

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

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

Картонова Любовь Владимировна

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Курс лекций

по дисциплине «Материаловедение» для студентов ВлГУ,
обучающихся по направлению 151900 «Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств» (сокращенная форма обучения)»

Владимир – 2014 г.

Курс лекций по дисциплине «Материаловедение» для студентов ВлГУ, обучающихся по направлению 151900 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» (сокращенная форма обучения)/ Владим. гос. ун-т; Сост.: Л.В.Картонова. Владимир. 2014. - 87 с.

Содержит курс лекций по дисциплине «Материаловедение». Разработано для студентов ВлГУ, обучающихся по направлению 151900 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». Могут быть использованы студентами технических направлений подготовки очной и заочной формы обучения

Библиогр.: 27 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.

Цель дисциплины "Материаловедение" состоит в обучении студентов научным основам выбора материала с учетом его состава, структуры, термической обработки и достигающихся при этом эксплуатационных и технологических свойств, необходимых для машиностроения.

В результате освоения данной дисциплины у студентов формируются основные общекультурные и профессиональные компетенции, отвечающие требованиям ФГОС по направлению 151900 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» к результатам освоения ООП ВПО.

Таблица 1. Результаты обучения (компетенции) выпускника ООП

Код	Результат обучения (компетенция) выпускника ООП
1	2
ОК-1	Способность к общению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения, культурой мышления
ОК-2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь
ОК-3	Способность к кооперации с коллегами, работе в коллективе
ОК-4	Способность находить организационно – управленческие решения в нестандартных ситуациях и готовностью нести за них ответственность

1	2
ОК-10	Способность использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования
ПК-2	Способность выбирать основные и вспомогательные материалы для изготовления изделий машиностроения, способы реализации основных технологических процессов, аналитические и численные методы при разработке их математических моделей
ПК-9	Способность принимать участие в разработке средств технологического оснащения машиностроительных производств
ПК-10	Способность участвовать в разработке проектов модернизации действующих машиностроительных производств, создании новых
ПК-19	Способность использовать информационные, технические средства при разработке новых технологий и изделий машиностроения
ПК-23	Способность выбирать материалы и оборудование и другие средства технологического оснащения и автоматизации для реализации производственных и технологических процессов
ПК-24	Способность участвовать в организации эффективного контроля качества материала, технологических процессов, готовой машиностроительной продукции
ПК-52	Способность выбирать методы и средства измерения эксплуатационных характеристик изделий машиностроительных производств, анализировать их характеристику

Согласно ФГОС ВПО направления 151900 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» (квалификация (степень) бакалавр) «Материаловедение» - дисциплина базовой (общепрофессиональной) части профессионального цикла Б.3 ООП ВПО.

Дисциплину «Материаловедение» студенты изучают во 2-м семестре.

Для успешного усвоения студентами курса "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.

Результаты изучения дисциплины используются в дальнейшем при изучении курсов профессионального цикла Б.3: технологические процессы в машиностроении, резание материалов, технология машиностроения и др., а также при курсовом проектировании и выполнении квалификационной работы.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

знать: основные группы современных материалов, их свойства и области применения; физическую сущность явлений, происходящих в материалах в условиях производства под воздействием внешних факторов (нагрева, охлаждения и др.), их влияния на структуру, а структуры – на свойства современных металлических и неметаллических материалов (ОК-1; ПК-2);

уметь: обобщать и анализировать информацию; анализировать фазовые превращения при нагревании и охлаждении сплавов, пользуясь диаграммами состояния двойных систем; работать на световом микроскопе; выявлять на шлифах типичные структурные составляющие; проводить металлографический анализ промышленных сталей и чугунов, цветных металлов и сплавов; определять твердость и механические свойства при статических и динамических испытаниях; анализировать результаты этих испытаний для сравнительной оценки сплавов и неметаллических материалов. Принимать технически обоснованные решения по выбору материалов (ОК-1, 2, 3, 4, 1; ПК-2, 9, 10, 19, 23, 24);

владеть: практическими навыками исследования и контроля материалов (ПК-52).

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

Таблица 2. Распределение лекционной нагрузки по формам проведения

№ п/п	Раздел дисциплины	Объем нагрузки (в часах)	
		Лекции в традиционной форме	Лекции-консультации в активной форме
Модуль I			
1	Раздел 1. Введение. Классификация материалов. Кристаллическое строение металлов.	2	
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
Модуль II			
6	Раздел 6. Сплавы на основе железа.	2	5
Модуль III			
7	Раздел 7. Цветные металлы и сплавы.		1,5
8	Раздел 8. Композиционные материалы.		1
9	Раздел 9. Наноструктурные материалы.		1
10	Раздел 10. Повышение надежности и долговечности деталей машин.		1
11	Раздел 11. Научные основы выбора материалов.	0,5	
Итого		6	12
Всего лекционной нагрузки		18	

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 «Материаловедение». Надежность деталей машин. Классификация материалов.

Тема 1.2. Кристаллическое строение металлов. Кристаллографические индексы. Дефекты кристаллов и их влияние на свойства. Краевые и винтовые дислокации. 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:

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

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

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

ε – 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 свойствам 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 $_{\beta}$, Fe $_{\alpha}$ и др.), гранецентрированную кубическую (Ca $_{\alpha}$, Ce, Ag, Au, Cu, Fe $_{\gamma}$, Ni и др.) и гексагональную плотноупакованную (Mg, Ti $_{\alpha}$, Zn, Ca $_{\beta}$ и др.).

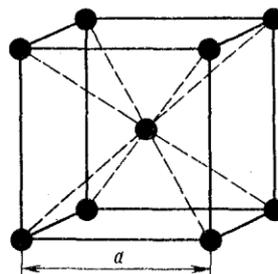


Рис.1. Объемно центрированная кубическая (ОЦК) кристаллическая решетка.

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.

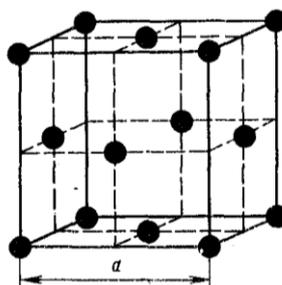


Рис.2. Гранецентрированная кубическая (ГЦК) кристаллическая решетка.

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.

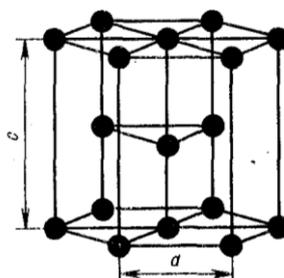


Рис.3. Гексагональная плотноупакованная (ГПУ) кристаллическая решетка.

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).

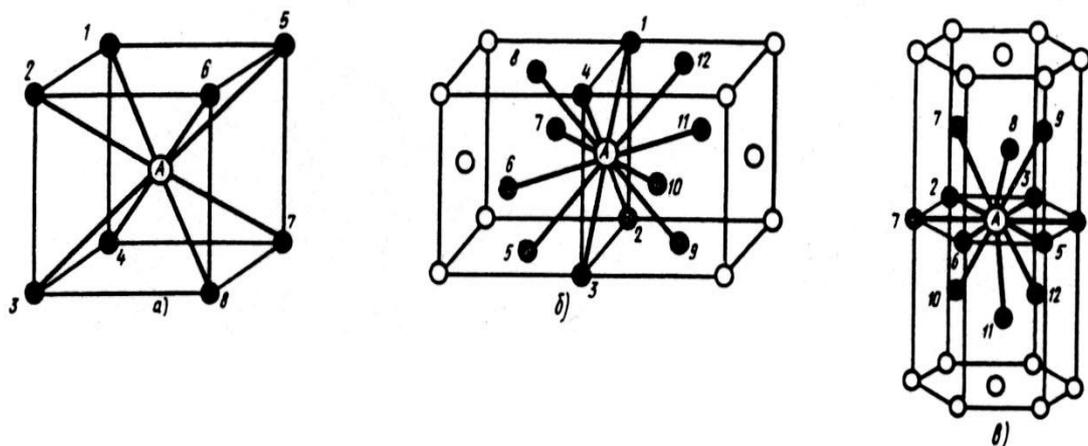


Рис.4 .Координационное число в различных кристаллических решетках для атома А:
 а - объемно центрированная кубическая (К8);
 б – гранецентрированная кубическая (К12);
 в - гексагональная плотноупакованная (Г12).

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.

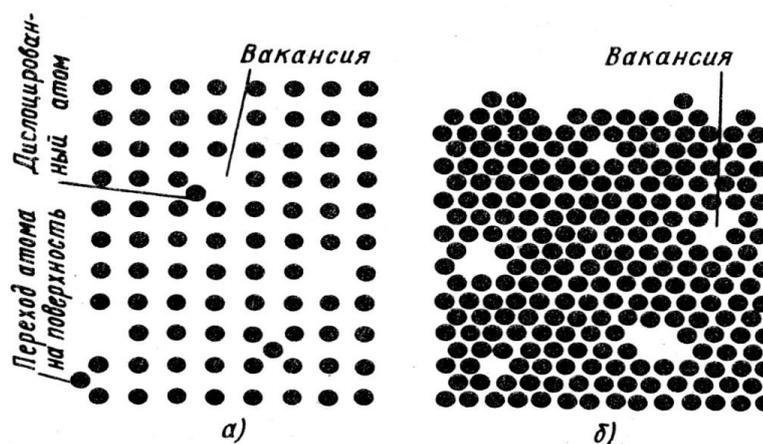


Рис.5. Точечные дефекты кристаллической решетки

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.

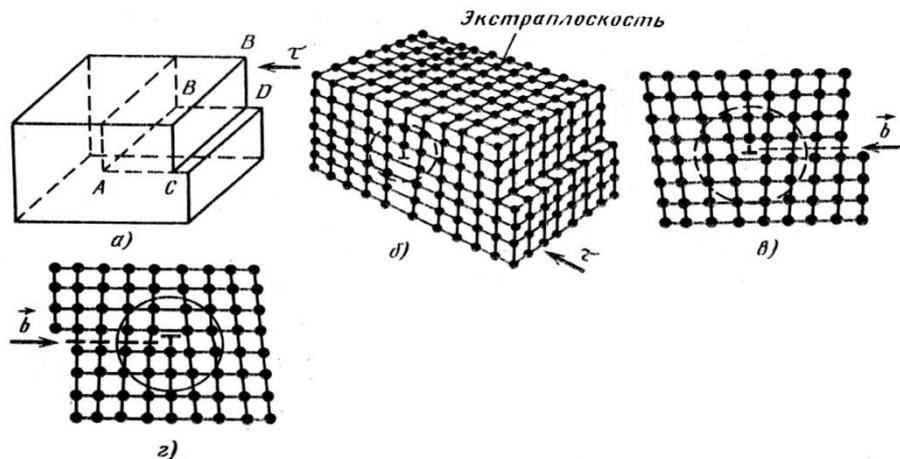


Рис.6. Краевые дислокации (τ – вектор сдвига):
 а – сдвиг, создавший краевую дислокацию;
 б – пространственная схема краевой дислокации;
 в, г – схемы расположения атомов у дислокаций

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° , 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 σ_T – предел текучести;

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

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

d – средний поперечник блока (зерна).

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

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

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

σ_K – напряжения, необходимые для преодоления дислокацией облаков Коттрелла;

σ_D – напряжения, необходимые для преодоления дислокацией дисперсных частиц;

H_{III} – напряжения III рода.

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

ЛЕКЦИЯ 2

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. Рентгеноструктурное исследование металлов. Возникновение рентгеновских лучей. Оборудование, используемое при рентгеноструктурном анализе.

Тема 2.3. Методы измерения твердости (методы Бринелля, Роквелла, Виккерса, микротвердость, Польди, Шора, Мооса).

Раздел 3. Пластическая деформация и рекристаллизация металлов.

Тема 3.1. Влияние наклепа на свойства металлов. Использование наклепа в машиностроении. Разрушение металла. Сверхпластичность материалов.

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

Раздел 4. Законы кристаллизации металлов.

Тема 4.1. Законы кристаллизации металлов. Свободная энергия и энтропия. Скрытая теплота кристаллизации. Несамопроизвольная кристаллизация. Аморфные металлы.

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.

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 снятия 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 взаимодействия тормозит дальнейшее их перемещение.

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

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.

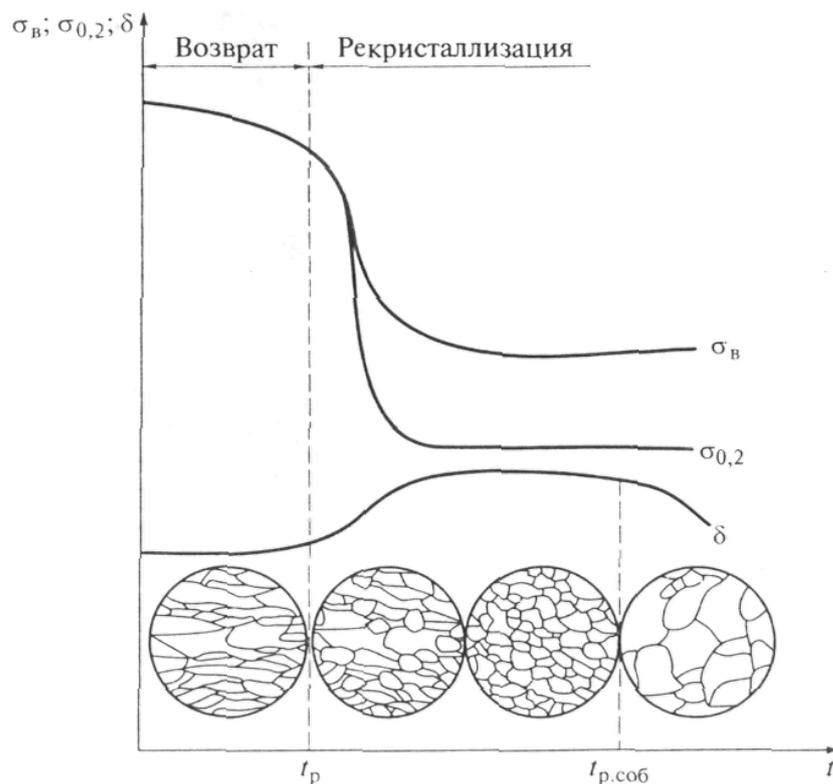


Рис.7. Влияние нагрева на механические свойства (предел прочности σ_v , предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение δ) и изменение структуры деформированного металла: t_p – температура рекристаллизации; $t_{p,соб}$ – температура собирательной рекристаллизации

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

В процессе можно выделить две стадии. При более низких температурах (ниже $0,2 \cdot T_{пл}$, где $T_{пл}$ – абсолютная температура плавления) 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 α – коэффициент, зависящий от состава и структурного состояния металла (для чистых металлов $\alpha = 0,1-0,2$; для металлов технической чистоты $\alpha = 0,3-0,4$; для сплавов $\alpha = 0,6-0,8$); $T_{пл}$ – абсолютная температура плавления, К.

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

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

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

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

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 ΔT_1 , а для плавления - перегрев ΔT_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 ΔT_1 и начинается кристаллизация. При этом выделяется некоторое количество теплоты кристаллизации Q_2 . Если $Q_2 < Q_1$, то охлаждение продолжается, ΔT 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*.

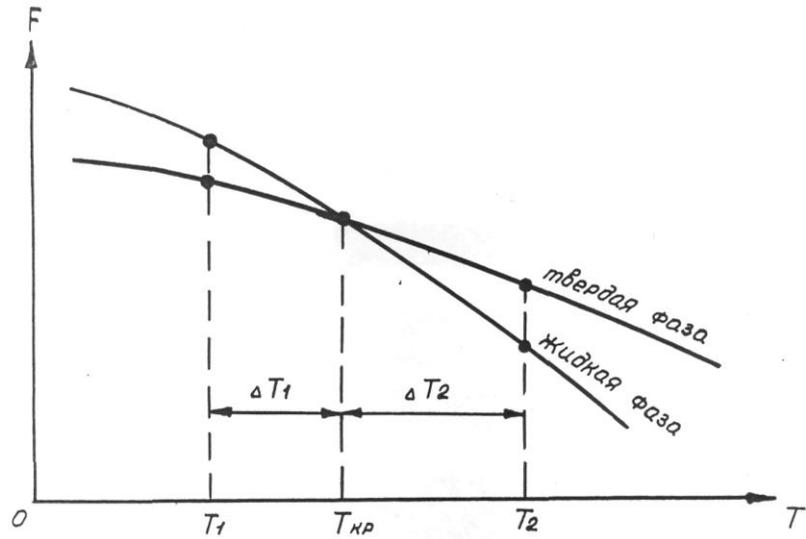


Рис.8. Изменение энергии Гиббса F (свободной энергии) металла в жидком и твердом состояниях в зависимости от температуры ($T_{кр}$ – температура, при которой происходит кристаллизация)

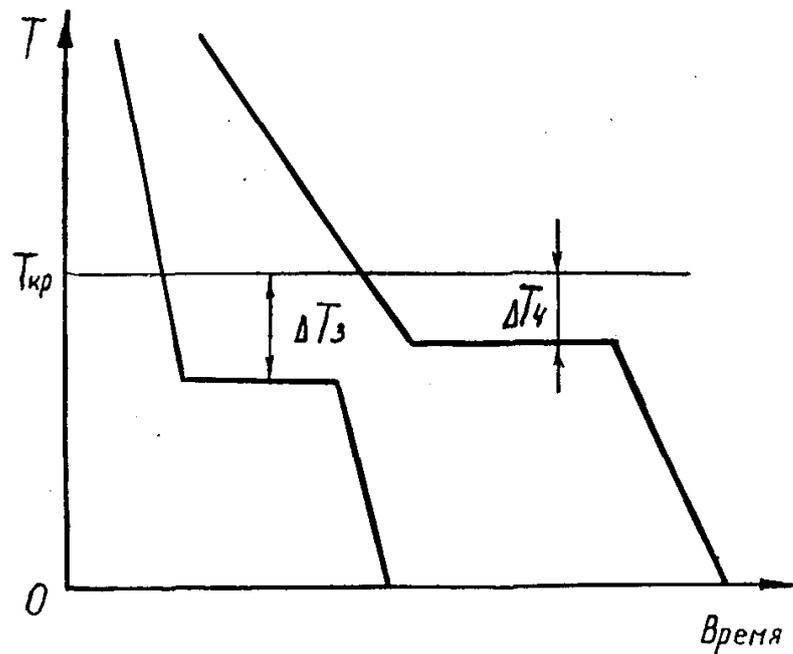
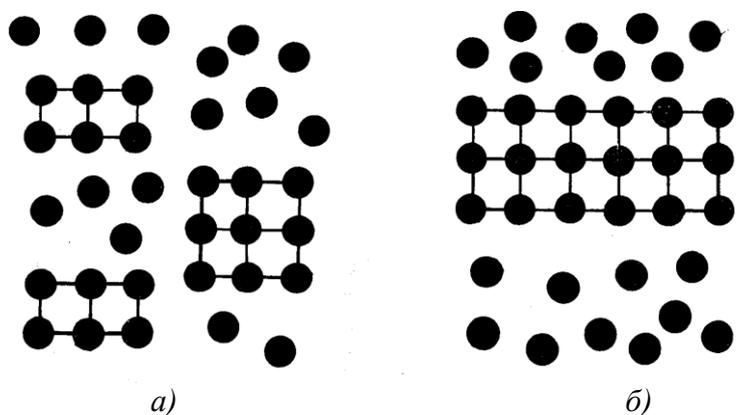


Рис.9. Кривые охлаждения

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.

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.

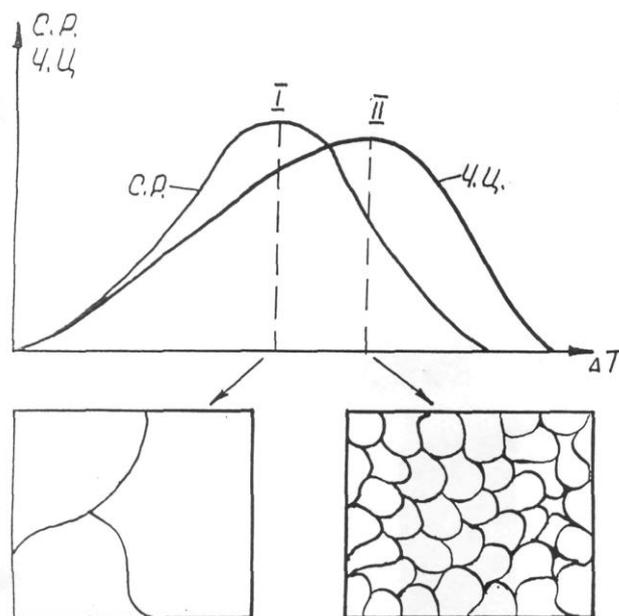


Рис. 11. Скорость зарождения центров кристаллизации (ч.ц.) и скорость роста кристаллов (с.р.) в зависимости от степени переохлаждения

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 большее 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.

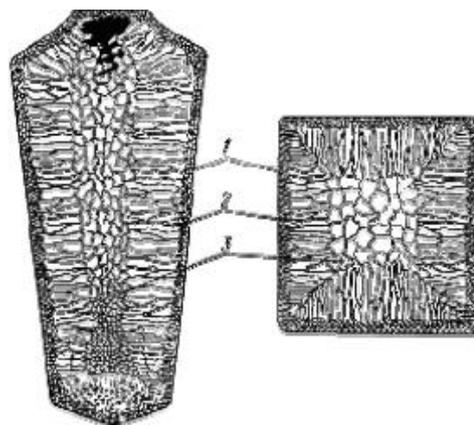
Форма кристаллических образований. Реально протекающий процесс кристаллизации усложняется действием различных факторов, в столь сильной степени влияющих на процесс, что роль степени переохлаждения может оказаться второстепенной. При кристаллизации из жидкого состояния для скорости течения процесса и 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. Термический анализ. 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);

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

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

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

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

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

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

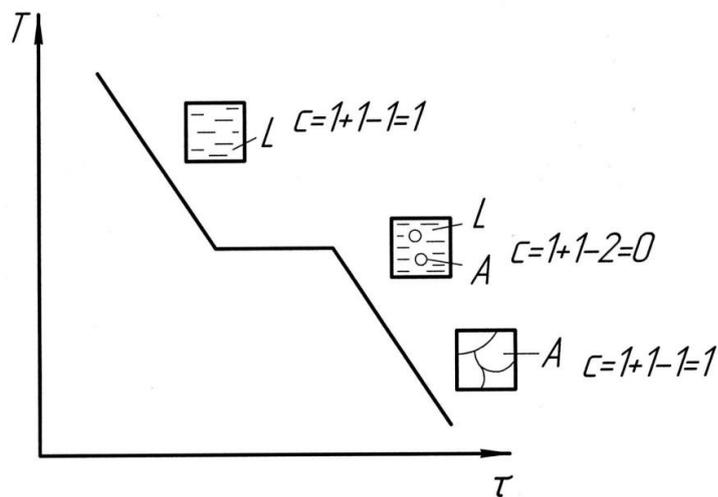


Рис. 14. Кривая охладения чистого металла

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

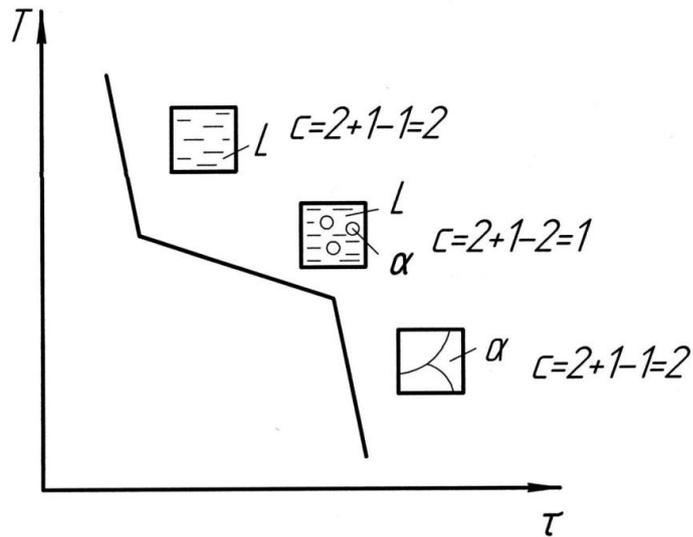


Рис.15. Кривая охлаждения сплава

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 охладений (рис.16).

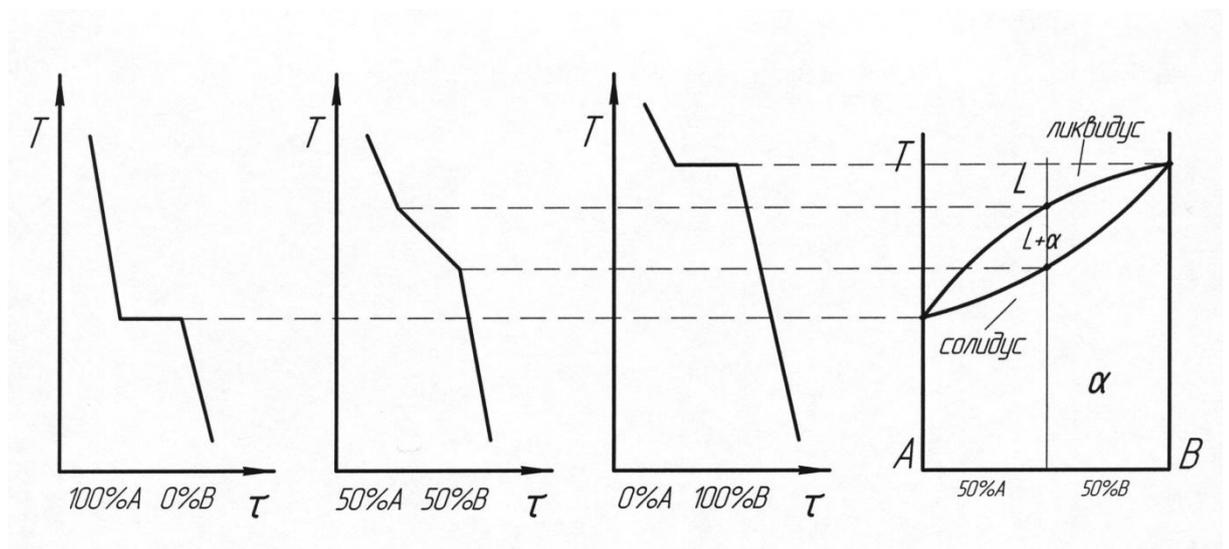


Рис.17. Построение диаграммы состояния двухкомпонентного сплава

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 α . 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 α и твердый раствор α .

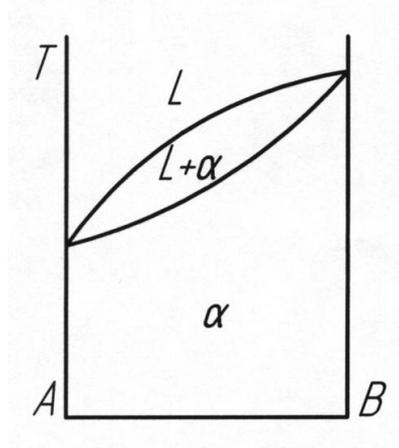


Рис.18. Диаграмма состояния сплавов, образующих неограниченные твердые растворы

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.

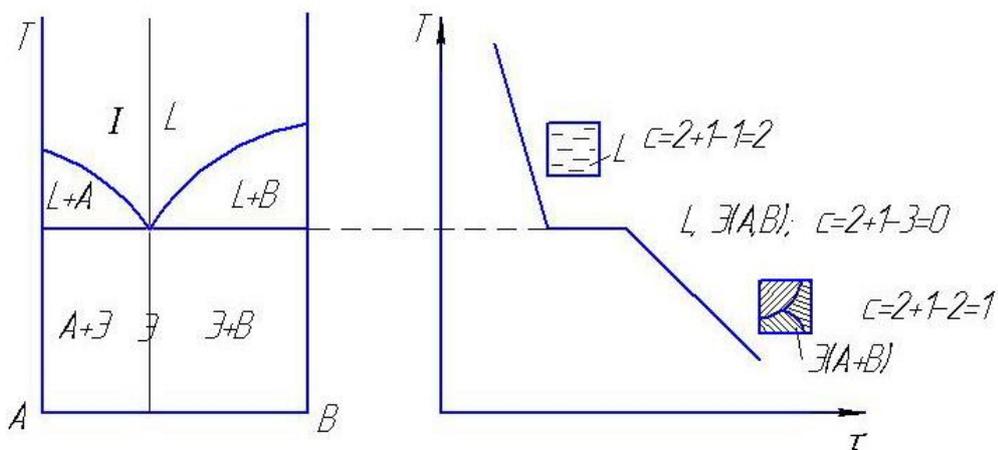


Рис.19. Диаграмма состояния и кривая охлаждения сплавов, образующих механические смеси из чистых компонентов

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).

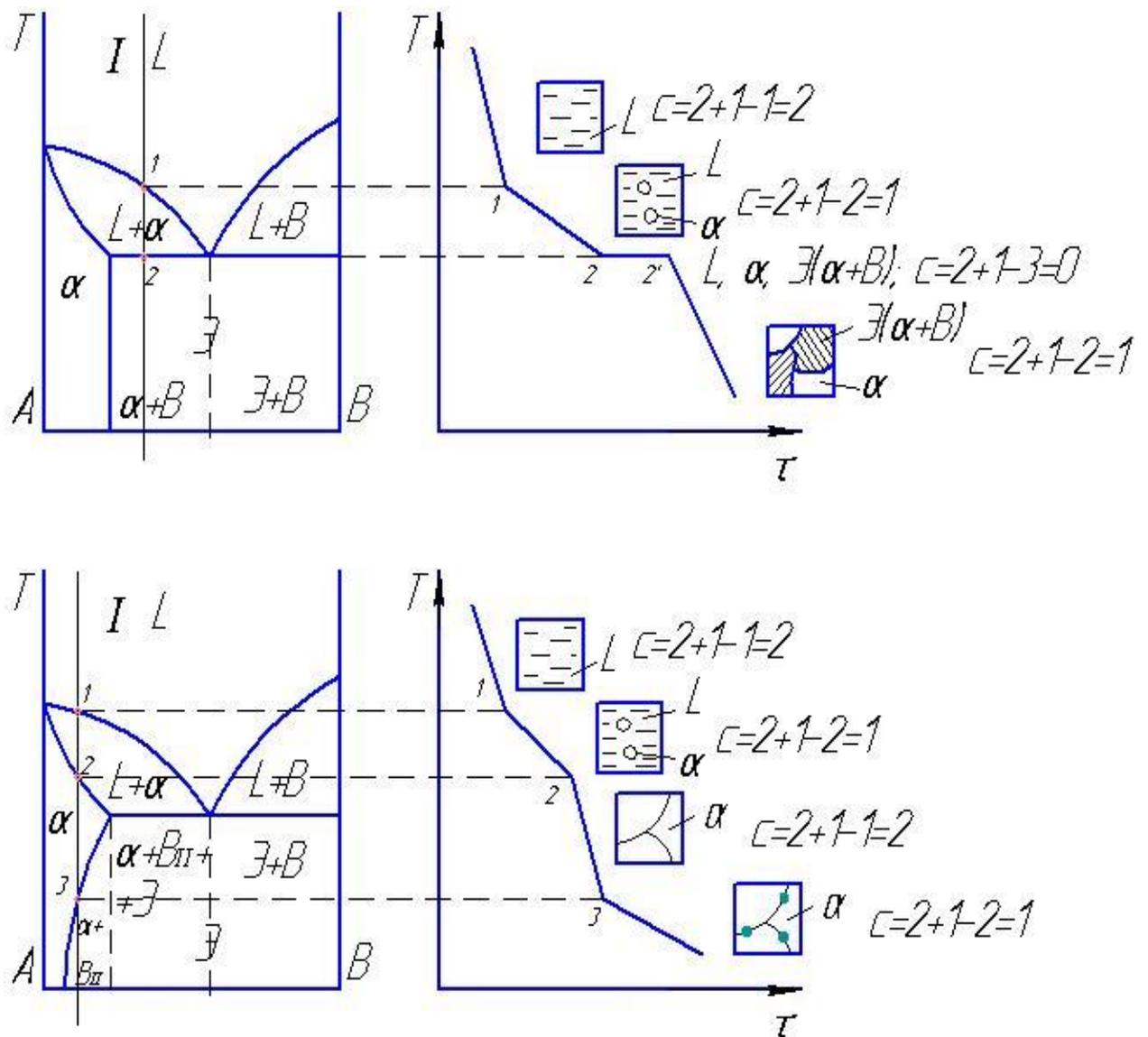


Рис. 20. Диаграммы состояния и кривые охлаждения сплавов, образующих ограниченные твердые растворы с постоянной и переменной растворимостью

В сплавах такого рода возможно существование: жидкой фазы L , жидкого раствора компонента В в А, который будет называться α -раствором, и (или) твердого раствора компонента А в В, который обозначается через β . В этих сплавах возможно неинвариантное равновесие при одновременном сосуществовании трех фаз: L , α и β ; в данном случае (рис. 20): L , α 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).

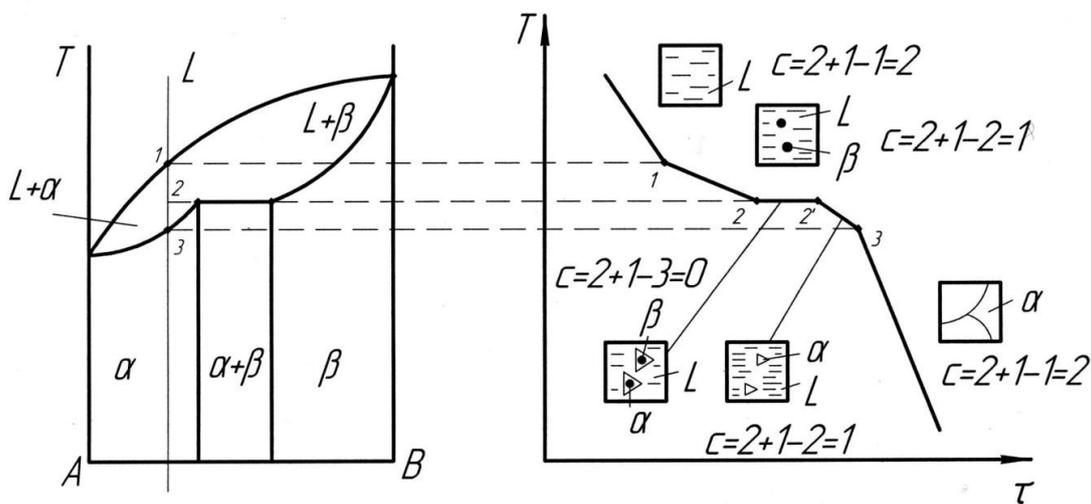


Рис. 21. Диаграмма состояния и кривая охлаждения сплавов с перитектическим превращением

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.

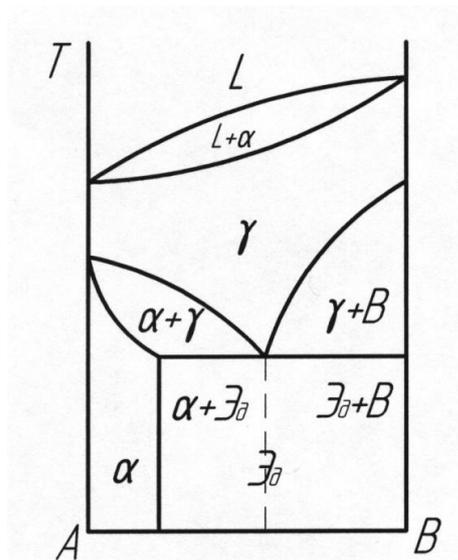


Рис. 22. Диаграмма состояния сплавов, испытывающих полиморфные превращения

Видно, что ниже некоторой температуры образовавшийся твердый раствор γ распадается в механическую смесь, которая подобна эвтектике, но образуется не из жидкой фазы, а из твердого раствора и называется *эвтектоидом*. В данном случае $\Xi_0 = \alpha + \beta$.

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):

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

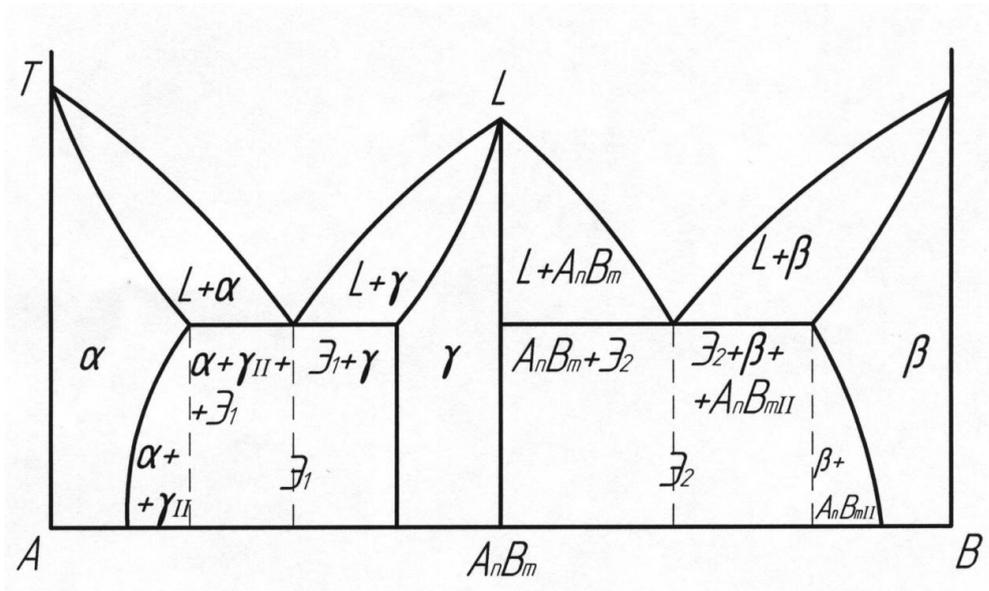


Рис.23. Диаграмма состояния сплавов, образующих химические соединения

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

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

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

Диаграмма состояния железо-углерод в интервале концентрации от железа до цементита представлена на рис. 24.

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

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

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

феррит - твердый раствор углерода в Fe- α , обозначается буквой Φ ;

аустенит - твердый раствор углерода в Fe- γ , обозначается буквой А.

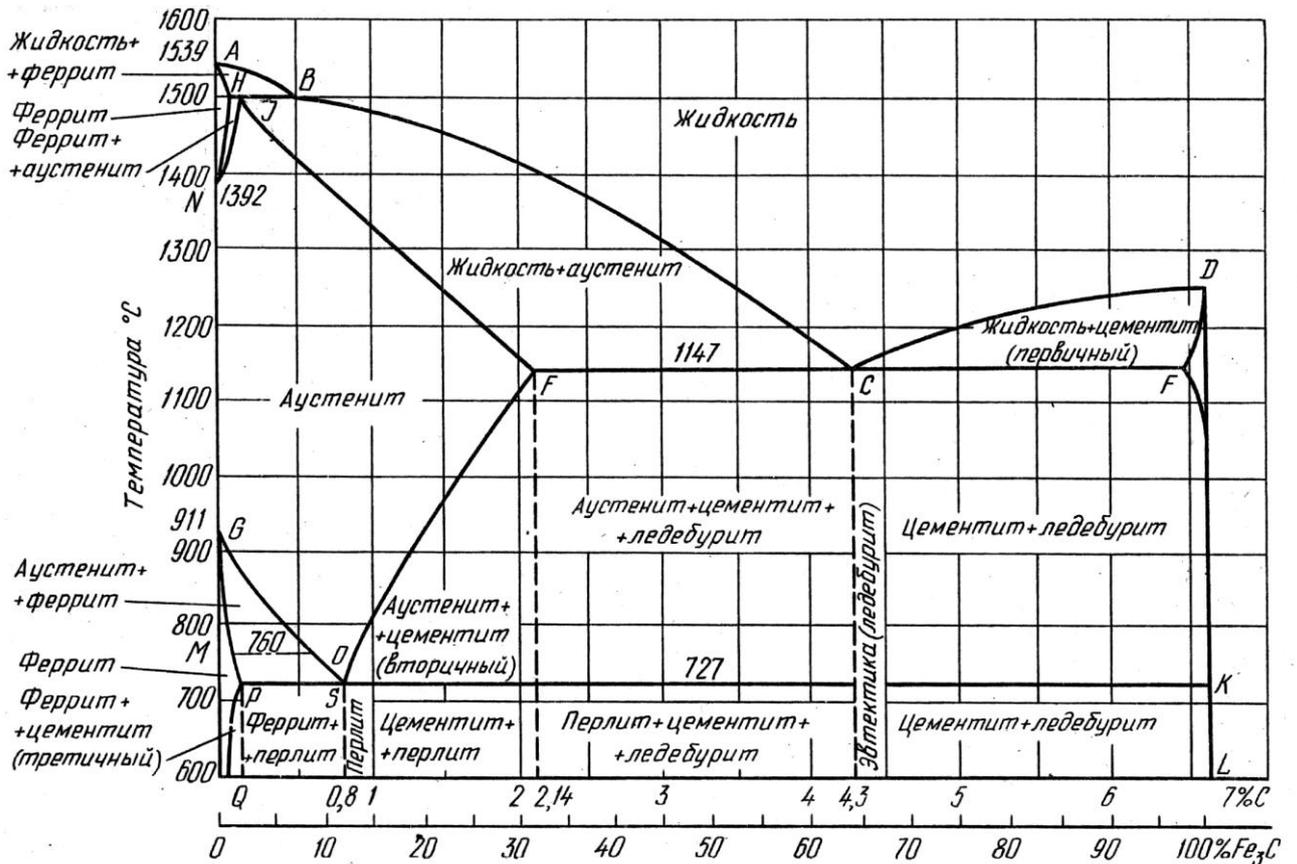


Рис. 24. Диаграмма состояния железо-углерод.

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°C (линия HJB) протекает перитектическая реакция:

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

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

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

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

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

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.

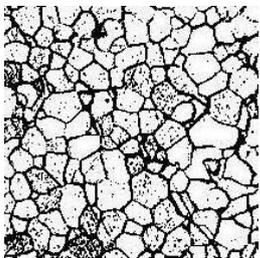
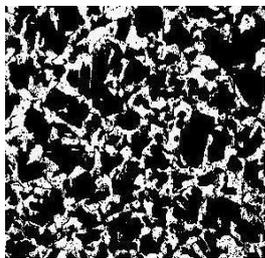
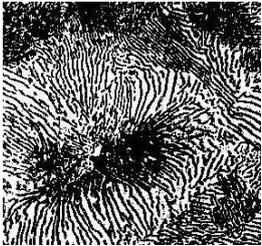
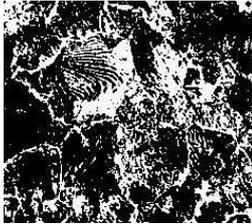
Арко-железо (феррит)		Доэвтектоидная сталь (феррит и перлит)	
			
Эвтектоидная сталь (пластинчатый перлит)	Эвтектоидная сталь (зернистый перлит)	Заэвтектоидная сталь (перлит и цементит)	
			

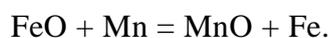
Рис.25. Микроструктуры углеродистых сталей

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.

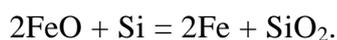
Марганец. Его вводят в любую сталь для раскисления, т.е. для устранения вредных примесей закиси железа:



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.

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 988⁰С.

Наличие легкоплавкой и хрупкой эвтектики, расположенной, как правило, по границам зерен, делает сталь хрупкой при 800⁰С 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 988⁰С, 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 1620⁰С, 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 α - 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 (Fe_3C), поэтому этот чугун очень твердый и хрупкий. Структурные превращения происходят в соответствии с диаграммой Fe- Fe_3C . При кристаллизации белых чугунов образуется эвтектика - ледебурит. Как указывалось выше, ледебурит - это механическая смесь аустенита и цементита. Он образуется при температурах $1147^{\circ}C$; при $727^{\circ}C$ аустенит, входящий в состав ледебурита, превращается в перлит; ниже $727^{\circ}C$ ледебурит представляет собой смесь перлита и цементита.

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



Рис.26. Микроструктуры белых чугунов

Свойства чугуна определяются структурой металлической основы и формой графита.

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

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



Рис.27. Микроструктуры чугунов

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

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

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).

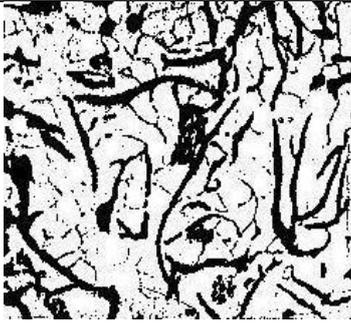
Серый чугун		
на ферритной основе	на феррито-перлитной основе	на перлитной основе
		

Рис.28. Микроструктуры серых чугунов

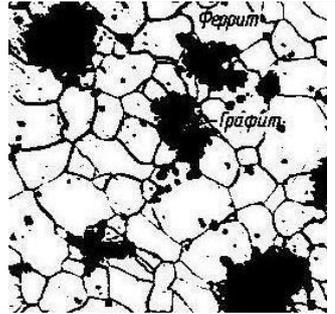
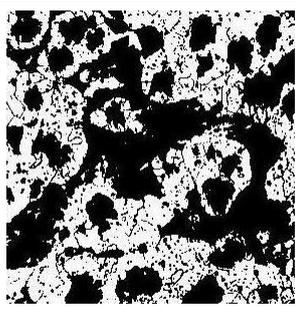
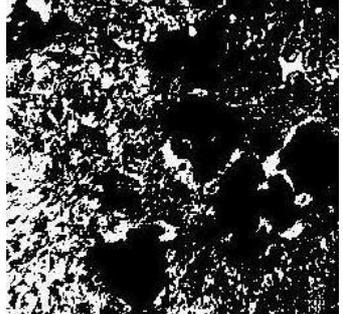
Ковкий чугун		
на ферритной основе	на феррито-перлитной основе	на перлитной основе
		

Рис.29. Микроструктуры ковких чугунов

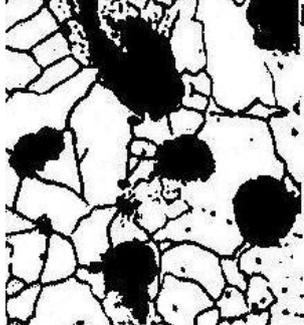
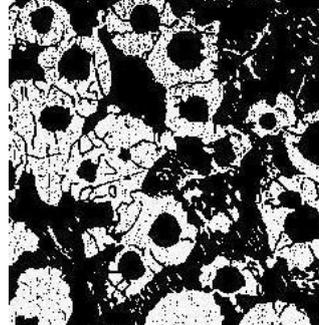
Высокопрочный чугун	
на ферритной основе	на феррито-перлитной основе
	

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 - 950⁰С). В момент затвердевания эвтектика состоит из аустенита, обогащенного фосфором, цементита и фосфида железа (Fe₃P).

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

ЛЕКЦИЯ 5

Сплавы на основе железа (продолжение)

План лекции 5

Раздел 6. Сплавы на основе железа.

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.

Тема 6.6. Роль поверхностного слоя. Поверхностная закалка.

Тема 6.7. Деформационное упрочнение поверхности.

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, в результате которых в предварительно закаленных металлах происходят превращения, приближающие их структуру к равновесной.

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

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

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

В технологических процессах ТО **распад аустенита** (перлитное превращение) происходит в условиях непрерывного охлаждения и иногда изотермически (при постоянной темпе-

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

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

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

мартенсита образуется большое количество остаточного аустенита.

Мартенсит – неравновесная фаза - многократно пересыщенный твердый раствор углерода в α - железе, образующийся при резком переохлаждении аустенита (охлаждение со скоростями выше критических). Возникают сильнейшие искажения кристаллической решетки, дислокации блокируются почти полностью, атомы углерода «заклинены» внутри 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 – 200⁰C сопровождается лишь перераспределением углерода в мартенсите, мартенсит обедняется углеродом и понижается степень тетрагональности, но также образуются зародыши ϵ – карбидной фазы ($Fe_{2,4}C$); такая смесь неоднородного мартенсита с пластинками ϵ – карбида называется *мартенситом отпуска*.

2) Нагрев до 200 - 300⁰C приводит к растворению ϵ – карбида и появлению быстро растущих частичек Fe_3C , что сопровождается снятием внутренних напряжений, возникающих в результате предыдущих превращений, сопровождающихся объемными изменениями. Образовавшаяся при этом структура называется *трооститом отпуска*.

3) Дальнейшее повышение температуры (выше 400⁰C) 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 (1100-1200⁰С).

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

3. Неполный отжиг - это нагрев стали выше линии A_1 на 30-50⁰С с выдержкой и медленным охлаждением. При нагреве в аустенит переходит только перлит, а феррит остается. При охлаждении получается мелкозернистый перлит, а зерно феррита не меняется. Неполный отжиг более экономичен, чем полный отжиг, но возможен лишь при не слишком крупнозернистой исходной структуре. Внутренние напряжения снимаются полностью. Неполный отжиг заэвтектонидных 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 30-100⁰С 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 фа-

зовых 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.

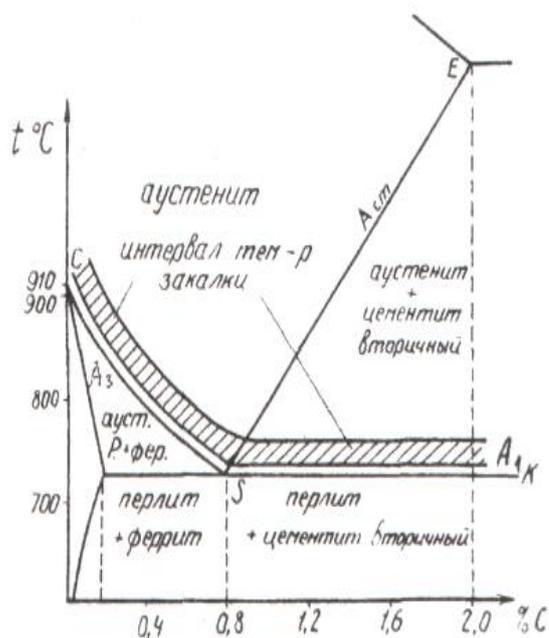


Рис. 31. Участки диаграммы $Fe-Fe_3C$
(нанесены температуры закалки)

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 °C) применяют для инструментов, цементованных, цианированных изделий, которым необходимы высокая твердость (60 - 65 HRC) и износостойкость.

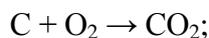
Средний отпуск (350 - 450 °C) на отпущенный троостит применяют для стальных пружин, рессор и упругих элементов приборов, которые в работе должны сочетать свойства высокой упругости, прочности и достаточной вязкости. Твердость троостита отпуска составляет 40 - 45 HRC.

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

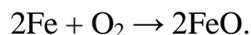
Двойная операция (закалка с высоким отпуском) называется улучшением, так как после такой термической обработки сталь приобретает наиболее благоприятное сочетание механических свойств: высокую вязкость и пластичность.

Химическое действие среды. При высокой температуре происходит химическое взаимодействие поверхности металла с окружающей средой, причем особое значение имеют два процесса:

1) *обезуглероживание* стали, связанное с выгоранием углерода в поверхностных слоях



2) *окисление* стали, ведущее к образованию на поверхности окалины, окислов железа



Интенсивность обезуглероживания и окисления стали зависит от температуры, состава стали и состава окружающей среды. Так как эти процессы диффузионные, то с повышением температуры они ускоряются.

Закаливаемость и прокаливаемость стали. Под *закаливаемостью* понимают способность стали повышать твердость в результате закалки. В первую очередь закаливаемость определяется в первую очередь содержанием углерода в стали. Чем больше в мартенсите углерода, тем выше его твердость. Стали, содержащие менее 0,35 % углерода, мало упрочняются при закалке и считаются не обладающими закаливаемостью.

Под *прокаливаемостью* понимают способность стали закаливаться на большую глубину. В момент закалки массивная деталь не может быстро охладиться на всю толщину, критическая скорость охлаждения, необходимая при закалке, достигается лишь в поверхностном слое. Структура поверхностного слоя является мартенситной или троосто-мартенситной. Тогда как слои металла, лежащие в глубине детали, охлаждаются медленно, и аустенит в них успевает распадаться в троостит, сорбит и даже в перлит.

Чем медленнее происходит превращение аустенита в перлит, чем правее расположены линии на диаграмме изотермического распада аустенита, чем глубже прокаливаемость. На скорость распада аустенита влияют следующие факторы:

– *состав аустенита*. Все элементы, растворимые в аустените (за исключением кобальта), замедляют превращение;

– *нерастворенные частицы* (карбиды, оксиды, интерметаллические соединения). Эти частицы ускоряют превращение, так как являются дополнительными центрами кристаллизации;

– *неоднородный аустенит*. Он быстрее превращается в перлит;

– *размер зерна аустенита*. Увеличение зерна замедляет превращение.

Для практической оценки прокаливаемости используют величину, которая называется *критическим диаметром*, т.е. максимальным диаметром образца, способным прокалиться насквозь. Прокаливаемость зависит не от содержания углерода, а от наличия легирующих эле-

ментов. Именно прокаливаемостью и оправдывается в основном необходимость использования более дорогостоящих легированных сталей. Однако легирующие элементы повышают прокаливаемость, только если они растворены в аустените. Если же они находятся в виде химических соединений, например карбидов, то могут облегчить распад аустенита

Способы закалки стали. Выбор оптимального способа закалки определяется составом стали, формой и размерами детали. Чем сложнее форма термически обрабатываемой детали, тем тщательнее следует выбирать условия охлаждения, потому что чем сложнее деталь и чем больше различие в сечениях детали, тем большие внутренние напряжения возникают в ней при охлаждении.

В зависимости от технологии выполнения закалку можно проводить следующими способами:

1. Закалка в одном охладителе – самый простой способ закалки, который применяется для несложных деталей из углеродистых и легированных сталей. При этом деталь погружают в закалочную среду (вода, масло и т.п.), где она остывает до полного охлаждения. Иногда крупные детали охлаждают струей воды (*струйчатая закалка*). При этом способе не образуется паровая рубашка, что обеспечивает более глубокую прокаливаемость, чем простая закалка в воде.

2. Закалка с подстуживанием позволяет уменьшить внутренние напряжения, возникающие в детали при проведении закалки. При данном способе деталь не сразу погружают в закалочную среду, а некоторое время охлаждают на воздухе, «подстуживают», поэтому проведение такого способа закалки требует большого искусства термиста.

3. Закалка в двух охладителях (например, сначала в воде, потом – в масле) позволяет быстро проходить интервал малой устойчивости аустенита, но при охлаждении его в зоне повышенной устойчивости, т.е. в мартенситном интервале температур охлаждают медленно. Такой способ закалки позволяет снизить внутренние напряжения, но при этом трудно установить и определить время пребывания детали в первой охлаждающей среде, тем более что это время мало и исчисляется секундами. В двух охладителях охлаждают инструмент, изготовленный из высокоуглеродистых сталей. Этот способ также требует хорошей отладки процесса и высокой квалификации термиста.

4. Ступенчатая закалка проводится путем быстрого охлаждения в горячей среде (например, в расплавленном металле). При данном способе деталь выдерживают в закалочной среде, имеющей температуру выше мартенситной точки для данной стали. При охлаждении и выдержке в этой среде закаливаемая деталь во всех точках сечения должна приобрести темпе-

ратуру закалочной среды. Затем следует окончательное, как правило, медленное, охлаждение, во время которого и происходит закалка, т.е. превращение аустенита в мартенсит. При этом способе закалки уменьшаются внутренние напряжения первого рода, поэтому уменьшается и закалочная деформация.

5. Изотермическая закалка также производится в горячей закалочной среде, но в отличие от ступенчатой закалки выдержка продолжается до полного распада аустенита. При этом способе закалки образуется структура не мартенсита, а бейнита, отличающегося высокой твердостью при несколько меньшей хрупкости, чем у мартенсита. Изотермической закалке (как и ступенчатой) подвергают детали малых сечений.

Закалочная среда определяет скорость охлаждения при закалке. Сильнее всего охлаждают водные растворы солей и щелочей, затем холодная вода, еще медленнее – минеральные масла, горячая вода и эмульсии. Замедление охлаждения вызывает образование паровой рубашки и ее удержанием в вязкой среде. Подбирая и комбинируя охлаждающие среды, можно добиваться различных скоростей охлаждения.

Дефекты, возникающие при закалке. Неправильно проведенная закалка может вызвать различные дефекты:

Деформация, коробления и трещины являются следствием напряжений. Медленное охлаждение при закалке в области мартенситного превращения – самый эффективный способ уменьшения напряжений и устранения дефектов этого вида. Мелкие детали, так же как и простые по форме, без острых углов и резких переходов, менее склонны к короблению. Поэтому при конструировании детали необходимо придать наиболее технологическую форму. Более сложные по форме детали целесообразно изготавливать из легированных сталей, закаливаемых в масле.

Недостаточная твердость закаленной детали объясняется недогревом (низкая температура в печи, недостаточная выдержка при правильной температуре в печи) или недостаточно интенсивным охлаждением. Повышение температуры в печи или увеличение времени выдержки в первом случае устраняет пониженную твердость закаленных деталей. Во втором случае следует применить более интенсивное охлаждение, т.е. во время закалки энергично перемещать деталь в закалочной жидкости или применять вместо простой воды соленую или подкисленную.

Образование мягких пятен можем объясняться также следствием недостаточного прогрева или недостаточно интенсивного охлаждения. Но иногда мягкие пятна появляются из-за неправильно проведенной закалки, например, образование феррита в доэвтектоидных сталях при полной закалке показывает, что произошло подстуживание стали. Кроме того, образова-

ние мягких пятен может быть вызвано неоднородностью исходной структуры. В таких случаях рекомендуется проведение предварительной термической обработки (нормализации), создающей более однородную структуру.

Повышенная хрупкость – дефект, обычно появляющийся в результате закалки от слишком высоких температур (более высоких, чем это требуется), при которых произошел значительный рост зерен аустенита. Дефект обнаруживается механическими испытаниями по излому или по микроструктуре. Устраняют дефект повторной закалкой от нормальных температур для данной стали.

Окисление и обуглероживание поверхности часто происходит при нагреве в плазменных или электрических печах без контролируемой атмосферы. Поэтому дают припуск на шлифование, что удорожает и усложняет технологию изготовления термически обрабатываемых деталей. Контролируемая искусственная атмосфера в термических печах является способом устранения или уменьшения этого дефекта. Нагрев в солях также способствует уменьшению окисления и обезуглероживания.

ЛЕКЦИЯ 6

Сплавы на основе железа (продолжение)

План лекции 6

Раздел 6. Сплавы на основе железа.

Тема 6.8. Химико-термическая обработка стали: основные закономерности, цементация, азотирование, цианирование, нитроцементация, силицирование, борирование. Диффузионная металлизация: хромирование и алитирование.

Тема 6.9. Основы легирования стали. Влияние легирующих элементов на структуру и свойства стали. Особенности термообработки легированных сталей.

Тема 6.10. Конструкционные легированные стали. Классификация по назначению, цементируемые и улучшаемые стали. Стали специального назначения (пружинные, шарико-подшипниковые, износостойкие и т.п.).

Тема 6.11. Инструментальные легированные стали. Режущие, теплостойкие, быстро-режущие стали. Штамповые стали. Стали для мерительных инструментов.

Тема 6.12. Стали и сплавы с особыми свойствами. Нержавеющие, жаропрочные, магнитные, немагнитные стали. Стали и сплавы с особыми тепловыми свойствами. Электротехнические стали.

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 эффективной толщиной. Продолжительность ХТО определяется требуемой глубиной диффузионного слоя.

Процесс диффузии характеризуется коэффициентом диффузии D :

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

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

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

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

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

Для цементации в основном используют низкоуглеродистые (0,1-0,18 % 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.

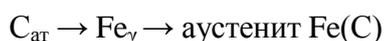
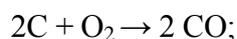
Цементованный слой имеет переменную концентрацию углерода по толщине, убывающую от поверхности к сердцевине детали.

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

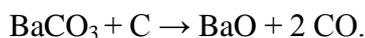
Цементация в твердом карбюризаторе. Основная составляющая всех твердых карбюризаторов – уголь различного происхождения: древесный, каменный, костный. Древесный уголь менее активный, но содержит минимальное количество вредных примесей. Каменные угли (кокс) менее пригодны для цементации, так как содержат 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 ($BaCO_3$) и углекислый натрий (Na_2CO_3) в количестве 10-40 % массы угля. Это ускорители процесса:

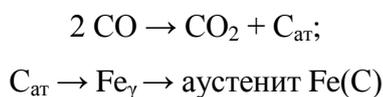


В качестве активизатора еще применяются ацетат натрия (CH_3COONa) или ацетат бария ($Ba(CH_3COO)_2$):



Газовая цементация осуществляется при нагреве изделия в среде газов в печах с герметичной камерой. Наиболее качественный цементованный слой получается при использовании в качестве карбюризатора природного газа, состоящего почти полностью из метана (CH₄) и пропанбутановых смесей, подвергнутых специальной обработке.

Основной реакцией, обеспечивающей науглероживание при газовой цементации, является:



При высоком содержании в атмосфере метана возможна реакция:



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

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

Термическая обработка цементованных стальных деталей. Задача цементации – получить высокую поверхностную твердость и износостойкость при вязкой сердцевине – не решается одной цементацией. Цементацией достигается лишь выгодное распределение углерода по сечению. Окончательно формирует свойства цементованной детали последующая закалка, при которой на поверхности получается высокоуглеродистый мартенсит, а в сердцевине сохраняется низкая твердость и высокая вязкость.

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

Недостатки эти в значительной степени можно устранить, если использовать:

- а) наследственно мелкозернистую сталь;

б) газовую цементацию (благодаря меньшей продолжительности процесса, наблюдается меньший рост зерна);

в) подстуживание при закалке до $750-800^{\circ}\text{C}$; хотя это не ведет к измельчению зерна, но снижает внутренние напряжения;

г) обработку холодом, что приводит к превращению остаточного аустенита и к повышению поверхностной твердости.

При повышенных требованиях к структуре и свойствам детали после цементации охлаждаются на воздух, затем их закаляют с температуры $850-900^{\circ}\text{C}$ в зависимости от марки стали. При этом в сердцевине произойдет полная перекристаллизация и измельчение зерна, на поверхности тоже произойдет перекристаллизация. Вследствие нагрева выше линии A_{c3} цементитная сетка растворится, хотя для высокоуглеродистой поверхности такой нагрев сопровождается некоторым перегревом.

При особо высоких требованиях к механическим свойствам применяют двойную закалку с последующим низким отпуском. Первая закалка ($850-900^{\circ}\text{C}$) измельчит структуру сердцевины и устранил цементитную сетку на поверхности. Для формирования окончательной твердости проводят вторую закалку ($750-800^{\circ}\text{C}$). Мелкоигольчатый мартенсит с вкрапленным избыточным цементитом обеспечивает высокую износостойчивость.

Цементованные детали обязательно после закалки для снятия внутренних напряжений подвергают отпуску при низкой температуре ($150 - 200^{\circ}\text{C}$). В результате такой обработки (закалка с последующим низким отпуском) поверхность должна иметь твердость 58-62HRC, сердцевина – для легированных сталей 25-35 HRC.

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

Азотирование сильно повышает твердость поверхностного слоя, 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 $450-500^{\circ}\text{C}$ (цементованного – $200-225^{\circ}\text{C}$).

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 HV. Молибден устраняет отпускную хрупкость, которая может возникнуть при медленном охлаждении от температуры азотирования.

Азотирование ведут в диссоциированном аммиаке NH_3 . На обрабатываемой поверхно-

сти 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 высоко-твердых 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 ($600-675^{\circ}\text{C}$) 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 ($500-520^{\circ}\text{C}$). Для ускорения процесса азотирования применяют двухступенчатый процесс: сначала при температуре $500-520^{\circ}\text{C}$, затем при $540-560^{\circ}\text{C}$. Рекомендуемый слой $0,3-0,6$ мм.
5. Окончательное шлифование (доводка) изделия.

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

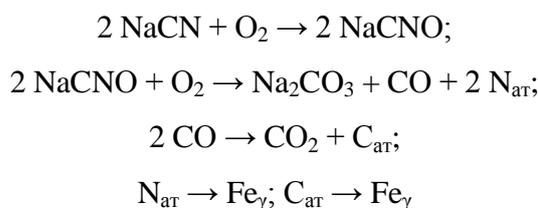
Азотирование в жидких средах (тенифер-процесс) проводят при температуре 570°C в течение $0,5-3,0$ ч в расплавленных цианистых солях (85% соли, содержащие 40 % KCNO и 60 % NaCN , и 15 % NO_2CO_3 или 55 % карбамида $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ и 45 % Na_2CO_3), через которые пропускают сухой воздух. Вследствие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

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

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

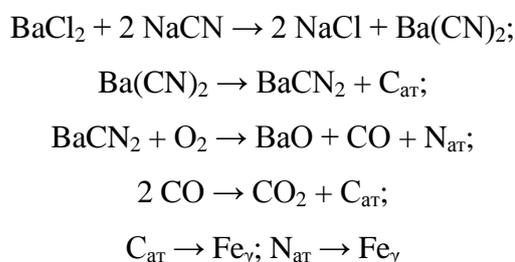
Среднетемпературное цианирование проводят для получения слоя небольшой толщины (0,15-0,35 мм). В этом процессе изделие нагревают до 820-860⁰С в расплавленных солях, содержащих группу NaCN.

Процесс ведут в ваннах, содержащих 20-25 % NaCN, 25-50 % NaCl и 25-50 % Na₂CO₃, 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 (заковки с последующим низким отпуском 180-200⁰С) 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 930-950⁰С в ванне, содержащей 8 % NaCN, 82 % BaCl₂ и 10 % NaCl в течение 1,5-6 ч. При этом протекают следующие реакции:



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

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

Нитроцементация – это вид химико-термической обработки, заключающийся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом при

температурах 840-860⁰С 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 100⁰С. 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 С + 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 % NH₃.

После нитроцементации проводят закалку непосредственно из печи, реже после повторного нагрева применяют ступенчатую закалку, затем следует провести низкий отпуск (160-180⁰С). Твердость слоя после термообработки 58...60HRC.

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

Нитроцементации обычно подвергают детали сложной конфигурации, склонные к короблению. Данный вид ХТО имеет следующие преимущества по сравнению с газовой цементацией: процесс происходит при более низкой температуре, меньше толщина слоя, меньшие деформации и коробления, повышается сопротивление износу и коррозии.

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

Борирование чаще выполняют при электролизе буры ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) при температуре 930-950⁰С в течение 2-6 часов. Изделие является катодом.

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

Хорошие результаты получаются при газовом борировании при температуре 850-900⁰С в среде диборана (B_2H_6) или треххлористом боре (BCl_3) в смеси с водородом.

Диффузионный слой состоит из боридов FeB (на поверхности) и Fe_2B . Рекомендуемая толщина слоя 0,1 - 0,2 мм. Борированный слой обладает высокой твердостью (1800-2000 HV), износостойкостью (главным образом, абразивной), коррозионной стойкостью, окалинотойкостью (до 800⁰С) и теплостойкостью.

Средне- и тяжелонагруженные 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 170-200⁰С износостойкость слоя становится высокой.

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

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

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

При диффузионной металлизации в твердой среде металлизатором является ферросплав (ферроалюминий, феррохром) с добавлением хлористого аммония (NH_4Cl). В результате реакции металлизатора с HCl или Cl_2 образуется летучее соединение хлора с металлом (AlCl_3 , CrCl_2 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 ($1000-1200^\circ\text{C}$) длительное время, а это существенно увеличивает себестоимость изделия.

Алитирование – насыщение поверхностного слоя стального изделия алюминием, обеспечивающее высокую окислительную стойкость ($850-900^\circ\text{C}$), хорошее сопротивление коррозии в атмосфере и морской воде.

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

Хромирование - насыщение поверхностного слоя стального изделия хромом, обеспечивающее высокую коррозионную стойкость в морской воде и азотной кислоте и окислительную стойкость до 800°C .

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 α – железе и карбидов хрома.

Диффузионный слой, получаемый при хромировании технического железа, состоит из твердого раствора хрома в α – железе, его твердость составляет 250-300 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 α - железа, т.е. являются α – стабилизаторами. Исключение: марганец и никель – γ - 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, Н9Х12Д2ТБ, 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.

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 200-20⁰С. 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°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

Особенности термической обработки быстрорежущих сталей. Под быстрорежущими понимаются стали, предназначенные для изготовления режущего инструмента, работающего при высоких скоростях резания. В отличие от других сталей быстрорежущие стали обладают высокой теплостойкостью (красностойкостью), т.е. способностью сохранять мартенситную структуру и соответствующую высокую твердость, прочность и износостойкость при повышенных температурах, возникающих в режущей кромке при резании с большой скоростью. Эти стали сохраняют мартенситную структуру при нагреве $600-650^{\circ}\text{C}$, поэтому их применение позволяет значительно повысить скорость резания (в 2–4 раза) и стойкость инструментов (в 10–30 раз) по сравнению со сталями, не обладающими теплостойкостью.

Красностойкость создается легированием стали карбидообразующими элементами (например, вольфрамом, молибденом, хромом, ванадием) в таком количестве, при котором они связывают почти весь углерод в специальные карбиды. Сталь P18 (P – условное обозначение быстрорежущей стали (рапид – скорость), 18 % вольфрама) – наиболее распространена, универсальная марка быстрорежущей стали. В связи с дороговизной вольфрама широкое распространение получили вольфрамомолибденовые стали. Из этих сталей преимущественное применение имеет сталь P6M5 (6 % вольфрама, 5 % молибдена).

Термическая обработка быстрорежущих сталей имеет свои особенности:

Для предотвращения вероятности возникновения нафталинистого излома, необходимо перед закалкой провести изотермический отжиг (нагрев до $860-900^{\circ}\text{C}$ и после выдержки охлаждение до $700-750^{\circ}\text{C}$, в этом интервале температур сталь выдерживают до окончательного превращения аустенита, которое заканчивается за 1,5–2 ч).

Необходим медленный нагрев под закалку до 800°C , чтобы сталь не растрескалась из-за малой теплопроводности и пластичности. Температуру закалки стали P18 принимают равной 1270°C и стали P6M5 – 1220°C . Высоколегированный аустенит, полученный нагревом под закалку, обладает большой устойчивостью, поэтому охлаждающей средой при закалке чаще всего является масло. Структура быстрорежущей стали после закалки представляет собой высо-

колегированный мартенсит, нерастворенные избыточные карбиды и остаточный аустенит. Обычно содержание остаточного аустенита в стали P18 составляет 25–30 % и в стали P6M5 – 28–34 %.

После закалки следует отпуск при 550-570⁰С, вызывающий превращение остаточного аустенита в мартенсит и дисперсионное твердение в результате частичного распада мартенсита и выделения дисперсных карбидов. Это сопровождается увеличением твердости. При однократном отпуске только часть остаточного аустенита превращается в мартенсит. Поэтому применяют многократный (чаще трехкратный) отпуск. Продолжительность каждого отпуска 45–60 мин.

Инструмент простой формы из быстрорежущей стали иногда для уменьшения содержания остаточного аустенита непосредственно сразу после закалки (во избежание стабилизации аустенита) охлаждают до – 80 ⁰С (обработка холодом). При охлаждении от комнатной температуры до – 80 ⁰С образуется дополнительно около 15–20% мартенсита (от общего объема стали) и после обработки холодом сохраняется 10–15% остаточного аустенита. Этот аустенит превращается в мартенсит после однократного отпуска при 560⁰С.

Твердость после закалки составляет 62–63 HRC, а после отпуска – 63–65 HRC.

ЛЕКЦИЯ 7

Сплавы на основе железа (продолжение).

Цветные металлы и сплавы.

План лекции 7

Раздел 6. Сплавы на основе железа.

Тема 6.13. Стали и сплавы с особыми свойствами. Магнитные и электротехнические стали и сплавы. Сверхпроводимость и сверхпроводящие материалы.

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.

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 (магнитострикция). Характерными представителями ферромагнетиков являются железо, никель, кобальт и их сплавы, а также ряд редкоземельных металлов – гадолиний, тербий и их сплавы.

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

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

Кроме того, известен магнитотвердый материал *магнико* на основе железа, содержащий кобальт (24%), никель (14%), алюминий (8%) и медь (3%). Этот сплав имеет высокое

значение остаточной магнитной индукции и коэрцитивной силы. Анизотропию магнитных свойств 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°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 ... 1400⁰С) сплав железа с хромом (15 ... 30 %) и алюминием (4,5 ... 6,0), имеющий удельное электрическое сопротивление 1,3 ... 1,5 мкОм·м. Название сплава образовано от слов «хром» и «алюминий». Хромаль марок Х23Ю5Т и Х27Ю5 используют для изготовления нагревателей сопротивления электрических цепей. За рубежом аналоги хромалия – это *канталь*, *мегапир*.

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

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

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

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

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

По *температуре плавления* различают легкоплавкие, тугоплавкие и занимающие промежуточное положение металлы. К легкоплавким металлам, применяющимся в промышленности, относится ртуть (температура плавления – 39⁰С), олово (232⁰С), свинец (327⁰С),

цинк (419°C) и алюминий (660°C). К тугоплавким относятся вольфрам (2400°C), молибден (2695°C), хром (1860°C), титан (1800°C) и ванадий (1720°C).

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 – $420\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, на втором месте – $395\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. 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°C составляет $(1,67\dots 2,52)\cdot 10^2\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, 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 $0,02 \dots 0,20\text{Вт}/(\text{см}\cdot\text{К})$, 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°C), 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 $-80\dots +100^{\circ}\text{C}$ температурный коэффициент линейного расширения, равный $1,5\cdot 10^{-6}1/\text{К}$. Известен *суперинвар*, в составе которого наряду с железом содержится 32% никеля и 4% кобальта.

Детали из указанных сплавов используются в качестве эталонов сравнения в dilatометрах при определении температурного коэффициента линейного расширения других материалов.

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

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

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

Медные сплавы подразделяются на латуни, бронзы 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 (α), 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 ($\alpha + \beta$), β - 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 - α . 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.22) состоит из неоднородного твердого α -раствора (твердого раствора олова в меди) и эвтектоида $\alpha + \text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$. Темные участки неоднородного твердого α -раствора богаты медью, светлые - оловом, в эвтектоиде, на светлом фоне соединения $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ видны темные точечные включения α -фазы.

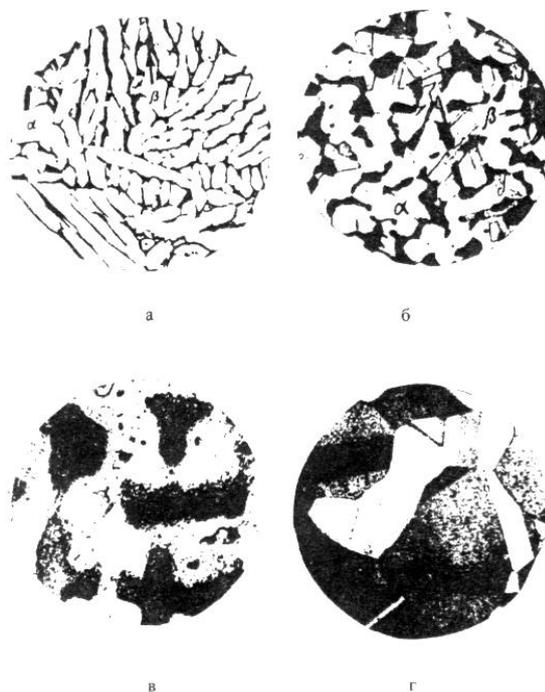


Рис.32. Микроструктуры (x 100): а - литая латунь Л159 ($\alpha+\beta$);
б - латунь ($\alpha+\beta$) после деформирования; в - литая бронза Бр05;
г - бронза после деформирования и рекристаллизации

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°C в воду и отпуска 650°C. После закалки они имеют игольчатую структуру, состоящую из зерен α и β твердых растворов. Алюминиевые бронзы имеют хорошие механические и высокие антифрикционные свойства.

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

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

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

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

Алюминий и его сплавы. *Алюминий* – металл серебристо-белого цвета. Температура плавления 600°C. Алюминий имеет кристаллическую решетку ГЦК с периодом $a = 0,4041$ нм. Наиболее важной особенностью алюминия является низкая плотность – 2,7 г/см³. Алюминий обладает хорошими теплопроводностью и электрической проводимостью, высокой коррозионной стойкостью вследствие образования на его поверхности тонкой прочной пленки Al₂O₃. 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 α – раствора (кремния в алюминии) и эвтектики ($\alpha + Si$). При более высокой концентрации кремния (заэвтектические сплавы) в структуре сплавов кроме эвтектики присут-

ствуют 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 (CuAl_2 , фаза S, Mg_2Si) 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.

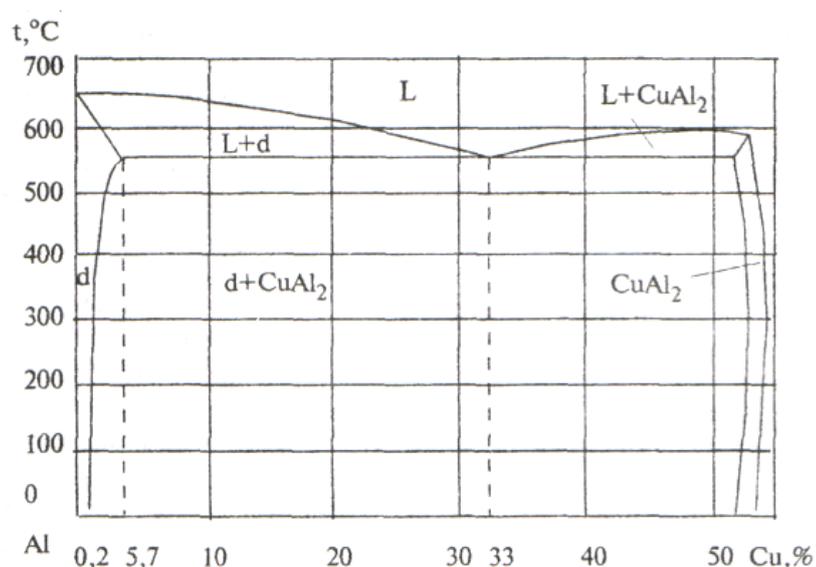


Рис. 33. Диаграмма состояния сплавов Al – Cu

После закалки с оптимальных температур (500°C) основное количество соединений CuAl_2 и Mg_2Si растворяется в алюминии, соединения железа не растворяются. Поэтому в закаленном состоянии структура состоит из алюминиевого твердого раствора (пересыщенного α – раствора) и нерастворимых включений соединений железа. Такая структура будет отличаться большей пластичностью, но меньшей твердостью и прочностью, т.е. в результате закалки дюралюмин становится мягким и пластичным. Старению предшествует 2...3 – часовой инкубационный период, в течение которого сплав сохраняет высокую пластичность. Но полученный в результате закалки α – раствор является неустойчивым. Выдержка при комнатной температуре (естественное старение) или при искусственном повышении температуры (искусственное старение) приводит к изменениям в твердом растворе, ведущем в конечном итоге к выделению соединений (в сплавах дополнительно легированных магнием также выделяется S – фаза – CuMgAl_2).

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

Лекция 8

Цветные металлы и сплавы (продолжение).

Композиционные материалы. Наноструктурные материалы.

План лекции 8

Раздел 7. Цветные металлы и сплавы.

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

Тема 7.4. Магний и его сплавы.

Раздел 8. Композиционные материалы.

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

Тема 8.2. Композиционные материалы на неметаллической основе. Композиционные материалы на металлической основе. Композиционные материалы, используемые для работы при высоких температурах.

Раздел 9. Наноструктурные материалы.

Тема 9.1. Наноструктурные материалы. Особенности свойств наноматериалов.

Титан и его сплавы. *Титан* – металл серого цвета. Температура плавления 1668°C . Титан имеет две полиморфные модификации: до 882°C существует α – титан, который кристаллизуется в гексагональной решетке с периодами $a = 0,2951$ нм и $c = 0,4684$ нм, а при более высоких температурах – β – титан, имеющий ОЦК-решетку с периодами $a = 0,3282$ нм. Плотность титана $4,5$ г/см³.

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

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

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

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

подавляющее большинство металлов образуют с титаном диаграммы состояния с эвтектическим превращением. *По структуре* титановые сплавы делят на α –, $(\alpha+\beta)$ – и β – сплавы. Все легирующие элементы по влиянию на полиморфизм титана можно разделить на три группы:

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

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

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 $\sigma_b / \gamma g$ и удельная жесткость $E / \gamma g$, где σ_b - временное сопротивление, E - модуль нормальной упругости, γ - 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_2O_3 , BeO), карбидов (SiC , B_4C), 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 *волокнистых композиционных материалов* являются волокна неметаллических материалов (C , B), тугоплавких соединений (Al_2O_3 , SiC) или проволока из тугоплавких металлов (W , Mo). Диаметр волокон может быть $1 \dots 50$ мкм (нитевидные монокри-

сталлы), 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 органоволокниты.

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.

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

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

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

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

ЛЕКЦИЯ 9

Наноструктурные материалы (продолжение). Повышение надежности и долговечности деталей машин. Научные основы выбора материалов.

План лекции 9

Раздел 9. Наноструктурные материалы.

Тема 9.2. Наноструктурные элементы.

Раздел 10. Повышение надежности и долговечности деталей машин.

Тема 10.1. Оценка качества изделия. О надежности конструкционного материала.

Тема 10.2. Повышение циклической прочности деталей машин. Повышение износостойкости деталей машин.

Раздел 11. Научные основы выбора материалов.

Тема 11.1. Проблема выбора материала. Эксплуатационная надежность материала. Технологичность материала. Экономичность материала.

Тема 11.2. Выбор марки стали для типовых деталей машин. Общие рекомендации по выбору марки стали. Выбор марки стали с учетом критического диаметра прокаливаемости и глубины закаленного слоя. Выбор марки стали для деталей, работающих в условиях усталостного нагружения.

Тема 11.3. Выбор материала для изделий различного назначения с учетом эксплуатационных требований и охраны окружающей среды.

Заключение.

Наноструктурные элементы.

Фуллерены – новая форма существования углерода в природе наряду с давно известными алмазом и графитом, была открыта в 1985 году при попытках астрофизиков объяснить спектры межзвездной пыли. Молекула фуллерена C_{60} содержит фрагменты с шестикратной и пятикратной симметрией.

Фуллерены могут быть не только чисто углеродными, но и наполненными. Наполнением могут быть молекулы инертных или других газов, небольшие органические и неорганические молекулы, атомы металлов (щелочных, щелочноземельных и др.).

Фуллериты – кристаллы, образованные молекулами C_{60} , имеющие гранецентрированную кубическую решетку со слабыми межмолекулярными связями. В этом кристалле имеются октаэдрические и тетраэдрические полости, в которых могут находиться посторонние атомы.

Если октаэдрические полости заполнены ионами щелочных металлов (калием, рубидием, цезием), то при температурах ниже комнатной структура этих веществ перестраивается, и образуется новый полимерный материал. Если заполнить также и тетраэдрические полости, то образуется сверхпроводящий материал с критической температурой 20...40 К. Существуют фуллериты и с другими присадками, придающими материалу уникальные свойства. Например, C_{60} – этилен имеет ферромагнитные свойства.

Углеродные нанотрубки – цилиндрические молекулы с гигантским числом атомов углерода. Они представляют собой графитовые сетки, свернутые в трубки, и могут быть открытыми и закрытыми, одностенными, двухстенными и многостенными. На поверхности трубки атомы углерода расположены в вершинах правильных шестиугольников, являющихся ячейками в плоском графитовом листе. На концах закрытых нанотрубок помимо шестиугольных ячеек, присутствуют пятиугольные. Правильные пятиугольники (семиугольники) являются локальными дефектами в графитовом листе, позволяющими получить его кривизну. Геометрия этих наноконструкций определяет их уникальные физические и химические свойства и, следовательно, возможность существования принципиально новых материалов и технологий производства. Для производства нанотрубок используют специальные катализаторы.

Однослойные нанотрубки имеют размеры 1 - 10 нм в диаметре и длину 10 - 1000 нм и более, а многослойные имеют диаметры и длину в 10 – 100 раз больше.

В углеродных нанотрубках может быть различное наполнение. Помимо перечисленных в качестве наполнителей могут использоваться фуллерены меньшего диаметра.

Углеродные нанотрубки могут быть проводниками или полупроводниками.

Нанокластеры. К множеству нанообъектов относят сверхмалые частицы – нанокластеры, состоящие из десятков, сотен или тысяч атомов. Свойства кластеров кардинально отличаются от свойств макроскопических объемов материалов того же состава. Из нанокластеров, как из крупных строительных блоков, можно целенаправленно конструировать новые материалы с заранее заданными свойствами и использовать их в каталитических реакциях, для разделения газовых смесей и хранения газов. Большой интерес представляют магнитные кластеры, состоящие из атомов переходных металлов, лантаноидов, актиноидов. Эти кластеры обладают собственным магнитным моментом, что позволяет управлять их свойствами с помощью внешнего магнитного поля.

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

деталей.

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

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

- эксплуатационная надежность,
- технологичность,
- экономичность.

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

В каждом конкретном случае ведущая характеристика надежности будет своя: у пружины – выносливость, у подшипника – износостойкость, у лопатки газовой турбины – жаропрочность и т. д. Для правильного выбора материала следует ясно представлять, какие характеристики материала для данного изделия являются лимитирующими, и подобрать материал, пригодный в первую очередь по этим характеристикам.

Главная трудность здесь – это определение ведущей характеристики с количественной стороны, так как, например, повышение твердости стали может привести к такому снижению ее пластичности, что материал окажется столь же непригодным, как и при недостаточной твердости. Зная природу механических и иных свойств материалов, можно предвидеть, какие

из них и в каком состоянии целесообразно использовать для данного изделия, а при необходимости – внести изменения в нужную сторону.

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

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

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

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

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

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

Следует также учитывать возможность термической обработки, поскольку она может в несколько раз изменять свойства металла. При этом надо принимать во внимание закаливаемость, прокаливаемость, наследственное зерно, склонность к короблению и растрескиванию при закалке и к отпускной хрупкости, к образованию шиферного излома, обезуглероживанию и т. д.

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

Экономичность материала. Вопросы экономики производства во многих случаях играют решающую роль. Выбирая материал, необходимо стремиться к минимальной его стоимо-

сти. Однако такой прямолинейный подход не отражает экономичности производства, поскольку у детали из дешевого материала может оказаться дорогая технология производства изделия, а из дорогого – дешевая. При этом себестоимость продукции может оказаться меньше именно во втором случае, поскольку отходы металла будут меньшими, т. е. выше будет коэффициент использования материала и меньше затраты труда.

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

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 гомогенность, 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 обра-

батываемого материала легирующими элементами, есть свои недостатки и ограничения. Во-первых, химико-термическая обработка дает только поверхностное упрочнение, и, во-вторых, достигаемое увеличение значений прочности происходит при снижении пластичности и вязкости упрочненного слоя по тем же причинам, что и при закалке.

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

В таких условиях важен поиск нетрадиционных решений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Адашкин, Анатолий Матвеевич.** Материаловедение в машиностроении: учебник для бакалавров / А.М. Адашкин, Ю.С. Седов, А.К. Онегина, В.Н. Климов. – Москва: Издательство Юрайт, 2013. – 535 с.: ил. – (Серия: Бакалавр. Углубленный курс). – Библиогр.: с. 533-535. – ISBN 978-5-9916-2867-9
2. **Волков, Георгий Михайлович.** Материаловедение: учебник для технических вузов по немашиностроительным направлениям и специальностям / Г. М. Волков, В. М. Зуев. – Москва: Академия, 2008. – 398 с.: ил. – (Высшее профессиональное образование, Технические специальности). – Библиогр.: с. 394.— ISBN 978-5-7695-4248-0.
3. **Гелин, Феликс Давыдович.** Металлические материалы: Справочник. Минск: Высшая школа, 1987. – 368 с. – Библиогр.: с. 361. – Предм. указ.: с. 362-366.
4. **Геллер, Юлий Александрович.** Материаловедение: учебное пособие для вузов/ Ю. А. Геллер, А. Г. Рахштадт; под ред. А. Г. Рахштадта. – Изд. 6-е, перераб. и доп. – Москва : Металлургия, 1989. – 456 с.: ил., табл. – Библиогр.: с. 452. – Предм. указ.: с. 453-455. – ISBN 5-229-00228-X.
5. **Гуляев, Александр Павлович.** Металловедение: учебник для втузов / А. П. Гуляев. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва: Металлургия, 1986. – 542 с.: ил., табл. – Библиогр. в конце гл. – Предм. указ.: с. 538-542.
6. **Журавлев, Виталий Никанорович.** Машиностроительные стали: справочник/ В. Н. Журавлев, О. И. Николаева. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1992. – 480 с.: ил., табл. – Библиогр.: с. 470-474. – ISBN 5-217-01306-0.
7. **Золоторевский, Вадим Семенович.** Механические свойства металлов: учебник для вузов по специальности "Металловедение, оборудование и технология термической обработки металлов"/ В. С. Золоторевский. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва: Металлургия, 1983. – 350 с.: ил., табл. – Библиогр.: с. 347. – Предм. указ.: с. 348-350.
8. **Иванов, Генрих Павлович.** Надежность материала в технических расчетах/ Г.П. Иванов, А.А. Худошин, В.С. Котельников, Ю.В. Кадушкин/ Под ред. Д.В. Бушенина. – Владимир: Издательство «Посад», 2002. – 128 с.: ил., табл. – Библиогр.: с. 124-125.
9. **Колачев, Борис Александрович.** Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов : учебное пособие для вузов по специальности " Металловедение и технология термической обработки металлов"/ Б. А. Колачев, В. А. Ливанов, В. И. Елагин. – Изд. 3-е, испр. и доп. – Москва: МИСИС, 2001. – 414 с.: ил., табл. – Библиогр.: с. 412-413. – ISBN 5-8763-027-8

10. Композиционные материалы : справочник/ В. В. Васильев [и др.]; под общ. ред. В. В. Васильева; Ю. М. Тарнопольского. – Москва: Машиностроение, 1990. – 510 с.: ил., табл. – Библиогр. в конце гл. – Предм. указ.: с. 502-510. – ISBN 5-217-01113-0.
11. Конструкционные материалы: справочник/ Б. Н. Арзамасов [и др.]; под ред. Б. Н. Арзамасова.— Москва: Машиностроение, 1990.— 687 с.: ил., табл. — (Основы проектирования машин).— Библиогр. в конце гл. — Предм. указ.: с. 683-687. — ISBN 5-217-01112-2.
12. **Лахтин, Юрий Михайлович.** Материаловедение: учебник для вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1990. – 528 с.: ил. – (Для вузов). – Библиогр.: с. 520. – Предм. указ.: с. 521-523. – ISBN 5-217-00858-X.
13. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учебное пособие для вузов по направлению "Электротехника, электромеханика и электротехнологии"/ А. В. Шишкин [и др.]; под ред. В. С. Чередниченко. – 2-е изд., стер. – Москва: Омега-Л, 2006. – 752 с. : ил., табл. – (Высшее техническое образование). – Библиогр.: с. 719-720. – Предм. указ.: с. 721-742. – ISBN 5-365-00041-2.
14. Материаловедение: учебник для вузов/ Б. Н. Арзамасов [и др.]; под ред. Б. Н. Арзамасова. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (МГТУ), 2001. – 646 с., [1] л. портр.: ил., табл. – (Учебник для технических вузов). – Библиогр.: с. 630-631. – Предм. указ.: с. 632-637. – ISBN 5-7038-1860-5.
15. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебник для вузов по направлению "Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств" и "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств"/ В. Б. Арзамасов [и др.]; под ред. В. Б. Арзамасова, А. А. Черепихина. – 2-е изд., стер. – Москва: Академия, 2009. – 447 с. : ил., табл. – (Высшее профессиональное образование, Машиностроение). – Библиогр.: с. 442-443. – ISBN 978-5-7695-6499-4.
16. Материаловедение и технология металлов: учебник для вузов / Г. П. Фетисов [и др.]; под ред. Г. П. Фетисова. – Изд. 4-е, испр. и доп. – Москва: Высшая школа, 2006. – 862 с. – Авт. указаны на обороте тит. л. – Библиогр.: с. 849-854. – ISBN 5-06-004418-1.
17. Материалы в машиностроении: выбор и применение: справочник в 5 т. / под ред. И. В. Кудрявцева.— Москва: Машиностроение, 1967. – Т. 1: Цветные металлы и сплавы / И. А. Алексахин [и др.]; под ред. Л. П. Лужникова. – 1967. – 304 с. : ил. – Библиогр. в конце гл. – Предм. указ.: с. 292-304.
18. **Мозберг, Рудольф Карлович.** Материаловедение: учебное пособие для вузов / Р. К. Мозберг. – Изд. 2-е, перераб. – Москва: Высшая школа, 1991. – 448 с.: ил. – ISBN 5-06-001909-8.

19. **Пикунов, Михаил Владимирович.** *Металловедение/ М.В.Пикунов, А.И. Де-сипри.* – М.: Металлургия, 1980. – 256 с. – Библиогр.: с. 250-251. – Предм. указ.: с. 252-254.
20. **Плошкин, Всеволод Викторович.** *Материаловедение: учебное пособие/ В.В. Плошкин.* – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2011. – 463 с. – Серия: Основы наук. – Библиогр.: с. 496. – ISBN 978-5-9916-1222-7
21. *Производство отливок из сплавов цветных металлов: учебник/ А.В. Курдюмов, В.Д. Белов, М.В. Пикунов и др.; под ред. В.Д. Белова.* – 3е изд., перераб. и доп. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. – 615 с. – ISBN 978-5-87623-573-2
22. **Ржевская, Светлана Владимировна.** *Материаловедение: учебник для вузов в области техники и технологии/ С. В. Ржевская.* – Изд. 4-е, перераб. и доп. – Москва: Логос, 2006. – 421 с.: ил. – Библиогр.: с. 414-415. – Алф. указ.: с. 406-413. – ISBN 5-98704-179-X.
23. **Рогов, Владимир Александрович.** *Современные машиностроительные материалы и заготовки: учебное пособие для вузов по направлениям "Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств", "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств"/ В. А. Рогов, Г. Г. Позняк.* – Москва: Академия, 2008 . – 330 с.: ил. – (Высшее профессиональное образование, Машиностроение). – Библиогр.: с. 324-325. – ISBN 978-5-7695-4254-1.
24. **Роцин, Василий Ефимович.** *Электрометаллургия и металлургия стали: учебник/ В.Е. Роцин, А.В. Роцин.*– 4-е изд., перераб. и доп.– Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 572 с. – Библиогр.: с.571-572. – ISBN 978-5-696-04354-8
25. **Сильман, Григорий Ильич.** *Материаловедение: учеб. пособие для вузов/ Г.И. Сильман.* – Москва: Издательский центр «Академия», 2008. – 336 с. – Библиогр.: с. 330-331. – ISBN 978-5-7695-4255-8
26. **Солнцев, Юрий Порфирьевич.** *Материаловедение: учебник для вузов по металлургическим, машиностроительным и общетехническим специальностям/ Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин; под ред. Ю. П. Солнцева.* – Изд. 3-е, перераб. и доп. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2004. – 735 с.: ил., табл.,схемы. – (Федеральная целевая программа "Культура России") (Учебник для вузов). – Библиогр.: с. 733 -735. – ISBN 5-93808-075-4.
27. *Химико-термическая обработка металлов и сплавов: справочник / Г. В. Борисенок [и др.]; под ред. Л. С. Ляховича.* – Москва: Металлургия, 1981. – 424 с : ил. – Библиогр.: с. 404-419. – Предм. указ.: с. 420-422.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ЛЕКЦИЯ 1	6
ЛЕКЦИЯ 2	13
ЛЕКЦИЯ 3	23
ЛЕКЦИЯ 4	32
ЛЕКЦИЯ 5	40
ЛЕКЦИЯ 6	50
ЛЕКЦИЯ 7	63
ЛЕКЦИЯ 8	73
ЛЕКЦИЯ 9	78
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	84