900-1200^{\circ}\text{C}$ );
- 5) образование прочного камневидного материала за счет связывания твердых частиц образовавшимся расплавом.

Керамику классифицируют по вещественному составу, составу кристаллической фазы, структуре и назначению.

По вещественному составу разновидностями керамики являются фаянс, полуфарфор, фарфор, терракота, керметы, корундовая и сверхтвердая керамика, и каменная масса.

По составу кристаллической фазы различают керамику из чистых оксидов ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{BeO}$  и др.) и бескислородную ( $\text{SiC}$ ,  $\text{MoSi}_2$ ,  $\text{TiB}_2$  и др.).

По структуре керамика делится на плотную (кирпич, блоки, черепица и др.) и пористую (канализационные трубы, плитка для полов и др.).

По назначению керамику делят на конструкционную, инструментальную, техническую и бытовую.

**Древесные материалы.** Роль древесины как строительного материала весьма велика. Широко применяется древесина и в машиностроении: детали конструкции вагонов, борта, пол, модельная оснастка, тара и т.п.

Древесина – это природный материал растительного происхождения, в ее состав входит целлюлоза ( $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ ) и другие компоненты.

Достоинствами древесины являются обрабатываемость резанием, хорошая сопротивляемость ударным и вибрационным нагрузкам; малая теплопроводность; высокая стойкость к ряду масел, кислот, солей; малый коэффициент температурного расширения; возможность скрепления с помощью склеивания, гвоздей; способность удерживать шурупы, гвозди и другие свойства.

Недостатками древесины являются гигроскопичность, изменяющая размеры, форму и прочность деревянных изделий, гниение и возгораемость.

При использовании древесных материалов необходимо учитывать пороки древесины, т.е. отклонения от нормального строения, а также повреждения, которые оказывают влияние на ее свойства. В зависимости от причин появления пороки можно условно разделить на следующие группы:

- пороки, зависящие от неправильного роста древесины (сучки, трещины, пороки формы ствола и строения древесины, химические окраски);
- повреждения древесины грибами;
- биологические повреждения древесины насекомыми (червоточина), паразитными растениями и птицами;
- механические повреждения, инородные включения, пороки обработки и покоробленности.

Искусственные материалы, получаемые из древесины путем распиливания, измельчения волокон, склеивания и других процессов, называются древесными изделиями. Их изготавливают по наиболее распространенным технологиям в следующих видах:

- слоистые материалы (фанеры), путем склеивания слоев шпона под действием давления и тепла;
- древесностружечные плиты, путем горячего прессования древесной стружки и клея;
- древесноволокнистые плиты, путем склеивания или горячего прессования древесных волокон;
- облегченные плиты (фибrolит), путем прессования длинных стружек и минерального связующего вещества.

## **ЛЕКЦИЯ 9**

### **Способы получения заготовок**

#### *План лекции 9*

##### *Раздел 11. Способы получения заготовок.*

Тема 11.1. Сущность литейного производства. Литейные свойства. Дефекты. Сущность обработки металлов давлением. Виды обработки металлов давлением. Свариваемость сталей. Сущность сварки. Физико-механические основы обработки материалов резанием.

Заключение.

Современными рациональными и распространенными в промышленности является 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.

**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. 34, 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. 34. 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. 35, а показана литейная форма для тройника.

Форма обычно состоит из нижней 2 и верхней 6 полуформ, которые изготавливают по литейным моделям 7 (рис. 35, 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 изготовляют по стержневым ящикам (рис. 35, 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. 35, е).

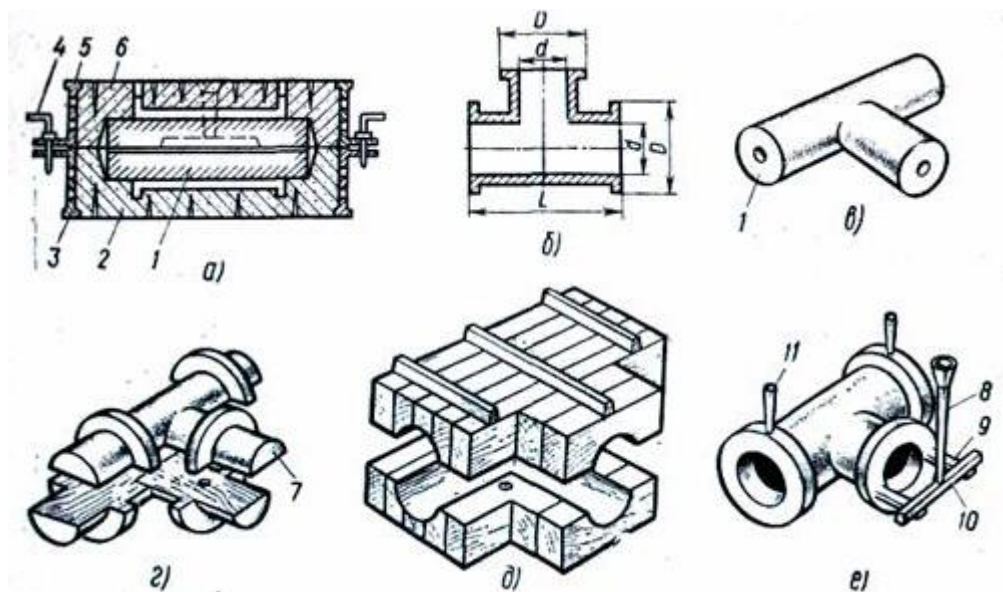


Рис. 19. Литейная форма и ее элементы.

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.

**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 приближенно 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. 36, 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.

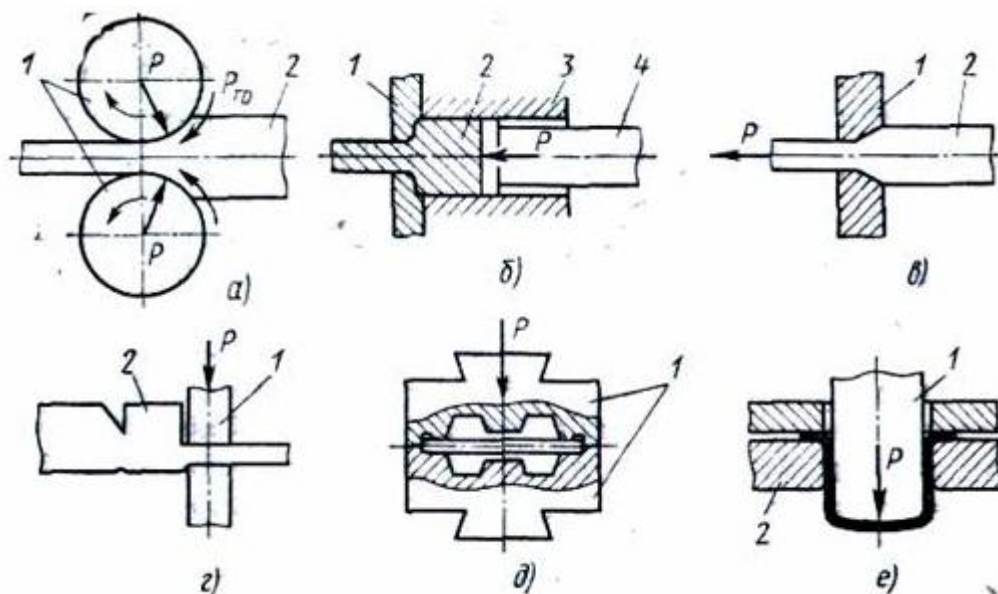


Рис. 36. Схемы основных методов обработки металлов давлением.

**Прессование** (рис. 36, 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. 36, 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. 36, 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 изготовляют свой штамп). Различают объемную и листовую штамповку.

При *объемной штамповке* сортового металла (рис. 36, 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. 36, е) получают плоские и пространственные полые детали из заготовок, у которых толщина значительно меньше размеров в плане (лист, лента, полоса). Обычно заготовка деформируется с помощью пуансона 1 и матрицы 2.

**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 материала 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).

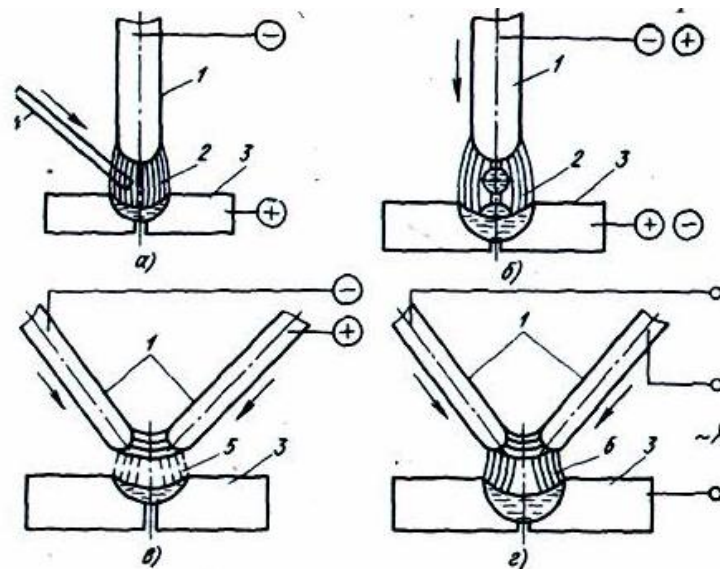


Рис. 37. Схемы дуговой сварки.

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 процессе 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).

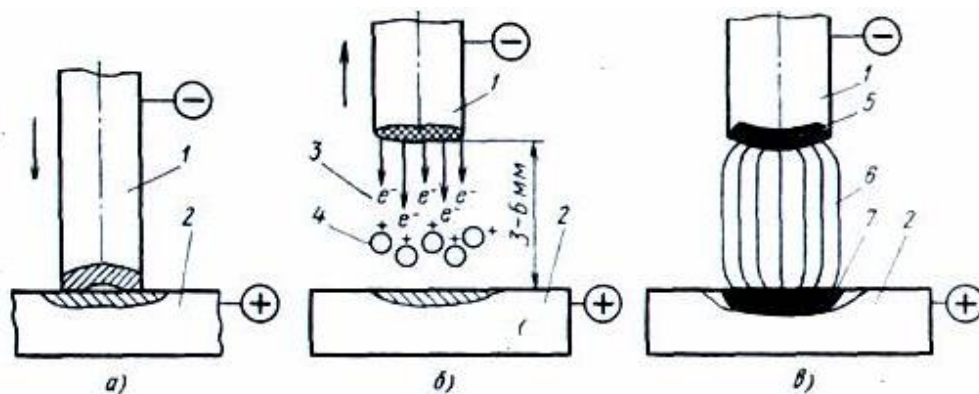


Рис. 38. Схема процесса зажигания дуги.

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 revolverной 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. 38). 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  $s_{пр}$ , 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. 38, а).

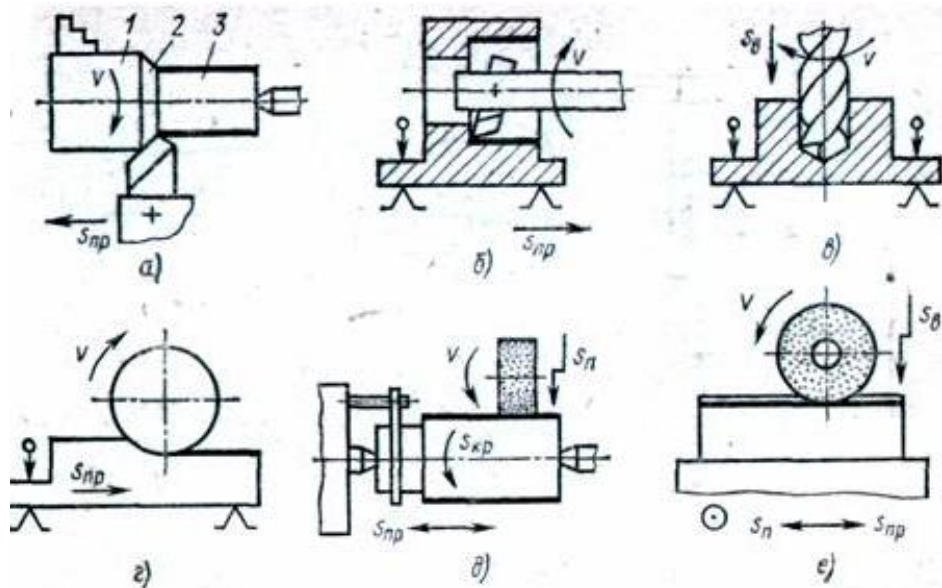


Рис. 38. Схемы обработки заготовок:

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

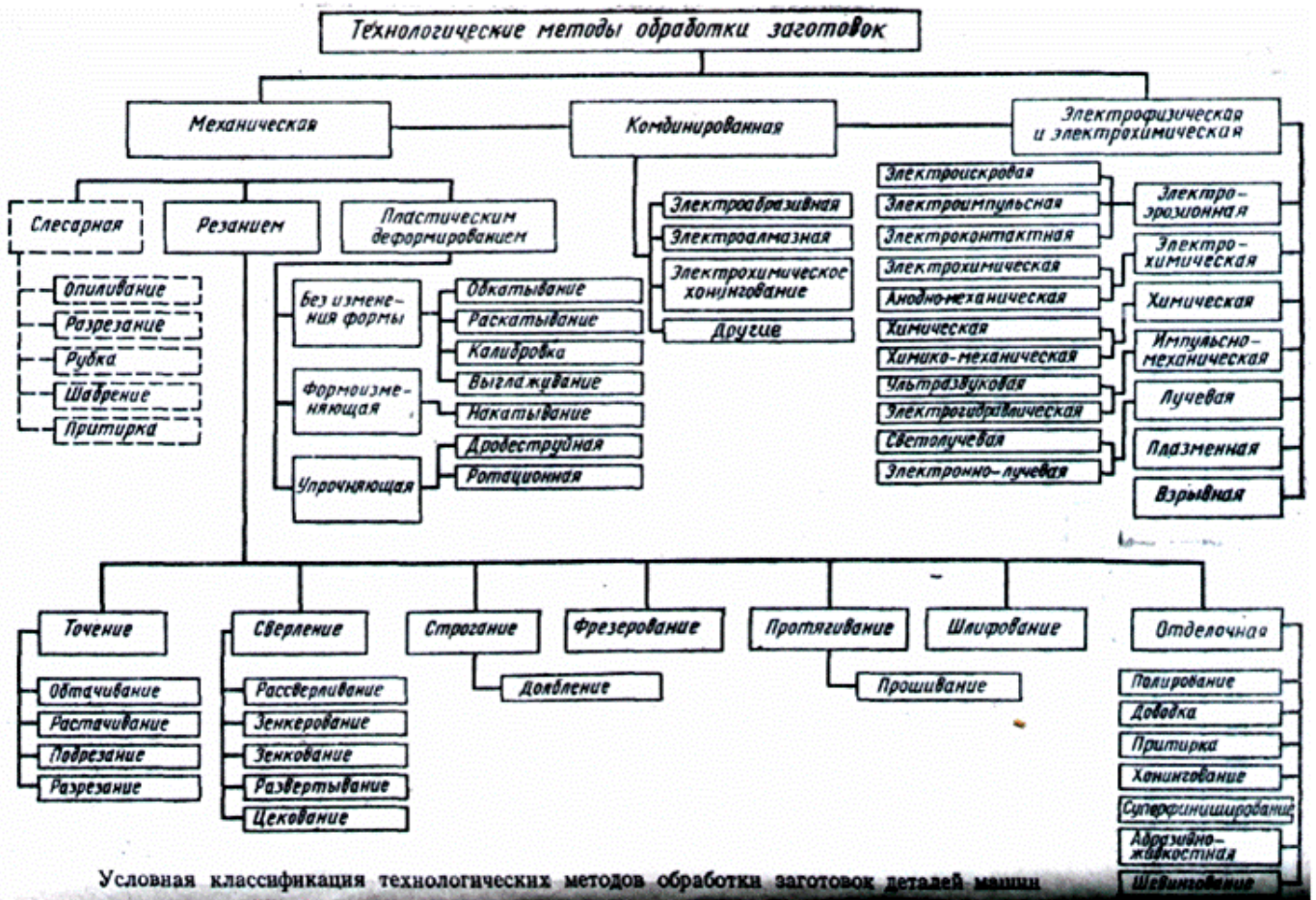


Рис. 39. Условная классификация технологических методов заготовок деталей машин

## **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 Петча). 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 качест-



венных 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. Волков Г.М., Зуев В.М. Материаловедение: учебник для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 440 с. – ISBN 978-5-7695-4248-0
2. Гелин Ф.Д. Металлические материалы: Справочник. Минск: Высшая школа, 1987. – 368 с.
3. Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г. Материаловедение. Методы анализа, лабораторные работы и задачи. Учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1989. – 456 с. – ISBN 5-229-00228-X
4. Гуляев А.П. Металловедение. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
5. Дриц М.Е., Москалев М.А. Технология конструкционных материалов и материаловедение: учебник для вузов. М.: Высш. шк., 1990. – 447 с. – ISBN 5-06-000144-X
6. Журавлев В.Н., Николаева О.И. Машиностроительные стали: Справочник. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с. – ISBN 5-217-01306-0
7. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. – 2-е изд. - М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
8. Композиционные материалы: Справочник/ В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.; Под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.

9. Конструкционные материалы: Справочник/ Б.Н. Арзамасов, В.А. Брострем, Н.А. Буше и др.; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с. – ISBN 5-217-01112-2
10. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с. – ISBN 5-217-00858-X
11. 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
12. Материаловедение: учебник для вузов / В.Б. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др.; Под ред. В.Б. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 648 с. – ISBN 5-7038-1860-5
13. Материаловедение: учебник для вузов / В.Б. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др.; Под ред. В.Б. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 648 с. – ISBN 5-7038-1860-5
14. Материаловедение и технология металлов: учебник для вузов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др.; Под ред. Г.П. Фетисова. – 4-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2006. – 862 с. – ISBN 5-06-004418-1
15. Мозберг Р.К. Материаловедение. – 2-е изд., перераб. – М.: Высшая школа, 1991. – 448 с.
16. Моряков О.С. Материаловедение: учеб. для студ. учрежд. сред. проф. образования. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 240 с. – ISBN 978-5-7695-4253-4
17. Рогов В.А., Позняк Г.Г. Современные машиностроительные материалы и заготовки: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 336 с. – ISBN 978-5-7695-4254-1
18. Сильман Г.И. Материаловедение. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 336 с.
19. Сильман Г.И. Материаловедение: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 336 с. – ISBN 978-5-7695-4255-8
20. Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И. Материаловедение: учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2004. – 736 с. – ISBN 5-93808-075-4
21. 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.
22. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справочник/ Под ред. Л.С. Ляховича. – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
ЛЕКЦИЯ 1 .....	6
ЛЕКЦИЯ 2 .....	13
ЛЕКЦИЯ 3 .....	27
ЛЕКЦИЯ 4 .....	36
ЛЕКЦИЯ 5 .....	44
ЛЕКЦИЯ 6 .....	51
ЛЕКЦИЯ 7 .....	66
ЛЕКЦИЯ 8 .....	74
ЛЕКЦИЯ 9 .....	79
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	88
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	89