

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Невинномысский технологический институт (филиал)

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
по выполнению контрольных работ  
по дисциплине «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»  
для студентов заочной формы обучения направления подготовки  
15.03.02 Технологические машины и оборудование

Невинномысск 2020

Методические указания разработаны в соответствии с требованиями ФГОС ВО и рабочей программы дисциплины «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ». Указания предназначены для студентов заочной формы обучения, направления подготовки 15.03.02 Технологические машины и оборудование. Приведены примеры решения задач.

Составители

Д.В. Казаков, к.т.н., доцент

Отв. редактор

Е.Н. Павленко, к.т.н., доцент

## ВВЕДЕНИЕ

Методические указания и задания по курсу материаловедения составлены в соответствии с программой данного курса, читаемого в ФГАОУ ВО «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ», Невинномысский технологический институт (филиал).

Содержат методические указания к выполнению контрольных работ по курсу «Материаловедение», в которых рассматриваются вопросы микро-, макро- и рентгеноструктурного анализа, методы измерения твердости, выбора режимов термической обработки, диаграммы состояния сплавов и др.

Для выполнения контрольных работ студенту рекомендуется использовать литературу, приведенную в конце методических указаний.

## **Задания к контрольной работе**

### **Задача 1.**

#### **МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ**

Цель работы: получить представление о твердости и методах ее измерения, научиться измерять твердость наиболее распространенными методами: Бринелля, Роквелла, Виккерса.

#### **Задания**

1. Ознакомиться с методами измерения твердости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу, микротвердости.
2. Ознакомиться с устройством приборов и научиться измерять на них твердость.
3. Заполнить таблицу, построить график.
4. Выполнить контрольные задания.
5. Составить отчет.

#### **Общие положения**

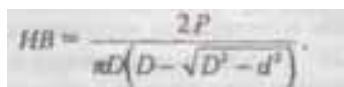
Под твердостью понимают сопротивление материала внедрению в него более твердого тела, называемого индентором. Индентор - тело правильной геометрической формы (шар, конус, трех- и четырехгранная пирамиды) изготавливается из прочных материалов, закаленной стали, твердого сплава или алмаза. Различают статические, статико-динамические и динамические методы измерения твердости. В статических методах измерения твердости время взаимодействия индентора с измеряемой поверхностью составляет 30 - 40 секунд, в динамических реализуется принцип мгновенного, обычно упругого взаимодействия индентора с измеряемой поверхностью. Статико-динамические методы занимают среднее положение между статическими и динамическими методами измерения твердости.

К статическим методам измерения твердости относят методы Бринелля, Роквелла, Виккерса и модификацию метода Виккерса - микротвердость.

*Метод Бринелля:* в испытуемый металл под определенной постоянной нагрузкой вдавливается стальной закаленный шарик соответствующего диаметра. Шарик оставляет на испытуемой поверхности отпечаток - лунку, размер которой зависит от твердости материала. Отношение нагрузки  $P$ , кгс, к площади сферической поверхности отпечатка - лунки  $F$ , мм<sup>2</sup>, называют числом твердости по Бринеллю и обозначают через  $HB$ , кгс/мм<sup>2</sup>:

$$HB = P / F.$$

Если поверхность отпечатка выразить через диаметр шарика  $D$  и диаметр отпечатка  $d$ , то число твердости по Бринеллю определяется по формуле, кгс/мм<sup>2</sup>:


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

Диаметр отпечатка  $d$  измеряют бинокулярной лупой, имеющей с делениями с точностью до сотых долей миллиметра.

По формуле рассчитывают числа твердости по Бринеллю в зависимости от диаметра отпечатка (таблица чисел твердости ГОСТ 901259). Во избежание остаточной деформации стального шарика необходимо, чтобы твердость его была в 1,5 раза выше твердости испытуемых материалов, поэтому для испытания материалов с твердостью  $>450$  кгс/мм<sup>2</sup> по  $HB$  применять метод Бринелля не рекомендуется. Высота образца для измерения твердости по Бринеллю должна быть в 10 раз больше высоты лунки. Область применения: определение твердости чугунов, пластичных сталей и цветных сплавов.

*Метод Роквелла, HR*, более универсален, так как позволяет испытывать металлы любой твердости, включая и твердые сплавы. Метод Роквелла применим для определения твердости сравнительно тонких образцов (толщиной 0,4 мм). За единицу твердости принимают осевое перемещение индентора на 0,002 мм. Числа твердости при испытании определяются непосредственно отсчетом по шкале индикатора. Их три:  $B$ ,  $C$ ,  $A$ . Шкала  $B$  (красная) - применяется для измерения твердости пластичных и отожженных материалов, шкала  $C$  - для измерения твердости закаленных сталей, шкала  $A$  - для изме-

рения твердости наиболее твердых материалов - твердых сплавов. В соответствии с вышеизложенным применяют два индентора - стальной закаленный шарик диаметром 1,588 мм и алмазный или твердосплавный конус с углом при вершине  $120^{\circ}$ .

Для уменьшения разброса результатов измерения используют предварительное нагружение с  $P = 10$  кгс и окончательное  $P_1$  определяемое шкалой (см. табл. 1.1).

Таблица 1.1

Наименование сплава	Шкала	P, кгс	P <sub>1</sub> , кгс	Индентор	Обозн., чисел твердти
Пластичный и оттоженный Закаленные стали Твердый сплав	В	10	90	Стальной шарик	HRB
	С	10	140	Алмазный (твердосплавный) конус	HRC
	А	10	50	Алмазный (твердосплавный) конус	HRA

6

*Метод Виккерса* применяют при определении твердости поверхностных слоев (цементируемых, азотированных) и образцов материалов различной твердости в тонких сечениях. При измерении твердости по Виккерсу,  $HV$ , в испытуемый материал вдавливаются четырехгранная алмазная пирамида с углом при вершине  $136^{\circ}$ . Твердость по Виккерсу определяет удельное давление, приходящееся на единицу поверхности отпечатка, кгс/мм<sup>2</sup>:

$$HV = \frac{F}{A}$$

Если выразить площадь поверхности отпечатка через его диагональ, то получим, кгс/мм<sup>2</sup>,

$$HV = \frac{2P \sin(a/2)}{d^2} = 1,8544 \frac{P}{d^2}$$

где  $P$  - нагрузка, кгс;  $a$  - угол при вершине индентора, равный  $136^{\circ}$ ;  $d$  - среднее арифметическое длин обеих диагоналей отпечатка после снятия нагруз-

ки, мм.

При определении твердости на приборе Виккерса измеряют длину диагоналей с помощью измерительного микроскопа и по таблице определяют число твердости в зависимости от выбранной испытательной нагрузки. Метод Виккерса в отличие от методов Бринелля и Роквелла обладает подобием, т.е. твердость, определенная для одного материала при различных нагрузках, одинакова.

### Порядок выполнения работы

1. Измерить твердость на приборе Роквелла по шкале *B* образцов из различных марок углеродистых сталей и перевести ее в числа твердости по Бринеллю (используя таблицу) Результаты измерения занести в табл. 1.2. рассчитать  $a_n$  углеродистых сталей по формуле  $\sigma_B = 0,36HB$ .

Таблица 1.2

Марка стали	Содержание углерода С, %	HKВ				НВ кгс/мм <sup>2</sup>	$\sigma_B$ кгс/мм <sup>2</sup>
		I	II	III	Сре		
Армко-железо	0,03						
20	0,20						
30	0,30						
45	0,45						
60	0,60						

7

2. Построить график зависимости предела прочности от содержания углерода в сталях.

3. Измерить твердость углеродистых сталей по методу Бринелля и определить предел прочности сталей.

## **Содержание отчета**

1. Название, цель работы, задание.
2. Таблица с экспериментальными данными измерения твердости по Роквеллу и переводу их в числа твердости по Бринеллю, результаты расчета предела прочности углеродистых сталей.
3. График зависимости предела прочности от содержания углерода в сталях.
4. Данные по твердости сталей, измеренных методом Бринелля.

### **Задача 2.**

## **МАКРОАНАЛИЗ И ДЕФЕКТОСКОПИЯ МЕТАЛЛОВ**

Цель работы: ознакомиться с основными методами макроанализа и дефектоскопии металлов.

### **Задания**

1. Используя учебники и пособия, изучить методы макроанализа (волокнистое строение металлов, наличие третей, раковин, пористости, анализ изломов, анализ ликвации серы).
2. Изучить виды изломов и образцы для макроанализа
3. Выполнить анализ на макрошлифах ликвации серы по Бауману и макро анализ сварного соединения стальных изделий.
4. Ознакомиться с работой магнитного дефектоскопа, выявить дефекты стального калибра методом магнитной дефектоскопии. Получить представление о других методах дефектоскопии.
5. Выполнить контрольные задания.
6. Составить отчет.

### **Общие положения**

Макроскопический анализ заключается в определении строения металла



(макростроения) невооруженным глазом или через лупу при небольших увеличениях (до 30 раз).

Макроскопическому исследованию могут быть подвергнуты различного рода объекты. Основные из них: поверхность не разрушенного изделия, изломы, макрошлифы нетравленные или с выявленной специальными реактивами структурой.

Макроскопический анализ применяют для выявления вида излома (вязкий, хрупкий, смешанный, усталостный, нафталинистый и т.д.) нарушения сплошности металла (усадочная рыхлость, пористость, трещины, флокены, дефекты сварки и т.д.); дендритного строения литого металла; химической неоднородности литого металла (ликвацию) и присутствия в нем грубых включений: волокнистой структуры деформированного металла и т.п.

Для контроля стальных деталей с целью выявления дефектов без разрушения целостности изделия разработаны различные методы дефектоскопии: 1) для обнаружения поверхностных дефектов - магнитный, электромагнитный, капиллярный, люминесцентный; 2) для обнаружения внутренних дефектов - ультразвуковой, радиационный (гамма-дефектоскопия), рентгеновский методы, которые позволяют не только обнаружить наличие дефектов, но и установить их форму и размеры.

### **Порядок выполнения работы**

Первое задание студенты выполняют при подготовке к работе, т.е. дома или в библиотеке, При этом следует обратить внимание на связь между макроструктурой и свойствами металлов, на роль ликвации, а также характеристику изломов.

Второе задание выполняется в лаборатории под руководством преподавателя путем изучения коллекций макрошлифов и изломов. Необходимо научиться определять вид излома и связать его с причиной разрушения. При выполнении данного задания студенты пользуются альбомами и картотекой с описанием изломов.

Третье задание заключается в проведении анализа на макрошлифах ликвации

серы по Бауману и макроанализа сварного соединения стальных изделий.

Для этого студенты делятся на 2 группы, каждая из которых выполняет свою половину задания, после этого они меняются местами.

Для определения ликвации серы используют метод отпечатков (метод Баумана). Для этого на хорошо подготовленную поверхность накладывают фотографическую (бромосеребряную) бумагу, предварительно смоченную в течение 5 - 10 минут в 5%-ном растворе серной кислоты, и выдерживают 5-10 минут. На тех участках поверхности металла, на которых имеются скопления сернистых соединений (сульфидов), происходит реакция между ними и серной кислотой, оставшейся на фотобумаге:  $\text{FeS} + \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{FeSO}_4 + \text{H}_2\text{S}$ . Сероводород, образующийся непосредственно против очагов своего выделения, воздействует на кристаллики бромистого серебра фотоэмульсии, поэтому на этих участках происходит дальнейшая реакция:  $2\text{AgBr} + \text{H}_2\text{S} = 2\text{HBr} + \text{Ag}_2\text{S}$ . Сернистое серебро имеет темный цвет, поэтому образующиеся на фотобумаге темные участки указывают форму и характер распределения включений сульфидов в исследуемой стали (или чугуне). Снятую с макрошлифа фотобумагу промывают в воде, фиксируют 3 минуты в растворе гипосульфита, после чего снова промывают и сушат.

Полученный отпечаток клеивается в отчет, где должны содержаться данные о протекающих реакциях и выводы по результатам анализа.

При выполнении макроанализа сварного соединения стальных изделий используют реактив для поверхностного травления (реактив Гейне). 10%-ный водный раствор двойной соли хлорной меди и аммония окрашивает в стали и железе места, богатые фосфором, углеродом и серой в темный цвет, при этом выявляется также и пористость. Образец исследуемого металла шлифованной поверхностью погружают в реактив на 1 минуту, затем осевшую на поверхность медь осторожно снимают ваткой, после чего образец просушивают фильтровальной бумагой. Дефектные участки растравливаются в большей степени. В отчете должны быть представлены эскизы исследуемых изделий и выводы по результатам анализа.

Четвертое задание выполняется в лаборатории с использованием имеющегося оборудования и альбомов. Преподаватель демонстрирует студентам принцип действия магнитного дефектоскопа. Сущность магнитного метода заключается в следующем. Деталь намагничивается в специальном приборе. При наличии дефекта возникающий при намагничивании магнитный поток рассеивается в месте расположения дефекта и выходит на поверхность. Затем намагниченную деталь покрывают магнитным порошком окиси железа (сухой метод) или поливают жидкостью (суспензией), состоящий из порошка окиси железа и керосина, или деталь погружают в суспензию (мокрый метод). Порошок окиси железа притягивается вышедшим на поверхность магнитным потоком, т.е. в тех местах, где имеется дефект: в результате ранее невидимый дефект становится хорошо заметным.

### **Содержание отчета**

1. Название работы, цель и задание.
2. Отпечаток по ликвации серы по методу Баумана и выводы по анализу.
3. Эскиз поверхности сварных соединений после выполнения макроанализа и выводы по результатам данного анализа.

### **Задача 3.**

#### **МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

Цель работы: ознакомиться с микроструктурным методом анализа металлов и сплавов и изучить взаимосвязь между структурой и механическими свойствами металлов и сплавов.

### **Задания**

- I. Используя литературу, ознакомиться с влиянием микроструктуры на механические свойства металлов и сплавов
2. Освоить методику приготовления микрошлифов.

3. Ознакомиться с устройством микроскопа МИМ-7, принципом его работы, зарисовать схему хода лучей.
4. Изучить под микроскопом и зарисовать поверхности образцов после различных обработок. Определить увеличение микроскопа.
5. Определить размер зерна на микрошлифах, используя балльную систему и непосредственно по цене делений окуляра (с охватом поперечника 10 зерен).
6. Выполнить контрольные задания.
7. Составить отчет.

### **Общие положения**

Различают макроструктуру, микроструктуру и субмикроструктуру металлов и сплавов.

Макроструктура - это структура металлов и сплавов, видимая невооруженным глазом или при увеличении до 30 раз. Микроструктура - это структура металлов и сплавов, видимая при увеличении в 100 - 1500 раз. Субмикроструктура - это структура металлов и сплавов, видимая при увеличении в 10000 - 250000 раз. В первом случае фиксируют грубую, дендритную структуру, волокна, трещины, раковины, во втором наблюдают зеренную структуру металлов и сплавов, в третьем - тонкую структуру металлов и сплавов, дислокации.

Микроструктурный анализ заключается в исследовании структуры материалов с помощью микроскопа.

### **Задачи микроанализа**

1. Оценка формы и размеров зерен металлов и сплавов.
2. Определение формы и размеров неметаллических включений.
3. Анализ изменения микроструктуры сплавов после термической, химико-термической обработки и обработки металлов давлением

4. Определение химического состава некоторых структурных составляющих по их окраске после применения избирательных травителей.

Методика приготовления микрошлифов (микрошлиф - обычно размерами 10x10x20 мм) включает три основных операции: шлифование, полирование, травление.

Шлифование проводят вручную или механическим способом на вращающемся шлифовальном круто, применяют шлифовальную бумагу следующих номеров: с 10-го до 65-го через десять номеров с убывающим размером зерна. После шлифования шлифовальной бумагой с большим размером зерна на поверхности наблюдается сильная шероховатость.

При смене шлифовальной бумаги меняют направление шлифования на перпендикулярное, что уменьшает шероховатость поверхности шлифа. После шлифования на поверхности шлифа видны риски.

Полирование проводят суспензиями или пастами. Суспензия представляет собой взвесь твердых нерастворимых частиц в водном или масляном диспергаторе. Паста - это концентрированная суспензия. В качестве твердой фазы применяют порошки  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$  с размером частиц 1 - 5 мкм. Полирование обычно проводят механическим способом: на вращающийся крут, покрытый фетром или сукном, наносят суспензию и полируют шлиф до "зеркального" блеска. На полированном микрошлифе наблюдают неметаллические включения, определяют их форму и размеры.

Травление осуществляется химическими травителями. При травлении между различными частями (фазами) микрошлифа возникает электрохимический потенциал и идет коррозия микрошлифа. Наиболее сильно растравливаются дефектные части микрошлифа: границы зерен, в меньшей степени само зерно. Наиболее растравленные части микрошлифа сильно рассеивают падающий свет и кажутся в микроскопе более темными, чем само зерно.

Зеренную структуру металлов и сплавов наблюдают в оптическом микроскопе МИМ-7, МИМ-8 и др. Практически увеличение микроскопа определяется произведением увеличения окуляра на увеличение объектива. Разреша-

ющая способность микроскопа зависит от длины волны видимого света и составляет 0,2 мкм при максимальном увеличении x1500. Форма и размер зерна оцениваются двумя методами: балльным методом и непосредственно по измерению обычно 10 поперечников зерен с предварительно определенной ценой деления шкалы окуляра.

### **Методика определения размера зерна по балльной системе и с помощью окуляр- и объект-микрометра**

#### **1. Определение размера зерна по баллу зерна.**

Установить увеличение микроскопа МИМ-7, равное x100. Сравнить зеренную структуру исследуемого микрошлифа с таблицей зернистости стали (x100) и определить балл зерна. По баллу зерна определить размер зерна в микрометрах.

#### **2. Определение размера зерна при помощи окулярных и объективных микрометров.**

Поставить на предметный столик объект-микрометр и определить, цену деления окуляр-объект-микрометра  $C$  для данного объектива по формуле, мм,

$$C=A/(B*100),$$

14

где  $C$  - цена деления окуляр-микрометра для данного объектива;  $A$  -

количество делений шкалы объект-микрометра:

$B$  - количество делений окуляр-микрометра.

Определить средний размер зерна в горизонтальном направлении, взяв 5 - 10 поперечников зерна, по формуле, мм :

$$d_{\text{ср}} = K \cdot C / M_{\text{гор}},$$

где  $K$  - количество делений окуляр-микрометра, соответствующее 5 - 10 поперечникам зерна;  $C$  - цена делений окуляр-микрометра для данного объектива;  $M_{\text{гор}}$  - число зерен (10 - 15) , приходящихся на  $K$  делении окуляр-

микрометра.

Определить средний размер зерна в вертикальном направлении, используя вышеприведенную методику, и рассчитать площадь зерна, приняв условно  $l_{\text{ср}} = d$ , по формуле :

$$d_{\text{ср}} = \frac{\pi l_{\text{ср}}^2 \cdot N}{4}$$

где  $d$  - средняя площадь зерна,  $\text{мкм}^2$ ,

### Порядок выполнения работы

Первое и второе задания студенты выполняют при подготовке к работе. Обратите внимание, что существенное влияние на свойства оказывают форма и размер неметаллических включений, неоднородность структуры.

Третье задание выполняется под руководством преподавателя всей группой.

Четвертое задание выполняется бригадами по 2 человека на металлографическом микроскопе МИМ-7. Каждая бригада получает комплект из 4 образцов сталей и чугунов:

1 - после шлифовки (сталь); 2 - после полировки (сталь); 3 - после полировки (чугун); 4 - после полировки и правления (сталь)

Установить шлиф па предметный столик микроскопа, рассмотреть и зарисовать наблюдаемую поверхность после различных видов обработки (в квадрате 40x40 мм), укачать наличие и отсутствие неметаллических включений и характер их распределения.

Определить увеличение микроскопа, используя характеристики: фокусное расстояние, числовая апертура объектива и увеличение окуляра.

### Содержание отчета

1. Название, цель работы, задание.

2. Микроструктуры шлифованного, полированного и травленых микро-шлифов стали и чугуна с необходимыми объяснениями, увеличение микроскопа.
3. Оптическая схема микроскопа МИМ-7 со спецификацией основных элементов схемы.
4. Разрешающая способность микроскопа при длине волны видимого света, равной 6000 А.
5. Размер зерна стали и чугуна.

#### **Задача 4.**

### **РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ**

Цель работы: изучить рентгеновский метод исследования структуры металлов и сплавов.

#### **Задания**

1. Используя учебники и пособия, изучить условия получения рентгеновских лучей и их свойства, ознакомиться с выводом уравнения Вульфа-Брегга, лежащего в основе изучаемого метода порошка (рентгеноструктурного анализа поликристаллических веществ методом Дебая-Шерера).
  2. Ознакомиться с устройством рентгеновского аппарата камеры РКД и рентгеновской трубки.
  3. Освоить методику установления вещества по межплоскостным расстояниям.
  4. Рассчитать рентгеновскую плотность исследуемого вещества 5.
- Выполнить контрольные задания.
6. Составить отчет.

#### **Общие положения**

Рентгеновские лучи возникают при соударении быстролетающих электронов с атомами любого элемента и представляют собой электромагнитные волны в



диапазоне между ультрафиолетовыми лучами и гамма-лучами. Рентгеновский спектр может быть сплошным (тормозным) либо линейчатым (характеристическим). Длина волны рентгеновского излучения по величине близка к межатомным расстояниям в кристаллической решетке вещества. Поэтому кристаллы являются для рентгеновских лучей естественными трехмерными дифракционными решетками.

Рентгеноструктурный анализ основан на отражении рентгеновских лучей от атомов кристаллической решетки и интерференции рентгеновских лучей, т.е. из их способности усиливать или ослаблять (гасить) друг друга.

Одним из распространенных методов рентгеноструктурного анализа является метод порошка (метод Дебая-Шерера), который позволяет следить за деформированием металла и контролировать режим термообработки. По рентгенограмме (дебаеграмме) можно судить о фазовом составе сплава, определить концентрации твердого раствора, изучать распределение внутренних напряжений.

В методе порошка в качестве объекта исследования берут поликристаллическое вещество (порошок), состоящее из частиц с линейными размерами не больше нескольких микрон, и используют характеристическое излучение.

Каждое вещество (фаза) обладает своей кристаллической решеткой. Семейства атомных плоскостей, образующих эту решетку, обладают характерным только для данной решетки набором значений межплоскостных расстояний  $d$ . Знание межплоскостных расстояний  $d$  исследуемого металла позволяет установить, с каким веществом (фазой) мы имеем дело.

Пусть узкий пучок монохроматических рентгеновских лучей с известной длиной волны  $\lambda$  падает на совокупность большого числа кристаллов (кристаллическую решетку), которая может быть охарактеризована семейством параллельных плоскостей с определенными межплоскостными расстояниями. При взаимодействии рентгеновских лучей с кристаллическим веществом возникает дифракционная картина, максимумы интенсивности которой

$$n\lambda = 2d\sin\theta,$$

удовлетворяют уравнению Вульфа-Брегга

где  $n$  - порядок дифракции (целое число 1, 2, 3 и т.д.);  $K$  - длина волны рентгеновских лучей;  $d$  - межплоскостное расстояние;  $\theta$  - угол скольжения лучей (угол рассеяния).

Из уравнения Вульфа-Брегга следует, что

$$\frac{d}{n} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$$

Так как длина волны характеристического излучения, в котором получена рентгенограмма, известна, то задача определения межплоскостных расстояний  $d/n$  сводится к нахождению углов  $\theta$  для всех линии. Вместо  $d/n$  пишем для сокращения записи  $d_i$ .

Рентгеноструктурный анализ производят на рентгеновском аппарате УРС-60, где источником рентгеновских лучей является рентгеновская трубка БСВ-4. Рентгеновской камерой называется устройство, позволяющее регистрировать на рентгеновской пленке дифракционные рентгеновские максимумы, которые затем расшифровываются. В методе порошка используется рентгеновская камера РКД, в которой исследуемое вещество в виде порошка наклеивается на стеклянную нить. Результат взаимодействия рентгеновских лучей с исследуемым веществом в виде рентгенограммы (дебаграммы) подлежит расшифровке, что и является практической задачей данной работы.

### **Порядок выполнения работы**

Первое задание выполняется при подготовке к лабораторной работе.

Для выполнения второго задания студенты в сопровождении преподавателя посещают лабораторию рентгеноструктурного анализа, где непосредственно знакомятся с рентгеновской аппаратурой.

Третье задание выполняется индивидуально. По рентгенограмме поликристаллического вещества, снятой в камере Дебая (РКД), определив углы и межплоскостные расстояния  $d$ , с помощью определителя межплоскостных расстояний установить, с какого вещества была снята рентгенограмма (про-

известии идентификацию вещества).

Четвертое задание, как и третье, выполняется индивидуально. Для исследуемого вещества определяется его рентгеновская плотность, которая совпадает с плотностью вещества для веществ с неискаженной структурой

Для облегчения расчетов рентгенограммы по определению межплоскостных расстояний рекомендуется заносить исходные данные, результаты замеров и расчеты в табл. 4.1 и заполнять ее последовательно по столбцам.

Расчет рентгенограммы для определения межплоскостных расстояний и идентификации веществ (к заданию 3). Длина волны излучения  $\lambda =$  , Å  
Диаметр камеры 57,3 мм.

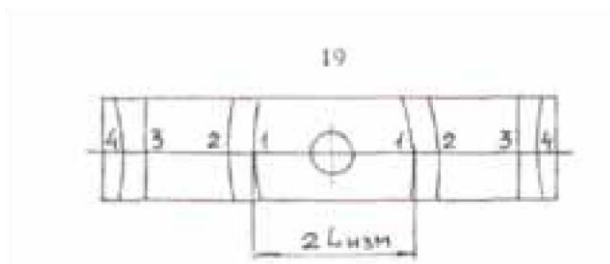
Радиус исследуемого образца  $\rho =$

Таблица 4.1.

№ п/п	$2L_{\text{изм}}$ , мм	$\theta_{\text{приб}}$ , град.	Поправка на поглощение $\Delta\rho$ , мм	$2L_{\text{исп}}$ , мм	$\theta_{\text{точн}}$ , град.	$\theta_{\text{точн}}$ , град. и мин.	$\text{Sin}\theta$	$d_i$ расч. Å	Табл. знач. $d_i$ Å
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1									
2									
3									
4									

Столбец 1. Для расчета выбирают четыре линии, которые цифрами отмечены на рентгенограмме.

Столбец 2. С помощью линейки измеряют расстояние  $2L$  между парой указанных линий, симметрично расположенных относительно входного отверстия (с точностью до 0,2 мм).



Столбец 3. Приближенные значения угла  $\theta_{\text{прибл}}$  определяют по формуле, град. :

$$\theta_{\text{прибл}} = 2L_{\text{изм}} / 2.$$

Столбец 4. Более точное значение угла находят с учетом поправки на поглощение. Чтобы упростить расчеты, в специальной таблице для каждого значения  $\theta$  дано значение  $\Delta\rho$  в зависимости от известного радиуса  $\rho$  исследуемого образца.

Столбец 5. Величину  $2L_{\text{испр}}$  получают из формулы

$$2L_{\text{испр}} = 2L_{\text{изм}} - \Delta\rho,$$

где  $\Delta\rho$  - поправка на поглощение, выбранная из табл.4.1.

Столбец 6. Угол  $\theta_{\text{точн}}$  в градусах рассчитывают по формуле, град.

$$\theta_{\text{точн}} = 2L_{\text{испр}} / 2, \text{ (например, } \theta_{\text{точн}} = 42,6^\circ / 2 = 21,3^\circ).$$

Столбец 7. Значения угла  $\theta_{\text{точн}}$  записывают в градусах и минутах (например,  $21,3^\circ = 21^\circ 18'$ , т.к.  $0,3 \times 60' = 18'$ ).

Столбец 8. Значения с точностью до четвертого знака после запятой выбирают из тригонометрических таблиц.

Столбец 9. Используя значение  $\sin\theta$  и известную длину волны рентгеновского излучения, с помощью уравнения Вульфа-Брегга рассчитывают межплоскостные расстояния  $d_i$  расч.

$$d_i \text{ расч} = \lambda_\alpha / 2\sin\theta.$$

Столбец 10. Табличные значения  $d_{\text{табл}}$ .

С помощью справочной табл. 4.2 следует определить вещество, для которого табличные значения  $d_{\text{табл}}$  совпадают с расчетными значениями межплос-

костных расстояний драсч. Записать название вещества.

Определение рентгеновской плотности вещества (к заданию 4). После выполнения расчета рентгенограммы и идентификации исследуемого вещества необходимо, пользуясь справочной табл.4.2., найти тип кристаллической решетки вещества, координационное число и параметр решетки найденного вещества.

Рентгеновская плотность вещества  $\rho$  рассчитывается по формуле, г/см<sup>3</sup>,

$$\rho = nA / a^3,$$

где  $\rho$  - плотность исследуемого вещества;  $n$  - число атомов в элементарной ячейке;  $A$  - вес одного атома в а.е.м. (1 а.е.м. =  $1,66 \times 10^{-24}$  г);  $a$  - параметр ячейки .

### Содержание отчета

1. Название, цель работы, задание.
2. Краткое содержание работы.
3. Расчет рентгенограммы, выполненный в виде табл. 4.1.
4. Расчет рентгеновской плотности исследуемого вещества.

### Задача 5.

### ПРОЦЕСС КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ВЕЩЕСТВ

Цель работы: получить процесс затвердевания кристаллических веществ и установить взаимосвязь между структурой слитка и условиями процесса кристаллизации.

### Задания

1. Используя учебники и пособия, познакомиться с основными параметрами процесса кристаллизации.
2. Построить кривые охлаждения цинка.

3. Проследить за процессом кристаллизации капли азотнокислого свинца  $Pb(NO_3)_2$ .
4. Изучить строение металлического слитка и установить взаимосвязь между структурой слитка и условиями кристаллизации.
5. Выполнить контрольные задания.
6. Составить отчет.

### Общие положения

Переход металла из жидкого состояния в твердое называется кристаллизацией.

Она протекает вследствие перехода к термодинамически более устойчивому состоянию с меньшей энергией Гиббса  $G$  (свободной энергией).

При температуре  $t_0$  значение  $G$  металла в жидком и твердом состояниях равны (рис.5.1). Температура  $t_0$  соответствует равновесной температуре кристаллизации (или плавления) данного вещества, при которой обе фазы (жидкая и твердая) могут существовать одновременно. При температуре выше  $t_c$  более устойчив жидкий металл, имеющий меньшее значение  $G$ , а ниже этой температуры устойчив твердый металл. Процесс кристаллизации развивается, если имеется разность  $\Delta G$  (см. рис.5.1).

Согласно второму закону термодинамики ни один процесс не может самопроизвольно совершаться без уменьшения свободной энергии Гиббса.

Следовательно, процесс кристаллизации может протекать лишь при переохлаждении металла ниже  $t_0$ . Разность  $\Delta t$  между температурой  $t_0$  и температурой  $t_f$ , при которой протекает кристаллизация, называется степенью переохлаждения:  $\Delta t = t_0 - t_f$ . На рис.5.2 приведены кривые охлаждения, построенные методом термического анализа, которые характеризуют процесс кристаллизации чистых металлов при охлаждении с разной скоростью. При медленном охлаждении степень переохлаждения невелика и кристаллизация протекает при температуре, близкой к равновесной (кривая  $V_1$ ). На кривых охлаждения при температурах кристаллизации отмечаются горизонтальные

площадки (остановка в падении температуры), образование которых объясняется выделением скрытой теплоты кристаллизации.

С увеличением скорости охлаждения степень переохлаждения возрастает (кривые  $V_2, V_3$ ), и процесс кристаллизации протекает при температурах, лежащих значительно ниже  $t_0$ . Степень переохлаждения (зависит от природы и чистоты металла; обычно она не превышает 10-30 °С. Чем чище жидкий металл, тем он более склонен к переохлаждению. При очень больших скоростях охлаждения можно получать "аморфный" металл.

Как впервые установил Д.К.Чернов, процесс кристаллизации начинается с образования кристаллических зародышей (центров кристаллизации) и продолжается при их росте.

Пока образовавшиеся кристаллы растут свободно, они могут иметь геометрически относительно правильную форму. При столкновении же растущих кристаллов их правильная форма нарушается. В результате расту-

### Кристаллизация

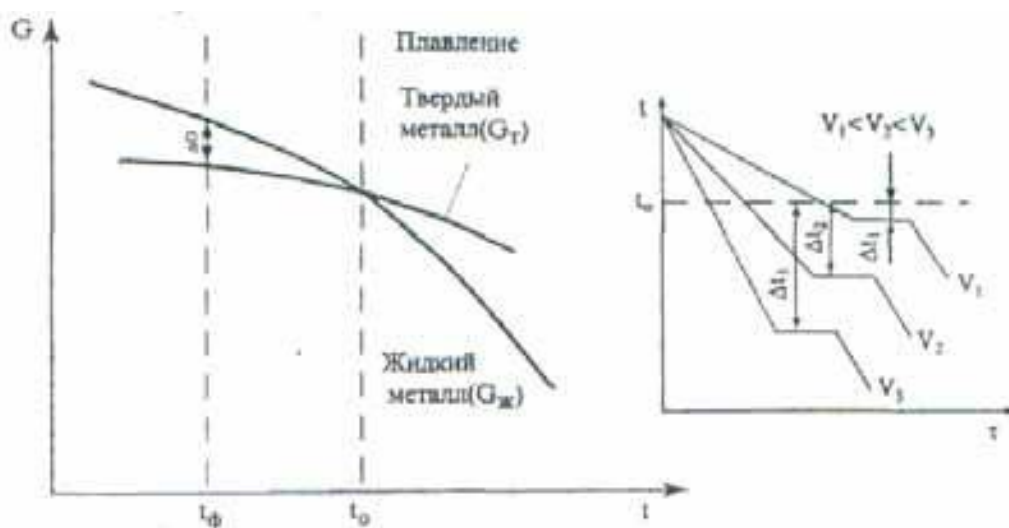


Рис.5.1 Изменение энергии Гиббса металла в случае

Рис.5.2. Кривые охлаждения

Число центров кристаллизации и скорость роста кристаллов. Скорость про-

цесса кристаллизации и строение металла после затвердевания зависят от числа зародышей (центров кристаллизации), возникающих в единицу времени в единице объема ( $1/\text{мм} \cdot \text{с}$ ), от скорости роста зародышей, т.е. от скорости увеличения линейных размеров растущего кристалла в единицу времени ( $\text{мм}/\text{с}$ ).

Величина зерна. Чем больше центров кристаллизации (зародышей) и меньше скорость их роста, тем мельче кристалл, выросший из одного зародыша (зерно металла).

Величина зерна может меняться в пределах от 0.4 до 0.001 мм.

При небольшой степени переохлаждения (малой скорости охлаждения) число зародышей мало и скорость роста велика. В этих условиях будет получено крупное зерно. С увеличением степени переохлаждения число зародышей возрастает в большей мере, чем скорость их роста, и размер зерна в затвердевшем металле уменьшается (рис.5.3). Чем больше размер зерна, тем ниже пластичность и прочность металла.

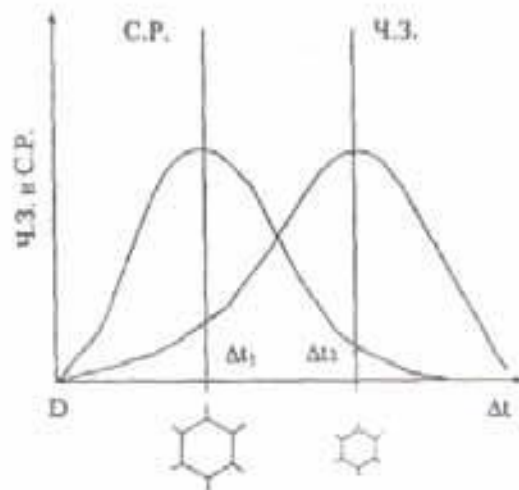


Рис.5.3 Схема зависимости числа зародышей (ч.з.) и скорости их роста (с.р.) от степени переохлаждения  $\Delta t$

Величина зерна зависит не только от степени переохлаждения. На размер зерна влияют температура нагрева и разливки жидкого металла, его химический состав и присутствие в нем посторонних примесей.



Строение металлического слитка. Кристаллы, образующиеся в процессе затвердевания металла, в зависимости от скорости охлаждения- характера и количества примесей могут иметь правильную форму.

Чаще в процессе кристаллизации образуются разветвленные, или древовидные, кристаллы, получившие название дендритов. Правильная форма дендритов искажается в результате столкновения и срастания частиц на поздних стадиях кристаллизации. Кристаллизация жидкого металла начинается у поверхности более холодной формы. Вследствие большой скорости охлаждения это приводит к образованию на поверхности слитка очень узкой зоны 1 сравнительно мелких равноосных кристаллов (рис.5.4).

За зоной 1 расположена зона 2 удлинённых дендритов. Рост этих кристаллов происходит в направлении отвода тепла, т.е. нормально к стенкам изложницы. В случае сильного перегрева металла, быстрого охлаждения его высокой температуры литья и спокойного заполнения формы зона удлинённых дендритов может полностью заполнить весь объем.

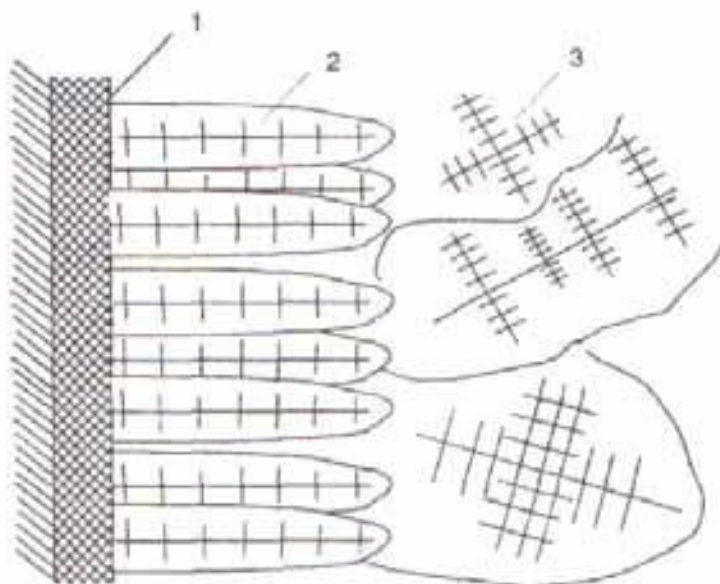


Рис.5.4. Схема строения литой стали: 1 - зона мелких различно ориентированных кристаллов; 2 - зона столбчатых кристаллов; 3 - зона крупных различно ориентированных кристаллов.

При низкой температуре литья и медленном охлаждении, например в сре-

динных слоях крупных отливок, также создаются условия для возникновения зародышей кристаллов. Это приводит к образованию во внутренней части отливки структурной зоны 3, состоящей из равноосных различно ориентированных дендритов. Размеры этих кристаллов зависят от степени перегрева жидкого металла, скорости охлаждения, химического состава, наличия примесей и др.

Тугоплавкие частицы, находящиеся в жидком металле, способствуют развитию зоны мелких равноосных кристаллов.

Жидкий металл имеет больший удельный объем, чем твердый, поэтому в той части слитка, которая затвердевает в последнюю очередь, образуется полость - усадочная раковина. Усадочная раковина окружена наиболее загрязненной частью металла, в котором после затвердевания образуются микро- и макропоры и пузыри.

### **Порядок выполнения работы**

1. Первое задание выполняется студентами в порядке подготовки к лабораторной работе.

Задания 2, 3 и 4 выполняются бригадами по 2 человека. Знания, приобретенные при выполнении 1-го пункта, используются для объяснения полученных результатов.

2. Второе задание бригада выполняет в следующем порядке:

- на установке поставлен тигель с готовым расплавом Zn. В расплав погружен горячий спай термопары, холодный подключен к потенциометру;

- снять показания потенциометра через 30 секунд в процессе охлаждения расплава Zn;

- по полученным данным построить кривые охлаждения в координатах ( $M_B$ -с). По данной кривой определить критические точки в градусах Цельсия, соответствующие перегибам или остановкам ( $M_B$ ), пользуясь градуировочной шкалой.

3. Процесс кристаллизации капли азотнокислого свинца изучают под микроскопом при увеличении не больше  $\times 100$ . Для этого на подогретое стекло наносят каплю почти насыщенного раствора соли  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  и устанавливают на предметный столик микроскопа так, чтобы край капли был виден в окуляр.

Следует обратить внимание на то, что процесс кристаллизации начинается у краев капли с образованием мелких зерен. Вслед за мелкими зернами перпендикулярно им в сторону отвода тепла растут крупные столбчатые кристаллы. В центре капли растут беспорядочно ориентированные кристаллы, имеющие форму дендритов.

4. Для выполнения четвертого задания каждая бригада получает коллекцию изломов слитков, имеющих различное строение, которое определяется условиями охлаждения. Строение изломов зарисовать и описать предполагаемые условия кристаллизации. Следует обратить внимание на факторы, способствующие развитию той или иной зоны металлического слитка, а также на свойства этих зон.

### **Содержание отчета**

1. Название, цель работы и задание.
2. Кривые охлаждения цинка с необходимыми объяснениями и выводами.
3. Схема строения закристаллизовавшейся капли азотнокислого свинца и необходимыми объяснениями и выводами.
4. Рисунки металлических слитков, закристаллизовавшихся при различных условиях, с необходимыми объяснениями и выводами.

### **Задача 6.**

## **ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

Цель работы: определить влияние холодной пластической деформации и последующей термообработки на структуру и механические свойства металлов и сплавов.

### **Задания**

1. Используя литературные источники, изучить влияние упругой и пластической деформации на изменение структуры металлов и сплавов на микро- и субмикроуровнях, а также наклепа на изменение физических, химических и механических свойств.
2. Определить влияние степени холодной пластической деформации,  $\lambda\%$ , на твердость  $\alpha$ -латуни и построить график зависимости  $HВ = f(\lambda)$
3. Рассчитать температуру начала рекристаллизации для  $\alpha$ -латуни, используя формулу А.А.Бочвара.
4. Изучить влияние отжига на прочность  $\alpha$ -латуни.
5. Определить температуру рекристаллизационного отжига и области холодной и горячей обработки  $\alpha$ -латуни .
6. Выполнить контрольные задания.
7. Составить отчет.

### **Общие положения**

Пластическая деформация - это деформация, которая сохраняется после прекращения действий внешних сил.

Процесс пластической деформации происходит путем скольжения гонких слоев кристалла по определенным кристаллографическим плоскостям. Скольжение осуществляется в результате перемещения в кристалле дислокации. С увеличением степени деформации количество дислокаций увеличивается, движение их затрудняется в результате взаимодействия друг с другом. Происходит упрочнение металла, обусловленное изменением дислокационной структуры. В результате этих процессов изменяется форма кристаллов.

До деформации зерно имело округлую форму, после деформации оно вытягивается в направлении действующих сил, образуя волокнистую структуру. С увеличением степени деформации растут твердость, предел прочности, уменьшаются показатели пластичности.

Явление упрочнения металла при холодной пластической деформации называется наклепом, изменяются не только механические, но и физические, и химические свойства: увеличивается электросопротивление, снижается магнитная проницаемость, понижается коррозионная стойкость.

При нагреве деформированного металла происходят явления возврата и рекристаллизации, возвращающие металл в равновесное состояние.

Возврат происходит после нагрева наклепанного металла до температур ниже  $0,3 T_{пл}$ . В результате такого нагрева снимаются микронапряжения, происходит процесс перераспределения дислокаций, который называется полигонизацией. Это приводит к изменению тонкой структуры (субструктуры), т.е. внутреннего строения деформированных зерен без изменения их формы и размеров. Микроструктура остается без изменения, незначительно снижается прочность, несколько повышается пластичность, восстанавливаются физические свойства.

При дальнейшем повышении температуры до некоторой величины происходит образование новых равноосных зерен вместо старых деформированных. Этот процесс называется первичной рекристаллизацией. После рекристаллизации металл состоит из новых равноосных зерен. Полностью снимается наклеп и восстанавливаются все свойства. В процессе последующего нагрева происходит рост рекристаллизованных зерен за счет других. Этот процесс носит название собирательной рекристаллизации, он обусловлен стремлением системы к уменьшению свободной энергии.

Механические свойства меняются незначительно. Если какие-то зерна имеют предпочтительные условия для роста, то эта стадия рекристаллизации называется вторичной. Образующаяся разнотернистость (много мелких и небольшое количество крупных зерен) отрицательно сказывается на механиче-

ских свойствах, сильно понижается ударная вязкость. Этот процесс реализуется не во всех металлах.

Температура начала рекристаллизации или температурный порог рекристаллизации может быть определен по формуле А.А.Бочвара:

$$T_{рек} = \alpha T_{пл}$$

где  $\alpha$  - коэффициент, зависящий от состава и структурного состояния металла,  $T_{пл}$  - температура плавления, К.

В зависимости от отношения температуры деформации к температуре рекристаллизации различают холодную и горячую деформации. Деформация, которая проводится ниже температуры рекристаллизации, называется холодной, она сопровождается наклепом. Деформация, осуществляемая выше температуры рекристаллизации, называется горячей, здесь упрочнение, вызванное пластической деформацией, снимается рекристаллизацией, протекающей при температурах деформации.

### Порядок выполнения работы

1. Первое задание студенты выполняют дома при подготовке к лабораторным работам.
2. Работа выполняется в следующем порядке. Группа студентов делится на бригады. Первая бригада измеряет штангенциркулем высоту недеформированного и деформированного образцов с точностью до 0,1 мм и рассчитывает степень деформации по формуле

$$\alpha = ((H_0 - H_1) / H_0) \cdot 100 \%$$

где  $H_0$  - высота недеформированного образца;  $H_1$  - высота деформированного образца.

Замеряется твердость по Роквеллу (HRB) недеформированного и деформированных образцов, значение твердости по Роквеллу переводится и величины твердости по Бринеллю, результаты измерения заносятся в табл.

6.1, строится график зависимости  $HВ = f(\lambda, \%)$ .

Таблица 6.1

Номер образца	Материал	$\lambda, \%$	HRB				НВ
			I	11	111	среднее	
1	Л80 ( $\alpha$ - Латунь)	0					
2							
3							
4							

3. Вторая группа студентов отжигает в печи образцы с наибольшей степенью деформации при  $t = 200, 400, 600 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 20 минут и измеряет твердость по Роквеллу (HRB), переводит значения твердости по Роквеллу в величины твердости по Бринеллю, результаты измерений заносит в табл. 6.2.

4. Рассчитать температуру начала рекристаллизации  $\alpha$ -латуни (Л80,  $t_{пл}=1059 \text{ }^\circ\text{C}$ ) по формуле А.А.Бочвара:  $T_{н.р} = \alpha T_{пл}$ .

5. Построить график зависимости: НВ  $f(t_{отж})$  и определить ориентировочно температуру начала рекристаллизации  $\alpha$ -латуни.

Таблица 6.2

Номер образца	Материал	Температура отжига, $^\circ\text{C}$	$\lambda, \%$	HRB				НВ
				I	II	III	среднее	
4	Л80 ( $\alpha$ - Латунь)	0 200						
4								
4				400				
4				600				

### Содержание отчета

1. Название, задание и цель работы.
2. Табл. 6.1 с экспериментальными данными твердости деформируемой  $\alpha$ -латуни. График зависимости твердости  $\alpha$ -латуни (НВ) от степени деформации, %.
3. Расчет температуры начала рекристаллизации  $\alpha$ -латуни (Л 80).
4. Табл. 6.2 с экспериментальными данными по твердости отожженной  $\alpha$ -

латуни при  $t = 200, 400, 600$  °С. График зависимости твердости  $\alpha$  –латуни (НВ) от температуры отжига.

5. Температура рекристаллизационного отжига  $\alpha$ -латуни, область холодной и горячей обработки  $\alpha$  -латуни.

Литература



1. Лахтин, Ю. М. Материаловедение : учебник / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Машиностроение, 1990. - 528 с. : ил. - (Для вузов). - Библиогр.: с. 520. - Предм. указ.: с. 521. - ISBN 5-217-00858-X
2. Бондаренко, Г. Г. Материаловедение : учебник / Г. Г. Бондаренко, Т. А. Кабанова, В. В. Рыбалко ; под ред. Г. Г. Бондаренко. - М. : Высшая школа, 2007. - 360 с. : ил. - Библиогр.: с. 340. - ISBN 978-5-06-005566-5
3. Колесов, С. Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов / С. Н. Колесов, И. С. Колесов. - М. : Высшая школа, 2004. - 519с. - Библиогр.: с. 511. - ISBN 5-06-004412-2

Интернет-ресурсы:

1. <http://window.edu.ru/> – Единое окно доступа к образовательным ресурсам.
2. [www.biblioclub.ru](http://www.biblioclub.ru) – Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека онлайн».
3. [www.e.lanbook.com](http://www.e.lanbook.com) – Электронно-библиотечная система «Лань»
4. [catalog.ncstu.ru](http://catalog.ncstu.ru) – Электронный каталог фолиант СКФУ
5. [www.library.stavsu.ru](http://www.library.stavsu.ru) – Электронная библиотека и электронный каталог научной библиотеки СКФУ

*МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ*

по выполнению контрольных работ

по дисциплине «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»

для студентов заочной формы обучения направления подготовки

18.03.01 Химическая технология

*Составители*

*Е.Н. Павленко, к.т.н., доцент*

*Отв. редактор*

*Д.В. Казаков, к.т.н., доцент*

Редактор Л.Д. Бородастова

---

Подписано в печать 10.04.2016 г.

Формат 60 × 84 1/16

Уч.-изд. л. 0,4 п.л.

Усл. печ. л. 0,5 п.л.

Тираж 50 экз.

---

Северо-Кавказский федеральный университет

Невинномысский технологический институт (филиал)

357108, г. Невинномысск, ул. Гагарина, 1

---

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Невинномысский технологический институт (филиал)

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
по выполнению практических работ  
по дисциплине «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»  
для студентов очной формы обучения направления подготовки  
15.03.02 Технологические машины и оборудование

Невинномысск 2020

Методические указания разработаны в соответствии с требованиями ФГОС ВО и рабочей программы дисциплины «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ». Указания предназначены для студентов очной формы обучения, направления подготовки 15.03.02 Технологические машины и оборудование

Составители

Д.В. Казаков, к.т.н., доцент

Отв. редактор

Е.Н. Павленко, к.т.н., доцент

## ВВЕДЕНИЕ

Методические указания и задания по курсу материаловедения составлены в соответствии с программой данного курса, читаемого в ФГАОУ ВО «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ», Невинномысский технологический институт (филиал).

Данные рекомендации способствуют развитию общих и профессиональных компетенций, постепенному и целенаправленному развитию познавательных способностей.

В результате освоения данной учебной дисциплины студент должен уметь:

- выполнять механические испытания образцов материалов;
- использовать физико-химические методы исследования металлов;
- пользоваться справочными таблицами для определения свойств материалов;
- выбирать материалы для осуществления профессиональной деятельности.

В результате освоения данной учебной дисциплины студент должен знать:

- основные свойства и классификацию материалов, используемых в профессиональной деятельности;
- наименование, маркировку, свойства обрабатываемого материала;
- правила применения смазывающих и охлаждающих материалов;
- основные сведения о металлах и сплавах;
- основные сведения о неметаллических, прокладочных, уплотнительных и электротехнических материалах, стали, их классификацию.

Для выполнения практических работ студенту рекомендуется использовать литературу, приведенную в конце методических указаний.

## Практическая работа № 1

«Физические свойства металлов и методы их изучения»

**Цель работы:** изучить физические свойства металлов, методы их определения.

**Ход работы:**

1. Ознакомьтесь с теоретическими положениями.
2. Выполните задание преподавателя.
3. Составьте отчет в соответствии с заданием.

### Теоретическая часть

К физическим свойствам относятся: плотность, плавление (температура плавления), теплопроводность, тепловое расширение.

Плотность - количество вещества, содержащееся в единице объема. Это одна из важнейших характеристик металлов и сплавов. По плотности металлы делятся на следующие группы: **легкие** (плотность не более  $5 \text{ г/см}^3$ ) - магний, алюминий, титан и др; **тяжелые** - (плотность от 5 до  $10 \text{ г/см}^3$ ) - железо, никель, медь, цинк, олово и др. (это наиболее обширная группа); **очень тяжелые** (плотность более  $10 \text{ г/см}^3$ ) - молибден, вольфрам, золото, свинец и др. В таблице 1 приведены значения плотности металлов.

Таблица 1

#### Плотность металлов

Температура плавления - это температура, при которой металл переходит из кристаллического (твердого) состояния в жидкое с поглощением теплоты.

Температура плавления металлов лежат в диапазоне от  $-39 \text{ }^\circ\text{C}$  (ртуть) до  $3410 \text{ }^\circ\text{C}$  (вольфрам). Температура плавления большинства металлов (за исключением щелочных) высока, однако некоторые «нормальные» ме-

таллы, например олово и свинец, можно расплавить на обычной электрической или газовой плите.

В зависимости от температуры плавления металл подразделяют на следующие группы: **легкоплавкие** (температура плавления не превышает 600 °С) - цинк, олово, свинец, висмут и др.; **среднеплавкие** (от 600 °С до 1600 °С) - к ним относятся почти половина металлов, в том числе магний, алюминий, железо, никель, медь, золото; **тугоплавкие** (более 1600 °С) - вольфрам, молибден, титан, хром и др. При введении в металл добавок температура плавления, как правило, понижается.

Таблица 2

### Температура плавления и кипения металлов

Теплопроводность - способность металла с той или иной скоростью проводить теплоту при нагревании.

Электропроводность - способность металла проводить электрический ток.

Тепловое расширение - способность металла увеличивать свой объем при нагревании.

Гладкая поверхность металлов отражает большой процент света - это явление называется металлическим блеском. Однако в порошкообразном состоянии большинство металлов теряют свой блеск; алюминий и магний, тем не менее, сохраняют свой блеск и в порошке. Наиболее хорошо отражают свет алюминий, серебро и палладий - из этих металлов изготавливают зеркала. Для изготовления зеркал иногда применяется и родий, несмотря на его исключительно высокую цену: благодаря значительно большей, чем у серебра или даже палладия, твердости и химической стойкости, родиевый слой может быть значительно тоньше, чем серебряный.

### Методы исследований в материаловедении

Основными методами исследования в металлостроении и материаловедении являются: излом, макроструктура, микроструктура, электронная микроскопия,

рентгеновские методы исследования. Рассмотрим их особенности более подробно.

1. Излом - самый простой и доступный способ оценки внутреннего строения металлов. Метод оценки изломов, несмотря на свою кажущуюся грубость оценки качества материала, применяется довольно широко в различных отраслях производства и научных исследований. Оценка излома во многих случаях может характеризовать качество материала.

Излом может быть кристаллическим или аморфным. Аморфный излом характерен для материалов, не имеющего кристаллического строения, таких как стекло, канифоль, стекловидные шлаки.

Металлические сплавы, в том числе сталь, чугун, алюминиевые, магниевые сплавы, цинк и его сплавы дают зернистый, кристаллический излом.

Каждая грань кристаллического излома является плоскостью скалывания отдельного зерна. Поэтому излом показывает нам размеры зерна металла. Изучая излом стали, можно видеть, что размер зерна может колебаться в очень широких пределах: от нескольких сантиметров в литой, медленно остывшей, стали до тысячных долей миллиметра в правильно откованной и закаленной стали. В зависимости от размера зерна, излом может быть крупнокристаллический и мелкокристаллический. Обычно мелкокристаллический излом соответствует более высокому качеству металлического сплава.

В случае если разрушение исследуемого образца проходит с предшествующей пластической деформацией, зерна в плоскости излома деформируются, и излом уже не отражает внутреннего кристаллического строения металла; в этом случае излом называется волокнистым. Часто в одном образце в зависимости от уровня его пластичности, в изломе могут быть волокнистые и кристаллические участки. Часто по соотношению площади излома, занятого и кристаллическими участками при данных условиях испытания оценивают качество металла.

Хрупкий кристаллический излом может получаться при разрушении по границам зерен или по плоскостям скольжения, пересекающим зерна. В первом случае излом называется межкристаллитным, во втором транскристаллитным.



Иногда, особенно при очень мелком зерне, трудно определить природу излома. В этом случае излом изучают с помощью лупы или бинокулярного микроскопа. В последнее время развивается отрасль металловедения по фрактографическому изучению изломов на металлографических и электронных микроскопах. При этом находят новые достоинства старого метода исследований в металловедении - исследований излома, применяя к таким исследованиям понятия фрактальных размерностей.

2. Макроструктура - является следующим методом исследования металлов.

Макроструктурное исследование заключается в изучении плоскости сечения изделия или образца в продольном, поперечном или любых иных направлениях после травления, без применения увеличительных приборов или при помощи лупы. Достоинством макроструктурного исследования является то обстоятельство, что с помощью этого метода можно изучить структуру непосредственно целой отливки или слитка, поковки, штамповки и т.д. С помощью этого метода исследования можно обнаружить внутренние пороки металла: пузыри, пустоты, трещины, шлаковые включения, исследовать кристаллическое строение отливки, изучать неоднородность кристаллизации слитка и его химическую неоднородность (ликвацию).

С помощью серных отпечатков макрошлифов на фотобумаге по Бауману определяется неравномерность распределения серы по сечению слитков. Большое значение этот метод исследования имеет при исследовании кованных или штампованных заготовок для определения правильности направления волокон в металле.

3. Микроструктура - один из основных методов в металловедении - это исследование микроструктуры металла на металлографических и электронных микроскопах.

Этот метод позволяет изучать микроструктуру металлических объектов с большими увеличениями: от 50 до 2000 раз на оптическом металлографическом микроскопе и от 2 до 200 тыс. раз на электронном микроскопе. Исследование микроструктуры производится на полированных шлифах. На нетравленных

шлифах изучается наличие неметаллических включений, таких как оксиды, сульфиды, мелкие шлаковые включения и другие включения, резко отличающиеся от природы основного металла.

Микроструктура металлов и сплавов изучается на травленых шлифах. Травление обычно производится слабыми кислотами, щелочами или другими растворами, в зависимости от природы металла шлифа. Действие травления заключается в том, что он по-разному растворяет различные структурные составляющие, окрашивая их в разные тона или цвета. Границы зерен, отличающиеся от основного раствора имеют травимость обычно отличающуюся от основы и выделяется на шлифе в виде темных или светлых линий.

Видимые под микроскопом полиэдры зерен представляют собой сечения зерен поверхностью шлифа. Так как это сечение является случайным и может проходить на разных расстояниях от центра каждого отдельного зерна, то различие в размерах полиэдров не соответствует действительным различиям в размерах зерен. Наиболее близкой величиной к действительному размеру зерна являются наиболее крупные зерна.

При травлении образца, состоящего из однородных кристаллических зерен, например чистого металла, однородного твердого раствора и др. наблюдается часто различно протравленные поверхности разных зерен.

Это явление объясняется тем, что на поверхности шлифа выходят зерна, имеющие различные кристаллографическую ориентировку, вследствие чего степень воздействия кислоты на эти зерна оказываются разной. Одни зерна выглядят блестящими, другие сильно протравливаются, темнеют. Это потемнение связано с образованием различных фигур травления, по-разному отражающих световые лучи. В случае сплавов, отдельные структурные составляющие образуют микрорельеф на поверхности шлифа, имеющий участки с различным наклоном отдельных поверхностей .

Нормально расположенные участки отражают наибольшее количество света и оказываются наиболее светлыми. Другие участки - более темные. Часто контраст в изображении зернистой структуры связан не со структурой поверхности

зерен, а с рельефом у границ зерен. Кроме того, различные оттенки структурных составляющих могут являться результатом образования пленок, образованных при взаимодействии травителя со структурными составляющими.

С помощью металлографического исследования можно осуществлять качественное выявление структурных составляющих сплавов и количественное изучение микроструктур металлов и сплавов, во-первых, путем сравнения с известными изученными микросоставляющими структур и, во-вторых, специальными методами количественной металлографии.

Величина зерна определяется. Методом визуальной оценки, состоящей в том, что рассматриваемая микроструктура, приближенно оценивается баллами стандартных шкал по ГОСТ 5639-68, ГОСТ 5640-68. По соответствующим таблицам, для каждого балла определяется площадь одного зерна и количество зерен на  $1 \text{ мм}^2$  и в  $1 \text{ мм}^3$ .

Методом подсчета количества зерен на единице поверхности шлифа по соответствующим формулам. Если  $S$  - площадь, на которой подсчитывается количество зерен  $n$ , а  $M$  - увеличение микроскопа, то средняя величина зерна в сечении поверхности шлифа

Определение фазового состава. Фазовый состав сплава чаще оценивают на глаз или путем сравнения структуры со стандартными шкалами.

Приближенный метод количественного определения фазового состава может быть проведен методом секущей с подсчетом протяженности отрезков, занятых разными структурными составляющими. Соотношение этих отрезков соответствует объемному содержанию отдельных составляющих.

Точечный метод А.А. Глаголева. Этот метод осуществляется путем оценки количества точек (точек пересечения окулярной сетки микроскопа), попадающих на поверхности каждой структурной составляющей. Кроме того, методом количественной металлографии производят: определение величины поверхности раздела фаз и зерен; определение числа частиц в объеме; определение ориентации зерен в поликристаллических образцах.

4. Электронная микроскопия. Большое значение в металлографических исследованиях находит в последнее время электронный микроскоп. Несомненно, ему принадлежит большое будущее. Если разрешающая способность оптического микроскопа достигает значений  $0,00015 \text{ мм} = 1500 \text{ \AA}$ , то разрешающая способность электронных микроскопов достигает  $5\text{-}10 \text{ \AA}$ , т.е. в несколько сот раз больше, чем у оптического.

На электронном микроскопе осуществляют исследование тонких пленок (реплик), снятых с поверхности шлифа или непосредственное изучение тонких металлических пленок, полученных утонением массивного образца.

В наибольшей степени нуждаются в применении электронной микроскопии исследования процессов, связанные с выделением избыточных фаз, например, распад пересыщенных твердых растворов при термическом или деформационном старении.

5. Рентгеновские методы исследования. Одним из наиболее важных методов в установлении кристаллографического строения различных металлов и сплавов является рентгеноструктурный анализ. Этот метод исследования дает возможность определения характера взаимного расположения атомов в кристаллических телах, т.е. решить задачу, не доступную ни обычному, ни электронному микроскопу.

В основе рентгеноструктурного анализа лежит взаимодействие между рентгеновскими лучами и лежащими на их пути атомами исследуемого тела, благодаря которому последние становятся как бы новыми источниками рентгеновских лучей, являясь центрами их рассеяния.

Рассеяние лучей атомами можно уподобить отражению этих лучей от атомных плоскостей кристалла по законам геометрической оптики.

Рентгеновские лучи отражаются не только от плоскостей, лежащих на поверхности, но и от глубинных. Отражаясь от нескольких одинаково ориентированных плоскостей, отраженный луч усиливается. Каждая плоскость кристаллической решетки дает свой пучок отраженных волн. Получив определенное чередование отраженных пучков рентгеновских лучей под определенными углами,

рассчитывают межплоскостное расстояние, кристаллографические индексы отражающих плоскостей, в конечном счете, форму и размеры кристаллической решетки.

## **Практическая часть**

### **Содержание отчета.**

1. В отчете необходимо указать название, цель работы.
2. Перечислите основные физические свойства металлов (с определениями).
3. Зафиксируйте в тетради таблицы 1-2. Сделайте выводы по таблицам.
4. Заполните таблицу: «Основные методы исследования в материаловедении».

Рентгеновские  
методы исследования

## **Практическая работа № 2**

Тема: «Изучение диаграмм состояния»

**Цель работы:** ознакомление студентов с основными видами диаграмм состояния, их основными линиями, точками, их значением.

### **Ход работы:**

1. Изучите теоретическую часть.
2. Выполните задания практической части.

## **Теоретическая часть**

Диаграмма состояния представляет собой графическое изображение состояния любого сплава изучаемой системы в зависимости от концентрации и температуры (см.рис. 1)

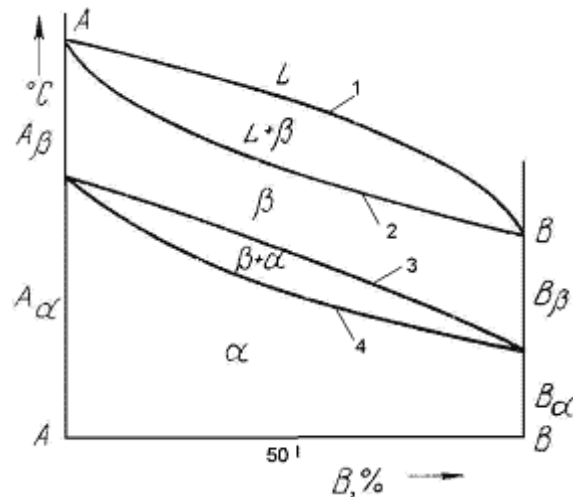


Рис.1 Диаграмма состояния

Диаграммы состояния показывают устойчивые состояния, т.е. состояния, которые при данных условиях обладают минимумом свободной энергии, и поэтому ее также называют диаграммой равновесия, так как она показывает, какие при данных условиях существуют равновесные фазы.

Построение диаграмм состояния наиболее часто осуществляется при помощи термического анализа. В результате получают серию кривых охлаждения, на которых при температурах фазовых превращений наблюдаются точки перегиба и температурные остановки.

Температуры, соответствующие фазовым превращениям, называют критическими точками. Некоторые критические точки имеют названия, например, точки отвечающие началу кристаллизации называют точками ликвидус, а концу кристаллизации - точками солидус.

По кривым охлаждения строят диаграмму состава в координатах: по оси абсцисс - концентрация компонентов, по оси ординат - температура. Шкала концентраций показывает содержание компонента В. Основными линиями являются линии ликвидус (1) и солидус (2), а также линии соответствующие фазовым превращениям в твердом состоянии (3, 4).

По диаграмме состояния можно определить температуры фазовых превращений, изменение фазового состава, приблизительно, свойства сплава, виды обработки, которые можно применять для сплава.

Ниже представлены различные типы диаграмм состояния:

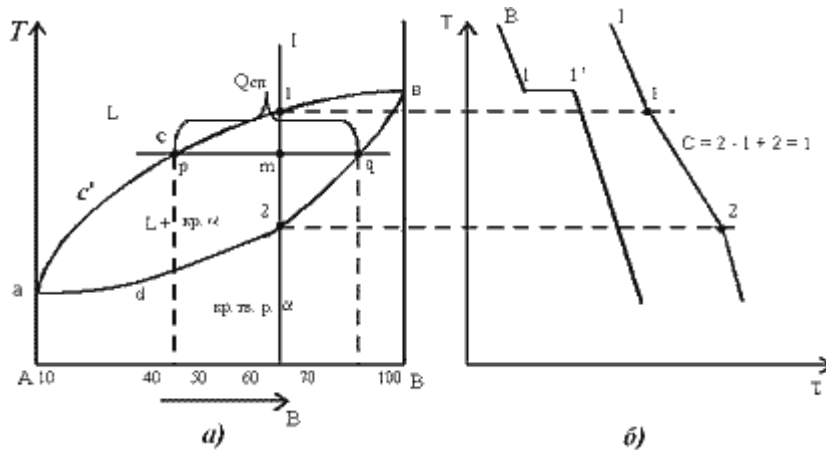


Рис.2. Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (а); кривые охлаждения типичных сплавов (б)

Анализ полученной диаграммы (рис.2).

1. Количество компонентов:  $K = 2$  (компоненты А и В).

2. Число фаз:  $f = 2$  (жидкая фаза L, кристаллы твердого раствора  $\alpha'$ )

3. Основные линии диаграммы:

- acb – линия ликвидус, выше этой линии сплавы находятся в жидком состоянии;
- adb – линия солидус, ниже этой линии сплавы находятся в твердом состоянии.

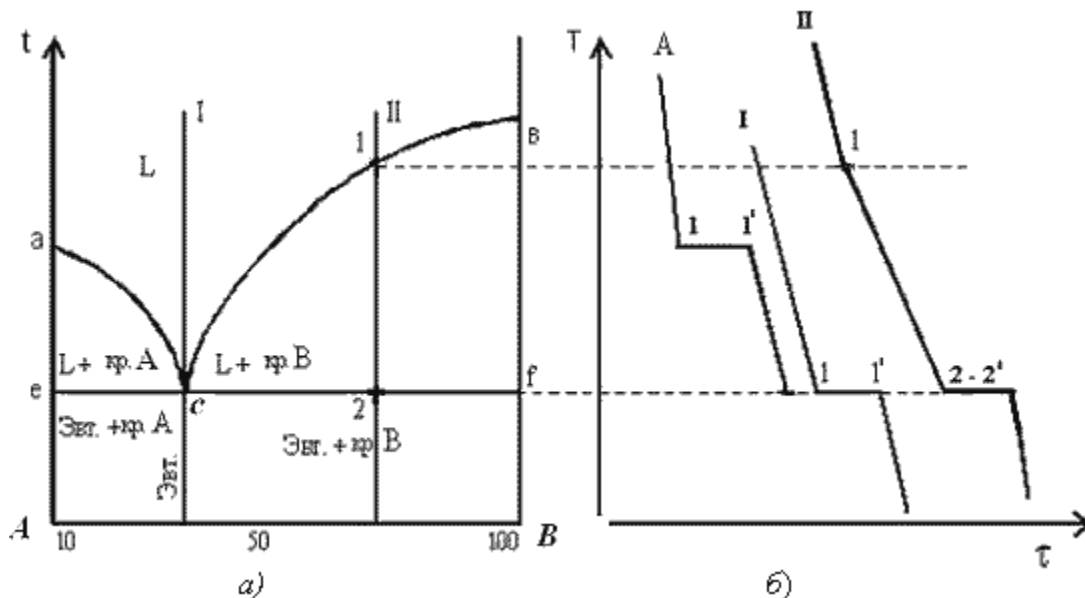


Рис.3. Диаграмма состояния сплавов с отсутствием растворимости компонентов в твердом состоянии (а) и кривые охлаждения сплавов (б)

Анализ диаграммы состояния (рис. 3).

1. Количество компонентов:  $K = 2$  (компоненты А и В);
2. Число фаз:  $f = 3$  (кристаллы компонента А, кристаллы компонента В, жидкая фаза).
3. Основные линии диаграммы:
  - линия ликвидус  $асб$ , состоит из двух ветвей, сходящихся в одной точке;
  - линия солидус  $есф$ , параллельна оси концентраций стремится к осям компонентов, но не достигает их;

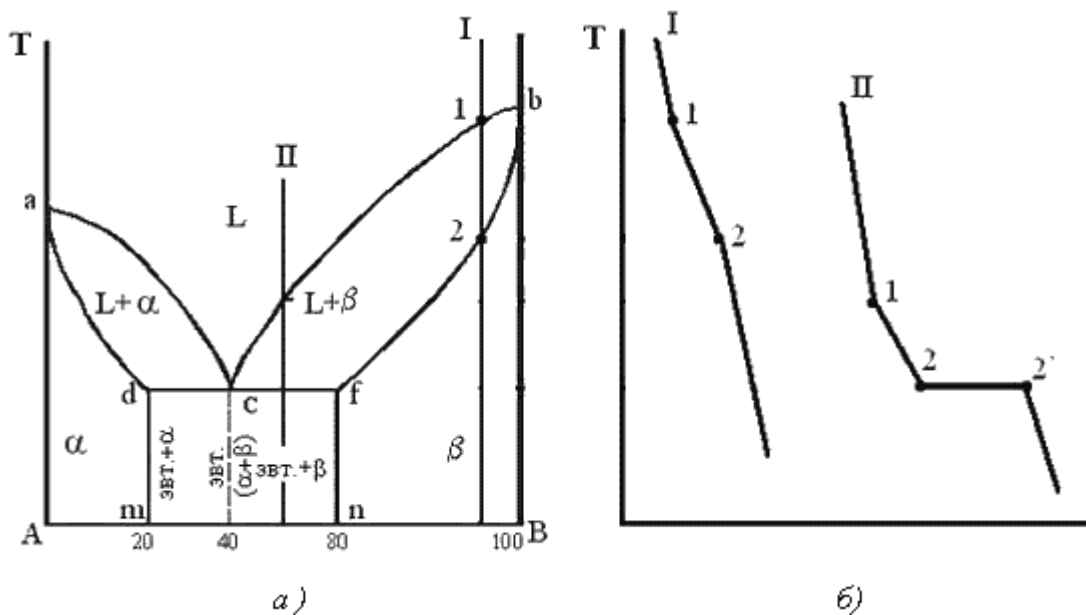


Рис. 4. Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (а) и кривые охлаждения типичных сплавов (б)

Анализ диаграммы состояния (рис. 4).

1. Количество компонентов:  $K = 2$  (компоненты А и В);
2. Число фаз:  $f = 3$  (жидкая фаза и кристаллы твердых растворов  $\alpha$  (раствор компонента В в компоненте А) и  $\beta$  (раствор компонента А в компоненте В));
3. Основные линии диаграммы:
  - линия ликвидус  $асб$ , состоит из двух ветвей, сходящихся в одной точке;
  - линия солидус  $адсfb$ , состоит из трех участков;
  - $dm$  – линия предельной концентрации компонента В в компоненте А;
  - $fn$  – линия предельной концентрации компонента А в компоненте В.



## Практическая часть

### Задание для студентов:

1. Запишите название работы и ее цель.
2. Запишите что такое диаграмма состояния.

### Ответьте на вопросы:

1. Как строится диаграмма состояния?
2. Что можно определить по диаграмме состояния?
3. Какие названия имеют основные точки диаграммы?
4. Что указывается на диаграмме по оси абсцисс? Оси ординат?
5. Как называются основные линии диаграммы?

## Практическая работа № 3

Тема: «Изучение чугунов»

**Цель работы:** ознакомление студентов с маркировкой и областью применения чугунов; формирование умения расшифровки марок чугунов.

### Ход работы:

1. Ознакомьтесь с теоретической частью.
2. Выполните задание практической части.

## Теоретическая часть

Чугун отличается от стали: по составу - более высокое содержание углерода и примесей; по технологическим свойствам - более высокие литейные свойства, малая способность к пластической деформации, почти не используется в сварных конструкциях.

В зависимости от состояния углерода в чугуне различают: белый чугун – углерод в связанном состоянии в виде цементита, в изломе имеет белый цвет и металлический блеск; серый чугун – весь углерод или большая часть находится в свободном состоянии в виде графита, а в связанном состоянии находится не бо-

лее 0,8 % углерода. Из-за большого количества графита его излом имеет серый цвет; половинчатый – часть углерода находится в свободном состоянии в форме графита, но не менее 2 % углерода находится в форме цементита. Мало используется в технике.

В зависимости от формы графита и условий его образования различают следующие группы чугунов: серый - с пластинчатым графитом; высокопрочный - с шаровидным графитом; ковкий - с хлопьевидным графитом.

Графитовые включения можно рассматривать как соответствующей формы пустоты в структуре чугуна. Около таких дефектов при нагружении концентрируются напряжения, значение которых тем больше, чем острее дефект. Отсюда следует, что графитовые включения пластинчатой формы в максимальной мере разупрочняют металл. Более благоприятна хлопьевидная форма, а оптимальной является шаровидная форма графита. Пластичность зависит от формы таким же образом. Наличие графита наиболее резко снижает сопротивление при жестких способах нагружения: удар; разрыв. Сопротивление сжатию снижается мало.

### **Серые чугуны**

Серый чугун широко применяется в машиностроении, так как легко обрабатывается и обладает хорошими свойствами. В зависимости от прочности серый чугун подразделяют на 10 марок (ГОСТ 1412).

Серые чугуны при малом сопротивлении растяжению имеют достаточно высокое сопротивление сжатию. Структура металлической основы зависит от количества углерода и кремния.

Учитывая малое сопротивление отливок из серого чугуна растягивающим и ударным нагрузкам, следует использовать этот материал для деталей, которые подвергаются сжимающим или изгибающим нагрузкам. В станкостроении это - базовые, корпусные детали, кронштейны, зубчатые колеса, направляющие; в автостроении - блоки цилиндров, поршневые кольца, распределительные валы, диски сцепления. Отливки из серого чугуна также используются в электромашиностроении, для изготовления товаров народного потребления.

Маркировка серых чугунов: обозначаются индексом СЧ (серый чугун) и числом, которое показывает значение предела прочности, умноженное на  $10^{-1}$ .  
Например: СЧ 10 – серый чугун, предел прочности при растяжении 100 МПа.

### **Ковкий чугун**

Хорошие свойства у отливок обеспечиваются, если в процессе кристаллизации и охлаждения отливок в форме не происходит процесс графитизации. Чтобы предотвратить графитизацию, чугуны должны иметь пониженное содержание углерода и кремния.

Различают 7 марок ковкого чугуна: три с ферритной (КЧ 30 - 6) и четыре с перлитной (КЧ 65 - 3) основой (ГОСТ 1215).

По механическим и технологическим свойствам ковкий чугун занимает промежуточное положение между серым чугуном и сталью. Недостатком ковкого чугуна по сравнению с высокопрочным является ограничение толщины стенок для отливки и необходимость отжига.

Отливки из ковкого чугуна применяют для деталей, работающих при ударных и вибрационных нагрузках.

Из ферритных чугунов изготавливают картеры редукторов, ступицы, крюки, скобы, хомутики, муфты, фланцы.

Из перлитных чугунов, характеризующихся высокой прочностью, достаточной пластичностью, изготавливают вилки карданных валов, звенья и ролики цепей конвейера, тормозные колодки.

Маркировка ковкого чугуна: обозначаются индексом КЧ (ковкий чугун) и числами. Первое число соответствует пределу прочности на растяжение, умноженное на  $10^{-1}$ , второе число – относительное удлинение.

Например: КЧ 30-6 – ковкий чугун, предел прочности при растяжении 300 МПа, относительное удлинение 6 %.

## Высокопрочный чугун

Получают эти чугуны из серых, в результате модифицирования магнием или церием. По сравнению с серыми чугунами, механические свойства повышаются, это вызвано отсутствием неравномерности в распределении напряжений из-за шаровидной формы графита.

Эти чугуны обладают высокой жидкотекучестью, линейная усадка - около 1%. Литейные напряжения в отливках несколько выше, чем для серого чугуна. Из-за высокого модуля упругости достаточно высокая обрабатываемость резанием. Обладают удовлетворительной свариваемостью.

Из высокопрочного чугуна изготавливают тонкостенные отливки (поршневые кольца), шаботы ковочных молотов, станины и рамы прессов и прокатных станов, изложницы, резцедержатели, планшайбы.

Отливки коленчатых валов массой до 2..3 т, взамен кованных валов из стали, обладают более высокой циклической вязкостью, малочувствительны к внешним концентраторам напряжения, обладают лучшими антифрикционными свойствами и значительно дешевле.

Маркировка высокопрочного чугуна: обозначаются индексом ВЧ (высокопрочный чугун) и числом, которое показывает значение предела прочности, умноженное на  $10^{-1}$ .

Например: ВЧ 50 – высокопрочный чугун с пределом прочности на растяжение 500 Мпа.

## Практическая часть

### Задание для студентов:

1. Запишите название работы, ее цель.
  2. Опишите производство чугуна.
  3. Заполните таблицу:
3. Высокопрочные чугуны

## Практическая работа № 4

Тема: «Изучение углеродистых и легированных конструкционных сталей»

**Цель работы:** ознакомление студентов с маркировкой и областью применения конструкционных сталей; формирование умения расшифровки маркировки конструкционных сталей.

**Ход работы:**

1. Ознакомьтесь с теоретической частью.
2. Выполните задания практической части.

### Теоретическая часть

Сталь – это сплав железа с углеродом, в котором углерода содержится в количестве 0 -2,14%. Стали являются наиболее распространенными материалами. Обладают хорошими технологическими свойствами. Изделия получают в результате обработки давлением и резанием.

Достоинством является возможность, получать нужный комплекс свойств, изменяя состав и вид обработки.

В зависимости от назначения стали делятся на 3 группы: конструкционные, инструментальные и стали специального назначения.

Качество в зависимости от содержания вредных примесей: серы и фосфора стали подразделяют на стали:

- Обыкновенного качества, содержание до 0,06% серы и до 0,07% фосфора.
- Качественные - до 0,035% серы и фосфора каждого отдельно.
- Высококачественные - до 0,025% серы и фосфора.
- Особовысококачественные, до 0,025% фосфора и до 0,015% серы.

Раскисление – это процесс удаления кислорода из стали, т. е. по степени её раскисления, существуют: спокойные стали, т. е., полностью раскисленные; такие стали обозначаются буквами "сп" в конце марки (иногда буквы опускаются); кипящие стали – слабо раскисленные; маркируются буквами "кп"; полуспокой-

ные стали, занимающие промежуточное положение между двумя предыдущими; обозначаются буквами "пс".

Сталь обыкновенного качества подразделяется еще и по поставкам на 3 группы: сталь группы А поставляется потребителям по механическим свойствам (такая сталь может иметь повышенное содержание серы или фосфора); сталь группы Б – по химическому составу; сталь группы В – с гарантированными механическими свойствами и химическим составом.

Конструкционные стали предназначены для изготовления конструкций, деталей машин и приборов.

Наличие широкого сортамента выпускаемых сталей и сплавов, изготавливаемых в различных странах, обусловило необходимость их идентификации, однако до настоящего времени не существует единой системы маркировки сталей и сплавов, что создает определенные трудности для металлоторговли.

Так в России и в странах СНГ (Украина, Казахстан, Белоруссия и др.) принята разработанная ранее в СССР буквенно-цифровая система обозначения марок сталей и сплавов, где согласно ГОСТу, буквами условно обозначаются названия элементов и способов выплавки стали, а цифрами — содержание элементов. До настоящего времени международные организации по стандартизации не выработали единую систему маркировки сталей.

### **Маркировка конструкционных углеродистых сталей обыкновенного качества**

- Обозначают по ГОСТ 380-94 буквами "Ст" и условным номером марки (от 0 до 6) в зависимости от химического состава и механических свойств.
- Чем выше содержание углерода и прочностные свойства стали, тем больше её номер.
- Буква "Г" после номера марки указывает на повышенное содержание марганца в стали.
- Перед маркой указывают группу стали, причем группа "А" в обозначении марки стали не ставится.

- Для указания категории стали к обозначению марки добавляют номер в конце соответствующий категории, первую категорию обычно не указывают.

Например:

- Ст1кп2 - углеродистая сталь обыкновенного качества, кипящая, № марки 1, второй категории, поставляется потребителям по механическим свойствам (группа А);

- ВСт5Г - углеродистая сталь обыкновенного качества с повышенным содержанием марганца, спокойная, № марки 5, первой категории с гарантированными механическими свойствами и химическим составом (группа В);

- ВСт0 - углеродистая сталь обыкновенного качества, номер марки 0, группы Б, первой категории (стали марок Ст0 и Бст0 по степени раскисления не разделяют).

### **Маркировка конструкционных углеродистых качественных сталей**

- В соответствии с ГОСТ 1050-88 эти стали маркируются двухзначными числами, показывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента: 05 ; 08 ; 10 ; 25 ; 40, 45 и т.д.

- Для спокойных сталей буквы в конце их наименований не добавляются.

Например, 08кп, 10пс, 15, 18кп, 20 и т.д.

- Буква Г в марке стали указывает на повышенное содержание марганца.

Например: 14Г, 18Г и т.д.

- Самая распространенная группа для изготовления деталей машин (валы, оси, втулки, зубчатые колеса и т.д)

Например:

- 10 – конструкционная углеродистая качественная сталь, с содержанием углерода около 0,1 %, спокойная

- 45 – конструкционная углеродистая качественная сталь, с содержанием углерода около 0,45%, спокойная

- 18 кп – конструкционная углеродистая качественная сталь с содержанием углерода около 0.18%, кипящая

- 14Г – конструкционная углеродистая качественная сталь с содержанием углерода около 0,14%, спокойная, с повышенным содержанием марганца.

### **Маркировка легированных конструкционных сталей**

- В соответствии с ГОСТ 4543-71 наименования таких сталей состоят из цифр и букв.

- Первые цифры марки обозначают среднее содержание углерода в стали в сотых долях процента.

- Буквы указывают на основные легирующие элементы, включенные в сталь.

- Цифры после каждой буквы обозначают примерное процентное содержание соответствующего элемента, округленное до целого числа, при содержании легирующего элемента до 1.5% цифра за соответствующей буквой не указывается.

- Буква А в конце марки указывает на то, что сталь высококачественная (с пониженным содержанием серы и фосфора)

- Н – никель, Х – хром, К – кобальт, М – молибден, В – вольфрам, Т – титан, Д – медь, Г – марганец, С – кремний.

Например:

- 12Х2Н4А – конструкционная легированная сталь, высококачественная, с содержанием углерода около 0,12%, хрома около 2%, никеля около 4%

- 40ХН – конструкционная легированная сталь, с содержанием углерода около 0,4%, хрома и никеля до 1,5%

### **Маркировка других групп конструкционных сталей**

Рессорно-пружинные стали.

- Основной отличительный признак этих сталей – содержание углерода в них должно быть около 0.8% (в этом случае в сталях появляются упругие свойства)

- Пружины и рессоры изготавливают из углеродистых (65,70,75,80) и легированных (65С2, 50ХГС, 60С2ХФА, 55ХГР) конструкционных сталей

- Эти стали легируют элементами которые повышают предел упругости – кремнием, марганцем, хромом, вольфрамом, ванадием, бором



Например: 60С2 – сталь конструкционная углеродистая рессорно-пружинная с содержанием углерода около 0,65%, кремния около 2%.

### **Шарикоподшипниковые стали**

- ГОСТ 801-78 маркируют буквами "ШХ", после которых указывают содержание хрома в десятых долях процента.

- Для сталей, подвергнутых электрошлаковому переплаву, буква Ш добавляется также и в конце их наименований через тире.

Например: ШХ15, ШХ20СГ, ШХ4-Ш.

- Из них изготавливают детали для подшипников, также их используют для изготовления деталей, работающих в условиях высоких нагрузок.

Например: ШХ15 – сталь конструкционная шарикоподшипниковая с содержанием углерода 1%, хрома 1,5%

### **Автоматные стали**

- ГОСТ 1414-75 начинаются с буквы А (автоматная).

- Если сталь при этом легирована свинцом, то ее наименование начинается с букв АС.

- Для отражения содержания в сталях остальных элементов используются те же правила, что и для легированных конструкционных сталей. Например: А20, А40Г, АС14, АС38ХГМ

Например: АС40 – сталь конструкционная автоматная, с содержанием углерода 0,4%, свинца 0,15-0,3% (в марке не указывается)

## **Практическая часть**

### **Задание для студентов:**

1. Запишите название работы, ее цель.
2. Запишите основные признаки маркировки всех групп конструкционных сталей (обыкновенного качества, качественных сталей, легированных конструкционных сталей, рессорно-пружинных сталей, шарикоподшипниковых сталей, автоматных сталей), с примерами.

### **Задание по вариантам:**

1. Расшифруйте марки сталей и запишите область применения конкретной марки (т.е. для изготовления чего она предназначена)

## **Практическая работа № 5**

Тема: «Изучение углеродистых и легированных инструментальных сталей»

**Цель работы:** ознакомление студентов с маркировкой и областью применения конструкционных сталей; формирование умения расшифровки маркировки конструкционных сталей.

**Ход работы:**

1. Ознакомьтесь с теоретической частью.
2. Выполните задание практической части.

### **Теоретическая часть**

Сталь – это сплав железа с углеродом, в котором углерода содержится в количестве 0-2,14%.

Стали являются наиболее распространенными материалами. Обладают хорошими технологическими свойствами. Изделия получают в результате обработки давлением и резанием.

Достоинством является возможность, получать нужный комплекс свойств, изменяя состав и вид обработки.

В зависимости от назначения стали делятся на 3 группы: конструкционные, инструментальные и стали специального назначения.

Качество в зависимости от содержания вредных примесей: серы и фосфора стали подразделяют на: стали обыкновенного качества, содержание до 0,06% серы и до 0,07% фосфора; качественные - до 0,035% серы и фосфора каждого отдельно; высококачественные - до 0,025% серы и фосфора; особовысококачественные, до 0,025% фосфора и до 0,015% серы.

Инструментальные стали предназначены для изготовления различного инструмента, как для ручной обработки, так и для механической.

Наличие широкого сортамента выпускаемых сталей и сплавов, изготавливаемых в различных странах, обусловило необходимость их идентификации, однако до настоящего времени не существует единой системы маркировки сталей и сплавов, что создает определенные трудности для металлоторговли.

### **Маркировка углеродистых инструментальных сталей**

- Данные стали в соответствии с ГОСТ 1435-90 делятся на качественные и высококачественные.

- Качественные стали обозначаются буквой У (углеродистая) и цифрой, указывающей среднее содержание углерода в стали, в десятых долях процента.

Например: У7, У8, У9, У10. У7 – углеродистая инструментальная сталь с содержанием углерода около 0.7%

- В обозначения высококачественных сталей добавляется буква А (У8А, У12А и т.д.). Кроме того, в обозначениях как качественных, так и высококачественных углеродистых инструментальных сталей может присутствовать буква Г, указывающая на повышенное содержание в стали марганца.

Например: У8Г, У8ГА. У8А – углеродистая инструментальная сталь с содержанием углерода около 0,8%, высококачественная.

- Изготавливают инструмент для ручной работы (зубило, кернер, чертилка и т.д.), механической работы на невысоких скоростях (сверла).

### **Маркировка легированных инструментальных сталей**

- Правила обозначения инструментальных легированных сталей по ГОСТ 5950-73 в основном те же, что и для конструкционных легированных.

Различие заключается лишь в цифрах, указывающих на массовую долю углерода в стали.

- Процентное содержание углерода также указывается в начале наименования стали, в десятых долях процента, а не в сотых, как для конструкционных легированных сталей.

- Если же в инструментальной легированной стали содержание углерода составляет около 1.0%, то соответствующую цифру в начале ее наименования обычно не указывают.

Приведем примеры: сталь 4Х2В5МФ, ХВГ, ХВЧ.

- 9Х5ВФ – легированная инструментальная сталь, с содержанием углерода около 0,9%, хрома около 5%, ванадия и вольфрама до 1%

### **Маркировка высоколегированных (быстрорежущих) инструментальных сталей**

- Обозначают буквой "Р", следующая за ней цифра указывает на процентное содержание в ней вольфрама: В отличие от легированных сталей в наименованиях быстрорежущих сталей не указывается процентное содержание хрома, т.к. оно составляет около 4% во всех сталях, и углерода (оно пропорционально содержанию ванадия).

- Буква Ф, показывающая наличие ванадия, указывается только в том случае, если содержание ванадия составляет более 2.5%.

Например: Р6М5, Р18, Р6 М5Ф3.

- Обычно из этих сталей изготавливают высокопроизводительный инструмент: сверла, фрезы и т.д. (для удешевления только рабочую часть)

Например: Р6М5К2 – быстрорежущая сталь, с содержанием углерода около 1%, вольфрама около 6%, хрома около 4%, ванадия до 2,5%, молибдена около 5%, кобальта около 2%.

### **Практическая часть**

**Задание для студентов:**

1. Запишите название работы, ее цель.

2. Запишите основные принципы маркировки всех групп инструментальных сталей (углеродистых, легированных, высоколегированных)

## Практическая работа № 6

Тема: «Изучение сплавов на основе меди: латуни, бронзы»

**Цель работы:** ознакомление студентов с маркировкой и областью применения цветных металлов – меди и сплавов на ее основе: латуней и бронз; формирование умения расшифровки маркировки латуней и бронз.

**Рекомендации для студентов:** прежде чем приступить к выполнению практической части задания, внимательно ознакомьтесь с теоретическими положениями, а также лекциями в вашей рабочей тетради по данной теме.

**Ход работы:**

1. Ознакомьтесь с теоретической частью.
2. Выполните задание практической части.

### Теоретическая часть

#### Латуни

Латуни могут иметь в своем составе до 45 % цинка. Повышение содержания цинка до 45 % приводит к увеличению предела прочности до 450 МПа. Максимальная пластичность имеет место при содержании цинка около 37 %.

По способу изготовления изделий различают латуни деформируемые и литейные.

Деформируемые латуни маркируются буквой Л, за которой следует число, показывающее содержание меди в процентах, например в латуни Л62 содержится 62 % меди и 38 % цинка. Если кроме меди и цинка, имеются другие элементы, то ставятся их начальные буквы (О - олово, С - свинец, Ж - железо, Ф - фосфор, Мц - марганец, А - алюминий, Ц - цинк).

Количество этих элементов обозначается соответствующими цифрами после числа, показывающего содержание меди, например, сплав ЛАЖ60-1-1 содержит 60 % меди, 1 % алюминия, 1 % железа и 38 % цинка.

Латуни имеют хорошую коррозионную стойкость, которую можно повысить дополнительно присадкой олова. Латунь ЛО70 -1 стойка против коррозии в морской воде и называется “морской латунью“. Добавка никеля и железа повышает механическую прочность до 550 МПа.

Литейные латуни также маркируются буквой Л, После буквенного обозначения основного легирующего элемента (цинк) и каждого последующего ставится цифра, указывающая его усредненное содержание в сплаве. Например, латунь ЛЦ23А6Ж3Мц2 содержит 23 % цинка, 6 % алюминия, 3 % железа, 2 % марганца. Наилучшей жидкотекучестью обладает латунь марки ЛЦ16К4. К литейным латуням относятся латуни типа ЛС, ЛК, ЛА, ЛАЖ, ЛАЖМц. Литейные латуни не склонны к ликвации, имеют сосредоточенную усадку, отливки получаются с высокой плотностью.

Латуни являются хорошим материалом для конструкций, работающих при отрицательных температурах.

## **Бронзы**

Сплавы меди с другими элементами кроме цинка называются бронзами. Бронзы подразделяются на деформируемые и литейные.

При маркировке деформируемых бронз на первом месте ставятся буквы Бр, затем буквы, указывающие, какие элементы, кроме меди, входят в состав сплава.

После букв идут цифры, показывающие содержание компонентов в сплаве.

Например, марка БрОФ10-1 означает, что в бронзу входит 10 % олова, 1 % фосфора, остальное - медь.

Маркировка литейных бронз также начинается с букв Бр, затем указываются буквенные обозначения легирующих элементов и ставится цифра, указывающая его усредненное содержание в сплаве. Например, бронза БрО3Ц12С5 содержит 3 % олова, 12 % цинка, 5 % свинца, остальное - медь.

Оловянные бронзы При сплавлении меди с оловом образуются твердые растворы. Эти сплавы очень склонны к ликвации из-за большого температурного интервала кристаллизации. Благодаря ликвации сплавы с содержанием олова выше 5 % является благоприятным для деталей типа подшипников скольжения: мягкая фаза обеспечивает хорошую прирабатываемость, твердые частицы создают износостойкость. Поэтому оловянные бронзы являются хорошими антифрикционными материалами.

Оловянные бронзы имеют низкую объемную усадку (около 0,8 %), поэтому используются в художественном литье. Наличие фосфора обеспечивает хорошую жидкотекучесть. Оловянные бронзы подразделяются на деформируемые и литейные.

В деформируемых бронзах содержание олова не должно превышать 6%, для обеспечения необходимой пластичности, БрОФ6,5-0,15. В зависимости от состава деформируемые бронзы отличаются высокими механическими, антикоррозионными, антифрикционными и упругими свойствами, и используются в различных отраслях промышленности. Из этих сплавов изготавливают прутки, трубы, ленту, проволоку.

### **Практическая часть**

#### **Задание для студентов:**

1. Запишите название и цель работы.

2. Заполните таблицу:

- Название сплава, его определение.
- Основные свойства сплава.
- Пример маркировки.
- Расшифровка марки.
- Область применения

## Практическая работа № 7

Тема: «Изучение алюминиевых сплавов»

**Цель работы:** ознакомление студентов с маркировкой и областью применения цветных металлов – алюминия и сплавов на его основе; изучение особенностей применения алюминиевых сплавов в зависимости от их состава.

**Рекомендации для студентов:** прежде чем приступить к выполнению практической части задания, внимательно ознакомьтесь с теоретическими положениями, а также лекциями в вашей рабочей тетради по данной теме.

**Ход работы:**

1. Ознакомьтесь с теоретической частью.
2. Выполните задание практической части.

### Теоретическая часть

Принцип маркировки алюминиевых сплавов. В начале указывается тип сплава: Д - сплавы типа дюралюминов; А - технический алюминий; АК - ковкие алюминиевые сплавы; В - высокопрочные сплавы; АЛ - литейные сплавы.

Далее указывается условный номер сплава. За условным номером следует обозначение, характеризующее состояние сплава: М - мягкий (отожженный); Т - термически обработанный (закалка плюс старение); Н - нагартованный; П – полунагартованный.

По технологическим свойствам сплавы подразделяются на три группы: деформируемые сплавы, не упрочняемые термической обработкой; деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой; литейные сплавы.

Методами порошковой металлургии изготавливают спеченные алюминиевые сплавы (САС) и спеченные алюминиевые порошковые сплавы (САП).

Деформируемые литейные сплавы, не упрочняемые термической обработкой.



Прочность алюминия можно повысить легированием. В сплавы, не упрочняемые термической обработкой, вводят марганец или магний. Атомы этих элементов существенно повышают его прочность, снижая пластичность. Обозначаются сплавы: с марганцем - АМц, с магнием - АМг; после обозначения элемента указывается его содержание (АМгЗ).

Магний действует только как упрочнитель, марганец упрочняет и повышает коррозионную стойкость. Прочность сплавов повышается только в результате деформации в холодном состоянии. Чем больше степень деформации, тем значительнее растет прочность и снижается пластичность. В зависимости от степени упрочнения различают сплавы нагартованные и полунагартованные (АМгЗП).

Эти сплавы применяют для изготовления различных сварных емкостей для горючего, азотной и других кислот, мало- и средненагруженных конструкций.

Деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой.

К таким сплавам относятся дюралюмины (сложные сплавы систем алюминий - медь - магний или алюминий - медь - магний - цинк). Они имеют пониженную коррозионную стойкость, для повышения которой вводится марганец. Дюралюмины обычно подвергаются закалке температуры  $500^{\circ}\text{C}$  и естественному старению, которому предшествует двух-, трехчасовой инкубационный период.

Максимальная прочность достигается через 4.5 суток. Широкое применение дюралюмины находят в авиастроении, автомобилестроении, строительстве.

Высокопрочными стареющими сплавами являются сплавы, которые кроме меди и магния содержат цинк. Сплавы В95, В96 имеют предел прочности около 650 МПа. Основным потребителем - авиастроение (обшивка, стрингеры, лонжероны).

Ковочные алюминиевые сплавы АК, АК8 применяются для изготовления поковок. Поковки изготавливаются при температуре  $380-450^{\circ}\text{C}$ , подвергаются закалке от температуры  $500-560^{\circ}\text{C}$  и старению при  $150-165^{\circ}\text{C}$  в течение 6 часов.

В состав алюминиевых сплавов дополнительно вводят никель, железо, титан, которые повышают температуру рекристаллизации и жаропрочность до  $300^{\circ}\text{C}$ .

Изготавливают поршни, лопадки и диски осевых компрессоров, турбореактивных двигателей.

### **Литейные сплавы**

К литейным сплавам относятся сплавы системы алюминий - кремний (силумины), содержащие 10-13 % кремния. Присадка к силуминам магния, меди содействует эффекту упрочнения литейных сплавов при старении. Титан и цирконий измельчают зерно. Марганец повышает антикоррозионные свойства. Никель и железо повышают жаропрочность.

Литейные сплавы маркируются от АЛ2 до АЛ20. Силумины широко применяют для изготовления литых деталей приборов и других средне - и малонагруженных деталей, в том числе тонкостенных отливок сложной формы.

### **Практическая часть**

#### **Задание для студентов:**

1. Запишите название и цель работы.
2. Заполните таблицу:
  - Название сплава, его определение.
  - Основные свойства сплава.
  - Пример маркировки.
  - Расшифровка марки.
  - Область применения

#### **Практическая работа № 8**

**Тема «Связь между свойствами сплава и типом диаграммы состояния»**

**Цель работы** - ознакомиться с методикой построения диаграмм состояния двухкомпонентных сплавов, изучить изменение свойств сплавов в зависимости от изменения концентрации их компонентов для основных типов диаграмм состояния.

#### **Задачи:**

1. Изучить теоретические сведения о строении металлических сплавов.
2. Усвоить методику экспериментального построения диаграмм состояния двухкомпонентных сплавов.
3. Научиться практическому использованию правила фаз и правила отрезков.
4. Изучить связь между свойствами сплавов и типом диаграмм состояния.

## **Краткие теоретические сведения**

### **Строение металлических сплавов**

Основными конструкционными материалами являются металлические сплавы - вещества, полученные сплавлением двух или более элементов (компонентов).

К основным понятиям в теории сплавов относятся; система, компонент, фаза.

**Система** - группа тел, выделяемый для наблюдения и изучения. В металловедении системами являются металлы и металлические сплавы. Чистый металл является простой (однокомпонентной) системой.

**Компонентами** называют вещества, образующие систему (сплав). В металлических сплавах компонентами могут быть элементы (металлы и неметаллы) и химические соединения (не диссоциирующие при нагревании).

**Фазой** называется однородная часть системы, отделенная от другой части системы (фазы) поверхностью раздела, при переходе через которую химический состав или структура вещества изменяется скачком,

Следовательно, однородная жидкость является однофазной системой, а механическая смесь двух видов кристаллов - двухфазной, так как каждый кристалл отличается от другого по составу или по строению и они отделены один от другого поверхностью раздела. В твердых сплавах фазами могут быть зерна чистого металла, зерна твердого раствора и зерна химического соединения. Механическая смесь двух компонентов А и В образуется тогда, когда они не способны к взаимному растворению в твердом состоянии и не вступают в химическую реакцию с образованием соединения. При этих условиях сплав будет состоять из кристаллов А и В, отчетливо выявляемых на микроструктуре. Рентгенограмма сплава покажет наличие двух решеток компонентов А и В.

Твердыми растворами называют такие твердые фазы, в которых соотношения между компонентами могут изменяться. Рентгеновский анализ обнаруживает в твердом растворе, как и у чистого металла, только один тип решетки. Следовательно, в отличие от механической смеси твердый раствор является однофазным, состоит из одного вида кристаллов, имеет одну кристаллическую решетку; в отличие от химического соединения твердый раствор существует не

при определенном соотношении компонентов, а в интервале концентраций. В твердом растворе одно из входящих в состав сплава веществ сохраняет присущую ему кристаллическую решетку, а второе вещество, утратив свое кристаллическое строение, в виде отдельных, атомов распределяется в кристаллической решетке первого. Первое вещество является растворителем, второе - растворимым.

В зависимости от характера распределения атомов растворимого элемента различают твердые растворы внедрения, замещения и вычитания. Независимо от типа твердого раствора общим для них является то, что они однофазны и существуют в интервале концентраций. Для твердых растворов характерен металлический тип связи. В твердых растворах внедрения атомы растворимого элемента распределяются в кристаллической решетке металла-растворителя, занимая места между его атомами.

В твердых растворах замещения атомы растворимого элемента занимают места атомов основного металла. Посторонние атомы могут замещать атомы растворителя в любых местах, поэтому такие растворы называют неупорядоченными твердыми растворами.

Твердые растворы замещения могут быть ограниченными и неограниченными. Одно из условий неограниченной растворимости - размерный фактор: чем больше различие в атомных радиусах, тем меньше растворимость.

Неограниченная растворимость компонентов присуща системам, в которых атомные радиусы элементов различаются не более чем на 8...15%.

С понижением температуры в твердых растворах замещения может произойти перераспределение атомов, в результате которого атомы растворенного элемента займут строго определенные места в решетке растворителя. Такие твердые растворы называют упорядоченными твердыми растворами, а их структуру - сверхструктурой. Температуру перехода неупорядоченного состояния в упорядоченное называют точкой Курнакова.

Твердые растворы вычитания образуются на основе некоторых химических соединений, когда к химическому соединению добавляется один из входящих в его формулу элементов. Атомы этого элемента занимают нормальное положение в решетке соединения, а места, где должны были бы находиться атомы второго компонента, оказываются незаполненными, пустыми (поэтому эти растворы иногда называют растворами с дефектной решеткой).

Образование любого типа твердых растворов сопровождается изменением параметров решетки металла-растворителя. Это важный момент, определяющий изменение свойств твердого раствора.

Химическое соединение чаще всего образуется между элементами, расположенными далеко друг от друга в таблице Д.И. Менделеева, т. е. существенно различающимися по строению и свойствам, если сила взаимодействия между разнородными атомами больше, чем между атомами однородными.

Химические соединения имеют ряд особенностей, отличающих их от твердых растворов:

а) соотношение чисел атомов элементов, образующих соединение, строго определенное, соответствующее стехиометрической пропорции, выраженной формулой вида  $A_nB_m$ ;

б) они имеют свою кристаллическую решетку, отличную от решеток элементов, образовавших это соединение, с правильным упорядоченным расположением атомов компонентов в кристаллической решетке;

в) свойства соединения заметно отличаются от свойств исходных элементов;

г) как и чистые металлы, они имеют постоянную температуру плавления (диссоциаций). Как правило, химические соединения обладают большой твердостью и очень хрупки.

### **Понятие о диаграммах состояния**

**Диаграмма состояния** - графическое изображение состояния любого сплава изучаемой системы в зависимости от его концентрации и температуры.

Диаграмма состояния показывает равновесные, устойчивые состояния, т.е. такие, которые при данных условиях обладают минимальной свободной энергией. Они имеют большое теоретическое и практическое значение, так как изучение любого сплава начинается с построения и анализа диаграммы состояния с целью изучения фаз и структурных составляющих сплава.

С помощью диаграммы состояния можно установить возможность проведения термической обработки и ее режимы, температуры литья, горячей пластической деформации и т.д.

В любой системе число фаз, находящихся в равновесии, зависит от внутренних и внешних условий. Закономерности всех изменений, происходящих в системе, подчинены общему закону равновесия, который называется правилом фаз или законом Гиббса, который выражает зависимость между числом степеней свободы  $S$  (вариантностью) системы, числом компонентов  $K$  и числом фаз системы  $\Phi$ , находящихся в равновесии. Правило фаз записывают в виде:  $S = K - \Phi + 1$  (при постоянном атмосферном давлении).

Под числом степеней свободы (вариантностью) системы понимают число внешних и внутренних факторов (температура, давление и концентрация), которое можно изменять без изменения числа фаз в системе.

Построение диаграмм состояния осуществляют различными экспериментальными методами. Чаще всего используют метод термического анализа, сущность которого заключается в отборе нескольких сплавов данной системы с различным соотношением масс входящих в них компонентов. Сплавы помещают в огнеупорные тигли и нагревают в печи. После расплавления сплавов тигли со сплавами медленно охлаждают и фиксируют скорость охлаждения. По полученным данным строят кривые охлаждения в координатах время - температура.

В результате измерений получают серию кривых охлаждения, на которых при температурах фазовых превращений наблюдаются точки перегиба и температурные остановки.

Температуры, соответствующие фазовым превращениям, называются критическими точками. Точки, отвечающие началу кристаллизации, называют

точками ликвидус (жидкий), а конца кристаллизации - точками солидус (твёрдый).

По полученным кривым охлаждения (критическим точкам) для различных сплавов изучаемой системы строят диаграмму состояния в координатах; по оси абсцисс - концентрация компонентов, по оси ординат - температура.

Рассмотрим диаграмму состояния для сплавов, образующих механические смеси из чистых компонентов (1 рода).

В этом случае оба компонента в жидком состоянии неограниченно растворимы, а в твердом состоянии нерастворимы и не образуют химических соединений. С некоторым приближением можно принять, что такими компонентами могут быть свинец - сурьма, образующие данную систему (рис. 1).

Для построения этой диаграммы выбирают три-четыре сплава различной концентрации, перенасыщенных либо свинцом, либо сурьмой, и на вспомогательной диаграмме температура – время (рис. 1 слева) наносят, пользуясь данными наблюдений температуры кристаллизации чистого свинца и чистой сурьмы, а также нижеперечисленных сплавов:

1. 95 % Pb; 5 % Sb;
2. 90 % Pb; 10 % Sb;
3. 87 % Pb; 13 % Sb;
4. 60 % Pb; 40 % Sb.

Вначале вычерчивают кривые кристаллизации Pb и Sb (1 и 6).

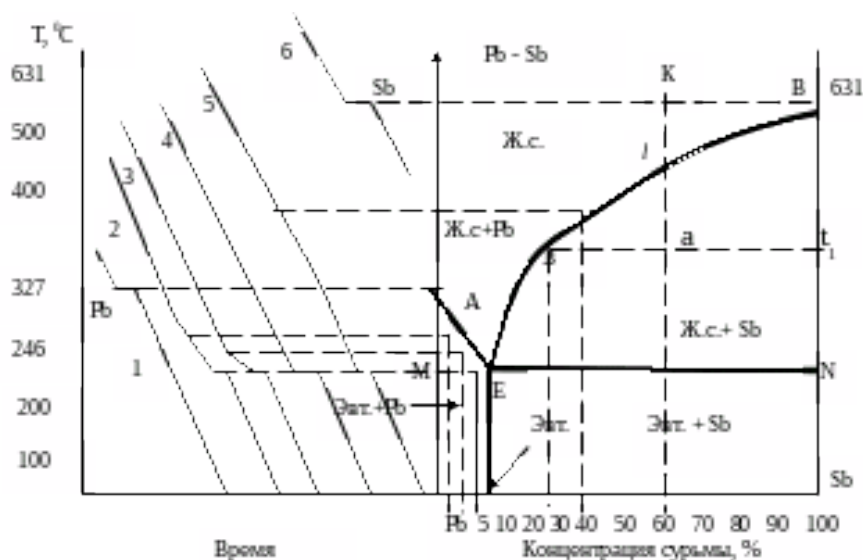


Рис. 1 – Диаграмма состояния сплавов свинец - сурьма

Свинец кристаллизуется при 327 °С, сурьма – при 631 °С. Их кристаллизация отмечена горизонтальным участком кривой. Первый сплав (кривая 2) начинает кристаллизоваться при 300 °С с выделением избыточных кристаллов свинца. Оставшаяся часть сплава бедна свинцом, значит, концентрация сурьмы в ней

возрастает, и, когда она достигает 13 %, при 246 °С происходит окончательная кристаллизация (см. горизонтальный участок кривой). Вторым сплавом (кривая 3) кристаллизуется аналогично первому, но точка начала кристаллизации у него ниже, а кончается кристаллизация также при 246 °С, когда концентрация сурьмы достигает 13 %. Третий сплав (кривая 4) кристаллизуется полностью при одной температуре (246 °С) с одновременным выпадением кристаллов свинца и сурьмы. Четвертый сплав (кривая 5) начинает кристаллизоваться при 400 °С с выделением избыточных кристаллов сурьмы. В жидком сплаве сурьмы становится все меньше, и, когда ее содержание снизится до 13 %, при 246 °С произойдет окончательная кристаллизация.

Все точки начала и конца кристаллизации свинца, сурьмы и указанных четырех сплавов перенесем на основную диаграмму. Соединив все точки начала кристаллизации, получают линию АЕВ. Эта линия называется ликвидусом. Все сплавы, лежащие выше ликвидуса, находятся в жидком состоянии. Линия МЕН называется солидусом. Ниже этой линии все сплавы находятся в твердом состоянии. В интервале между ликвидусом и солидусом имеется две фазы: жидкий сплав (ж.с.) и кристаллы одного из компонентов. В области МАЕ – жидкий сплав и кристаллы свинца, а в области ЕВN – жидкий сплав и кристаллы сурьмы.

Сплав, содержащий 13 % сурьмы, кристаллизующийся при одной температуре, называется эвтектическим. Он имеет самую низкую температуру кристаллизации и отличается равномерной структурой. Сплавы, содержащие менее 13 % сурьмы, лежащие влево от эвтектики, называются доэвтектическими, а более 13 % сурьмы – заэвтектическими. Структуры эвтектического, доэвтектического и заэвтектического сплавов сильно различаются между собой. Эвтектика – структура с равномерно распределенными компонентами. В доэвтектических сплавах наряду с эвтектикой имеются кристаллы свинца, в заэвтектических – наряду с эвтектикой кристаллы сурьмы.

Различие структур определяет различие свойств сплавов. Для определения состояния сплава при любой температуре и нахождения точек кристаллизации с помощью диаграммы нужно из точки концентрации данного сплава восстановить перпендикуляр до пересечения с линиями ликвидуса и солидуса. Точки пересечения перпендикуляра укажут начало и конец кристаллизации.

Практическое применение диаграммы свинец – сурьма находят, например, при выборе подшипникового сплава. Пользуясь этой диаграммой, установили, что наиболее пригодными для подшипниковых сплавов являются заэвтектические сплавы, состоящие из мягкой эвтектики и твердых вкраплений сурьмы. Мягкая основа несколько изнашивается, а твердые кристаллы сурьмы сохраняются, и поэтому в микроуглублениях мягкой основы хорошо удерживается смазка. Наиболее подходящими сплавами для подшипников из всех заэвтектическими оказались сплавы с содержанием 15- 20 % Sb, так как температу-

ры кристаллизации (плавления) этих сплавов (340-360 °С) соответствуют температурам, при которых происходит заливка подшипников.

Итак, по диаграмме состояния первого типа затвердевают те сплавы, компоненты которых в жидком состоянии неограниченно растворяются друг в друге, а в твердом состоянии образуют простую механическую смесь кристаллов обоих компонентов. По диаграмме состояния второго типа затвердевают сплавы, компоненты которых обладают неограниченной растворимостью как в жидком, так и в твердом состоянии.

Диаграмма 2-го рода соответствует сплавам, у которых компоненты и в жидком и в твердом состоянии образуют раствор. К ним относятся сплавы медь – никель, железо – никель и др. Диаграмма состояния медь – никель приведена на рис. 2.

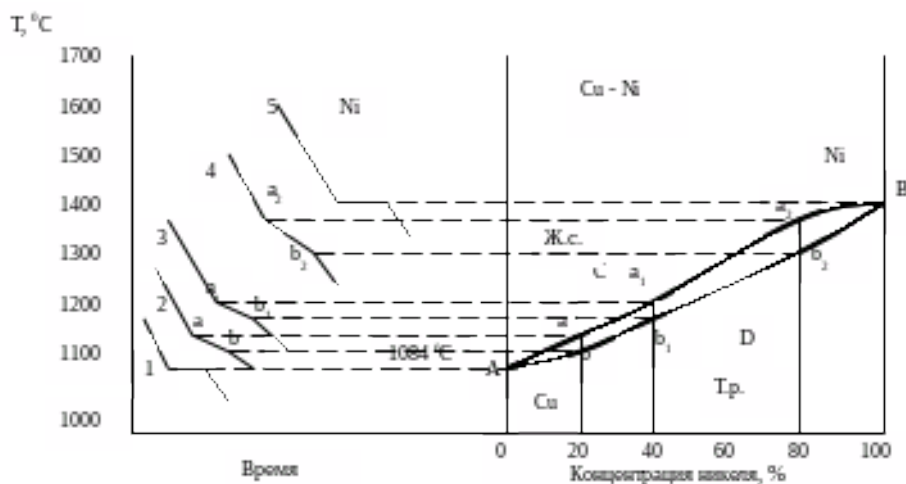


Рис. 2 – Диаграмма состояния сплавов медь – никель.

Кривая 1 относится к чистой меди, точка кристаллизации которой 1083 °С, а кривая 5 – к никелю, точка кристаллизации которого 1452 °С. Кривая 2 характеризует кристаллизацию 20 %-го сплава никеля (или 80 %-го сплава меди). Началу кристаллизации этого сплава соответствует точка а, когда кристаллизуется решетка меди, в которой имеется 20 % никеля. В точке б кристаллизация заканчивается.

Аналогично кристаллизуется 40 %-ный (кривая 3) и 80 %-ный (кривая 4) сплавы никеля, однако точки начала (а<sub>1</sub> и а<sub>2</sub>) и конца (b<sub>1</sub> и b<sub>2</sub>) кристаллизации у первого сплава ниже, чем у второго.

Перенеся все точки начала и конца кристаллизации меди и никеля и указанных выше сплавов на основную диаграмму (рис. 9 справа) и соединив эти точки, получим линии ликвидуса АаВ и линию солидуса AbВ. Выше линии АаВ сплавы меди с никелем находятся в жидком состоянии, а ниже линии AbВ – в твердом. В зоне между АаВ и AbВ имеются две фазы: жидкий сплав и кри-



сталлы твердого раствора никеля в меди. Диаграмма 2-го рода отличается от диаграммы 1-го рода тем, что здесь образуется одна кристаллическая решетка, а значит, нет и эвтектического сплава, как это наблюдается у сплавов, образующих механическую смесь. Подавляющее число металлов в жидком состоянии образует однородные жидкие растворы.

При переходе в твердое кристаллическое состояние во многих сплавах сохраняется однородность, следовательно, сохраняется взаимная растворимость. Такая однородная фаза называется твердым раствором.

Диаграмма состояния третьего типа рассматривает случай, когда два металла обладают полной взаимной растворимостью в жидком состоянии и ограниченной растворимостью в твердом состоянии; при этом растворимость в твердом состоянии уменьшается с понижением температуры (например, свинец - олово).

На рис. 3 приведена диаграмма состояния для этого случая в общем виде. Линии AC и CB соответствуют линии ликвидуса. По линии AC из жидкого сплава кристаллизуется твердый раствор компонента B в компоненте A ( $\alpha$ ), по линии CB – чистый компонент B.

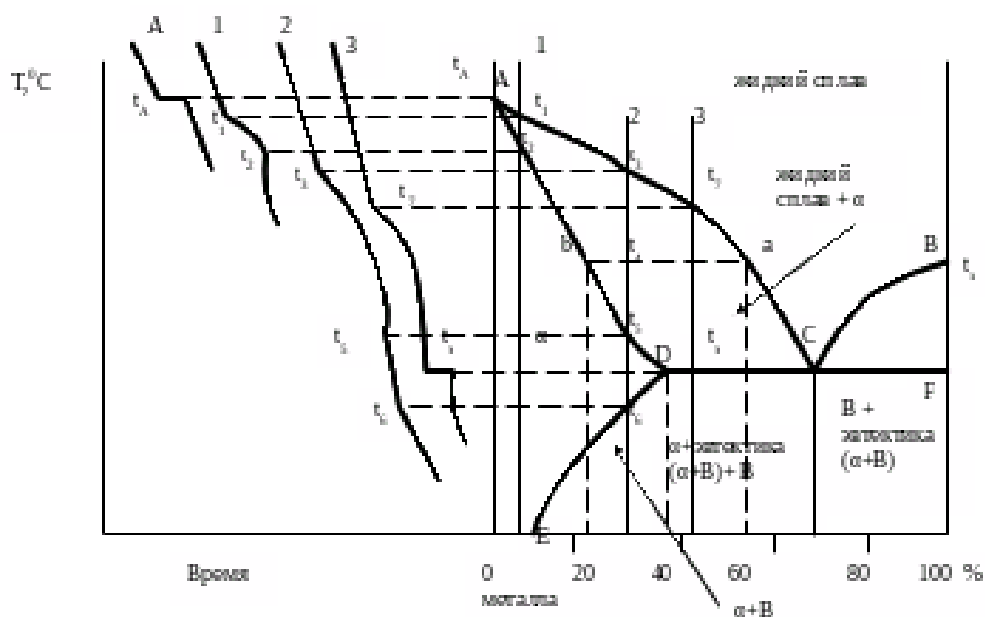


Рис. 3 – Диаграмма состояния для случая ограниченной растворимости

Линия ADCF отвечает линии солидуса. Точка D характеризует предельную растворимость B и A при эвтектической температуре  $t_3$ , а точка E – предельную растворимость компонента B в компоненте A при нормальной комнатной температуре. Следовательно, линия DE показывает изменение растворимости B и A с понижением температуры; каждая точка линии DE указывает

на предел растворимости В и А (предел насыщения) при соответствующей температуре.

В точке С одновременно из жидкой фазы кристаллизуется твердый раствор В в А ( $\alpha$ ) предельной растворимости (точка D) и компонент В с образованием эвтектики, т.е. механической смеси обеих фаз.

Рассмотрим процесс кристаллизации сплавов 1, 2, 3. Кристаллизация сплава 1 начинается при температуре  $t_1$  и заканчивается при температуре  $t_2$ . После затвердевания сплав состоит только из твердого раствора  $\alpha$  (В и А) и при дальнейшем понижении температуры никаких превращений не испытывает. Процесс кристаллизации сплава 2 начинается при температуре  $t_3$  и заканчивается при температуре  $t_5$ .

Состав жидкой фазы в процессе кристаллизации меняется по линии ликвидуса, а твердой фазы по линии солидуса. Так, например, при температуре  $t_4$  состав жидкой части сплава определяется точкой а, а кристаллов твердого раствора точкой b. После окончания кристаллизации сплав 2 будет состоять только из твердого раствора  $\alpha$ . После достижения температуры  $t_6$  твердый раствор этого состава оказывается насыщенным, а при более низких температурах – пересыщенным, что влечет за собой его распад с выделением избыточного количества металла В. Следовательно, при температуре ниже  $t_6$  сплав состоит из двух фаз:  $\alpha + В$ . Состав  $\alpha$  –раствора с понижением температуры изменяется по точкам линии DE и при нормальной комнатной температуре сплав будет состоять из кристаллов твердого раствора  $\alpha$  состава, отвечающего точке E, и кристаллов металла В.

Сплав 3 начинает затвердевать при достижении температуры  $t_7$  и окончательно затвердевает при температуре  $t_9$ .

В процессе кристаллизации состав жидкой части сплава непрерывно меняется по линии ликвидуса, стремясь к эвтектическому составу (точка С), а состав твердой фазы изменяется по линии солидуса в сторону предельной растворимости (точка D). Соотношение между жидкой и твердой фазой в процессе кристаллизации сплава определяется по правилу отрезков. По достижении температуры  $t_8$  состав жидкой фазы достигает эвтектической концентрации С, и сплав окончательно затвердевает с одновременным выделением из жидкой фазы кристаллов твердого раствора  $\alpha$  (концентрации точки D) и кристаллов компонента В, образующих эвтектику. Следовательно, после затвердевания сплав будет состоять из первичных предельно насыщенных (точка D) кристаллов твердого раствора  $\alpha$ , выделившихся в интервале температур  $t_7 - t_8$  и эвтектики ( $\alpha_D + В$ ), образовавшейся при температуре  $t_8$ .

Вследствие изменения растворимости В в А при дальнейшем понижении температуры твердый раствор  $\alpha$  (как свободный, так и входящий в состав эв-

тектики) претерпевает распад с выделением избыточного металла В. После окончательного охлаждения состав  $\alpha$  – фазы определится точкой Е.

Сплав, имеющий концентрацию, соответствующую точке С, после затвердевания будет состоять из одной эвтектики ( $\alpha$ +В).

Кристаллизация заэвтектических сплавов будет протекать совершенно аналогично сплаву 3, только вместо первичных кристаллов  $\alpha$  будет выделяться кристаллы чистого компонента В.

Свойства сплавов, как это показал Н.С. Курнаков, изменяются в области однородных твердых растворов по кривой, а в области смеси фаз - по прямой; крайние точки на прямой соответствуют свойствам предельно насыщенных твердых растворов. Как показал академик А.А. Бочвар, чем больше интервал температур, в котором происходит процесс кристаллизации, тем меньше жидкотекучесть сплава, т.е. тем хуже сплав заполняет форму, тем большее развитие получает рассеянная по всему мелкая пористость и тем выше склонность сплава к образованию горячих трещин. Наилучшими литейными свойствами обладают сплавы, затвердевающие в небольшом интервале температур, в частности эвтектический состав. Сплавы, имеющие структуру однородного твердого раствора, обладают высокой пластичностью и легко деформируются как в холодном, так и в горячем состоянии. Пластическая деформация сплавов, имеющих двухфазное строение, связана со значительно большими трудностями. Особенно снижается пластичность при появлении в структуре эвтектики.

Поэтому в сплавах, предназначенных для обработки давлением, максимум растворимости при эвтектической температуре является верхним пределом содержания компонентов. Наоборот, для обеспечения высоких литейных свойств концентрация компонентов в литейных сплавах обычно превышает максимальную растворимость в твердом состоянии при эвтектической температуре. Сплавы, обладающие ограниченной растворимостью в твердом состоянии, могут быть упрочнены путем термической обработки.

По диаграмме состояния четвертого типа (рис. 4) затвердевают сплавы, компоненты которых в жидком состоянии неограниченно растворяются друг в друге, а при затвердевании образуют химическое соединение.

Химическое соединение представляет собой фазы постоянного состава, обычно имеющие свою особую кристаллическую решетку, отличную от решеток образующих его компонентов. Поэтому свойства химического соединения самостоятельны и не зависят от свойств компонентов.

На базе химических соединений могут образовываться твердые растворы. При образовании твердого раствора кристаллическая решетка химического соединения сохраняется, а избыточное количество атомов, например компонента В, замещает в решетке часть атомов компонента А.

Нормальные валентные соединения типа  $Mg_2Si$ ,  $Mg_2Sn$  (станнум),  $Mg_2Pb$  в металлических сплавах образуются редко. В большинстве случаев образующиеся в металлических системах химические соединения не подчиняются нормальным правилам валентности.

В металлических системах большое значение имеют электронные соединения.

Соединения этого типа имеют совершенно определенное отношение числа валентных электронов к числу атомов, входящих в соединение. Так, существует ряд соединений, у которых это отношение равно 3:2, у других 21:13, у третьих 7:4. Каждому из этих соотношений соответствует и определенный тип кристаллической решетки. Все соединения, имеющие отношение числа валентных электронов к числу атомов, равное 3:2, имеют кристаллическую решетку центрированного куба. К этому типу относятся такие соединения, как  $CuZn$  (цинкумат),  $Cu_3Al$ ,  $Cu_5Sn$  и другие, известные под названием  $\beta$ -фаз.

Соединениям  $Cu_5Zn_8$ ,  $Cu_9Al_4$  и другим, имеющим отношение 21:13, свойственна сложная кубическая решетка; эти соединения носят название  $\gamma$ -фазы.

Наконец, таким соединениям, как  $CuZn_3$ ,  $Cu_3Sn$ ,  $Cu_3Si$  и другим, имеющим отношение 7:4, свойственна гексагональная решетка. Эти соединения носят название  $\epsilon$ -фазы. Большая группа металлов ( $Fe$ ,  $Cr$ ,  $Mo$ ,  $W$ ,  $Ti$  и др.) образуют с углеродом, азотом, водородом, и бором, имеющими малый атомный радиус, химические соединения, которые носят название фазы внедрения. Эта группа соединений образуется при условии, если отношение атомного радиуса металлоида к атомному радиусу металла меньше или равно 0,59. В этом случае образуется соединение, имеющее формулу  $M_4X$  ( $Mn_4N$ ,  $Fe_4N$  и т.д.),  $M_2X$  ( $W_2N$ ,  $Fe_2N$ ),  $MX$  ( $TiN$ ,  $TiC$ ,  $WC$ ,  $VC$ ) или ( $ZrH_2$ ).

Металлические атомы в фазах внедрения образуют одну из наиболее простых кристаллических решеток (кубическую, гексагональную), в которую внедряются атомы металлоидов, занимая в ней свободные поры.

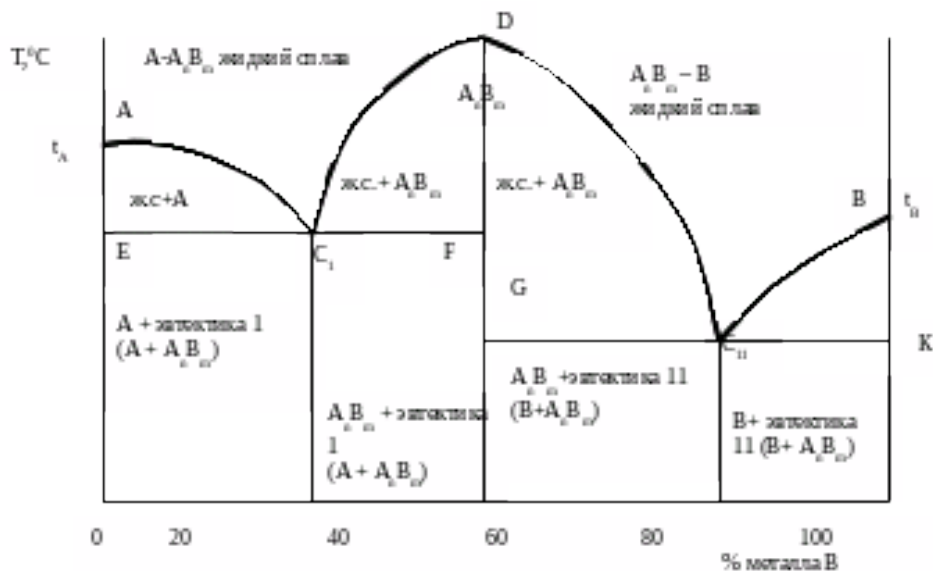


Рис. 4- Диаграмма состояния для случая образования в системе устойчивого химического соединения

Диаграмма состояния для случая, когда два компонента обладают полной взаимной растворимостью в жидком состоянии, не растворимы в твердом состоянии и образуют устойчивое химическое соединение, представлена на рис. 4.

Процесс кристаллизации сплавов  $A-A_nB_m$  начинается при температурах, отвечающих линии  $AC_1D$ ; при этом по линии  $AC_1$  кристаллизуется металл  $A$ , а по линии  $C_1D$  – химическое соединение  $A_nB_m$ . Окончание процесса кристаллизации соответствует эвтектической температуре (линия  $EC_1F$ ).

Кристаллизация сплавов  $A_nB_m - B$  начинается при температурах, соответствующих линии  $DC_{11}B$ ; при этом по линии  $DC_{11}$  кристаллизуется соединение  $A_nB_m$ , а по линии  $C_{11}B$  – чистый металл  $B$ . Конец кристаллизации соответствует эвтектической линии  $GC_{11}K$ . Как видно из рис. 11, в данной системе образуются две эвтектики; одна  $C_1$ , состоящая из смеси кристаллов  $A$  и соединения  $A_nB_m$ , и другая  $C_{11}$ , состоящая из смеси соединения  $A_nB_m$  и кристаллов  $B$ .

В первой системе  $A - A_nB_m$  доэвтектические сплавы состоят из первичных кристаллов компонента  $A$  и эвтектики  $C_1$ , а заэвтектические сплавы – из кристаллов соединения  $A_nB_m$  и эвтектики  $C_1$ . Во второй системе  $A_nB_m - B$  доэвтектические сплавы содержат, кроме эвтектики  $C_{11}$ , первичные кристаллы соединения  $A_nB_m$  и заэвтектические сплавы – кристаллы чистого металла  $B$ .

Однако следует иметь в виду, что в подавляющем большинстве случаев чистые компоненты и химическое соединение образуют области твердых растворов в ограниченных пределах. В этом случае диаграмму следует рассматри-

вать как сложную, состоящую из двух диаграмм эвтектического типа с ограниченной растворимостью в твердом состоянии.

### **Правило отрезков**

В любой точке диаграммы, когда в сплаве одновременно существуют две фазы, можно определить концентрацию обеих фаз и их количество. Для этого служит так называемое правило отрезков или правило рычага.

В точке *a*, показывающей состояние сплава *K* при температуре  $t_1$  (рис. 1), сплав состоит из кристаллов сурьмы и жидкости. Выше точки *l* сплав находится в однофазном состоянии, и концентрация компонентов в этой фазе (т.е. в жидкости) определяется проекцией точки *a*. При охлаждении из сплава выделяются кристаллы сурьмы, и состав жидкости изменяется в сторону увеличения в ней свинца. При температуре  $t_1$  концентрация сурьмы в жидкости определяется проекцией точки *b*; это максимальное количество сурьмы, которое может содержать жидкость при  $t_1$ .

По достижении эвтектической температуры жидкость принимает эвтектическую концентрацию. Следовательно, при охлаждении сплава *K* концентрация жидкости меняется по кривой *1c*. Выделяющиеся кристаллы свинца имеют постоянный состав - это чистый свинец, концентрация которого лежит на вертикальной оси *BN*.

Первое положение правила отрезков формулируется следующим образом: чтобы определить концентрацию компонентов в фазах, через данную точку, характеризующую состояние сплава, проводят горизонтальную линию до пересечений с линиями, ограничивающими данную область: проекции точек пересечения на ось концентраций показывают составы фаз.

Второе положение правила отрезков формулируется так; для того чтобы определить количественное соотношение фаз, через заданную точку проводят горизонтальную линию. Отрезки этой линии между заданной точкой и точками, определяющими составы фаз, обратно пропорционально количествам этих фаз.

В качестве примера определим концентрацию (состав) фаз и количественное соотношение фаз для сплава с содержанием 60 % *Sb* и 40 % *Pb* при 350 °С.

В соответствии с первым положением правила отрезков, концентрация твердой фазы определится проекцией точки *a* на ось абсцисс, т.е. она равна 100 % *Sb*, состав жидкой фазы определится проекцией точки *b* на ось абсцисс, что соответствует 30 % *Sb*.

В соответствии со вторым положением правила отрезков весовое количество фаз сплава при температуре 350 °С определится отрезками:  $wa$  - вес кристаллов Sb,  $ac$  - вес жидкой фазы,  $vc$  - вес всего сплава.

Спроектировав концентрационные отрезки на ось абсцисс, получим:  $wa = 60 - 30 = 30\%$ ;  $ac = 100 - 60 = 40\%$ ;  $vc = 100 - 30 = 70\%$ .

Следовательно, весовое количество сурьмы  $Q_{Sb}$  и жидкости  $Q_l$ , определится соотношением отрезков:

$$Q_{Sb} \text{ на } Q_c \cdot wa$$

$$\frac{Q_{Sb}}{Q_c} = \frac{wa}{vc}, \text{ откуда } Q_{Sb} = \frac{wa}{vc} \cdot 100\%;$$

$$Q_c \text{ на } Q_l \cdot ac$$

$$Q_l \text{ на } Q_c \cdot ac$$

$$\frac{Q_l}{Q_c} = \frac{ac}{vc}; Q_l = \frac{ac}{vc} \cdot 100\%;$$

$$Q_c \text{ на } Q_c \cdot vc$$

$Q_c$  - количество всего сплава.

Вид диаграммы определяется характером взаимодействий, которые возникают между компонентами в жидком и твердом состояниях.

Наиболее типичные диаграммы состояния металлических систем приведены на рис. 5.

1. Диаграмма состояния для сплавов, образующих механические смеси из чистых компонентов (I типа, рис. 5,а).

Оба компонента в жидком состоянии неограниченно растворимы, а в твердом - нерастворимы и не образуют химических соединений,

Компоненты: А и В ( $K = 2$ ). Фазы: жидкость L, кристаллы А и кристаллы В ( $\Phi = 3$ ).

Линия  $A_1CB_1$  является линией ликвидус, линия ДСЕ - линией солидус и линией эвтектического превращения. На линии ДСЕ из жидкости концентрации точки С одновременно выделяются кристаллы А состава точки Д и кристаллы В состава точки Е. т.е.

$$L_c = \text{кр.}A_d + \text{кр.}B_e$$

Эта механическая смесь называется эвтектикой.

Сплавы, лежащие левее точки  $C$ , называют доэвтектическими, а сплавы, лежащие правее точки  $C$ , - заэвтектическими.

Доэвтектические сплавы состоят из смеси кристаллов  $A$  и эвтектики (кр. $A + Э$ ), заэвтектические - из смеси кристаллов  $B$  и эвтектики (кр. $B + Э$ ).

2. Диаграмма состояния для сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (II типа, рис.5,б).

Оба компонента неограниченно растворимы в жидком и твердом состоянии и не образуют химических соединений.

Компоненты:  $A, B$  ( $K - 2$ ). Фазы:  $L$ , кристаллы  $\alpha$  ( $\Phi=2$ ),

линия  $AmB$  - линия ликвидус, линия  $AnB$  - линия солидус.

Если два компонента неограниченно растворяются в жидком и твердом состояниях, то возможно существование только двух фаз - жидкого раствора  $L$  и твердого  $\alpha$ -раствора. Следовательно, трех фаз быть не может, кристаллизации при постоянной температуре не наблюдается и горизонтальной линии на диаграмме нет. Диаграмма состоит из трех областей: жидкость, жидкость - твердый раствор и твердый раствор.

При двух компонентах и двух фазах система моновариантна ( $C=K-f + 1 = 2-2+1=1$ ), т.е. если изменяется температура, то изменяется и концентрация компонентов в фазах; каждой температуре соответствуют строго определенные составы Фаз.

Концентрация и количество фаз у сплава, лежащего между линиями ликвидус и солидус, определяется правилом отрезков.

Следует обратить внимание на то, что во всем интервале кристаллизации (между линиями ликвидус и солидус) из жидкого сплава выделяются кристаллы, более богатые тугоплавким компонентом.

3. Диаграмма состояния для сплавов с ограниченной растворимостью в твердом состоянии (III типа, рис. 5,в).

Оба компонента неограниченно растворимы в жидком состоянии, ограниченно - в твердом и не образуют химических соединений.

Компоненты  $A$  и  $B$  ( $K = 2$ ), Фазы ( $L$ , кристаллы  $\alpha$ , кристаллы  $\beta$  ( $\Phi = 3$ ), кристаллы  $\alpha$  - твердый раствор компонента  $B$  в компоненте  $A$ , кристаллы  $\beta$  - твердый раствор компонента  $A$  в компоненте  $B$ ).

Линия  $A_1CB_1$  - линия ликвидус.



Линия  $A_1ECFB_1$  - линия солидус.

Линия  $ECF$  - линия эвтектического превращения:

$$L_c = \text{кр.}\alpha E + \text{кр.}\beta E$$

$L$  эвтектика  $\perp$

Линия  $ES$  - линия ограниченной растворимости в твердом состоянии компонента  $B$  в компоненте  $A$ .

Линия  $FM$  - линия ограниченной растворимости в твердом состоянии компонента  $A$  в компоненте  $B$ .

Структурные составляющие, образующиеся в процессе охлаждения сплавов данной системы, показаны на рис 5,в.

4. Диаграмма состояния для сплавов, образующих химическое соединение (IV типа, рис. 5,г).

Если компоненты  $A$  и  $B$  образуют химическое соединение  $A_nB_m$ , то, следовательно, на  $n + m$  его атомов приходится  $n$  атомов  $A$  и  $m$  атомов  $B$ .

Компоненты  $A$  и  $B$  ( $K = 2$ ). Фазы: кристаллы  $A$ , кристаллы  $A_nB_m$  и  $L$  или кристаллы  $A_nB_m$  кристаллы  $B$  и  $L$ .

Линия  $A_1CДС'В_1$  - линия ликвидус

Линия  $ДСЕД_1E_1$  - линия солидус

Линия  $ДСЕ$  - линия эвтектического превращения:

$$L_c = \text{кр.}A_d + \text{кр.}A_nB_mE, (\Phi = 3)$$

$L$  (эвтектика)  $\perp$

Линия  $Д_1С'E_1$  - линия эвтектического превращения:

$$L_{c'} = \text{кр.}A_nB_mD_1 + \text{кр.}B_{E1}, (\Phi = 3)$$

$L$  (эвтектика)  $\perp$

Диаграмму состояния, приведенную на рис. 2,г. следует рассматривать как сложную, состоящую из двух простых диаграмм:

1. Компонент  $A$  - химическое соединение  $A_nB_m$ .
2. Компонент  $B$  - химическое соединение  $A_nB_m$ .

Точка  $D'$  - сингулярная точка, где образуется химическое соединение  $A_nB_m$ .

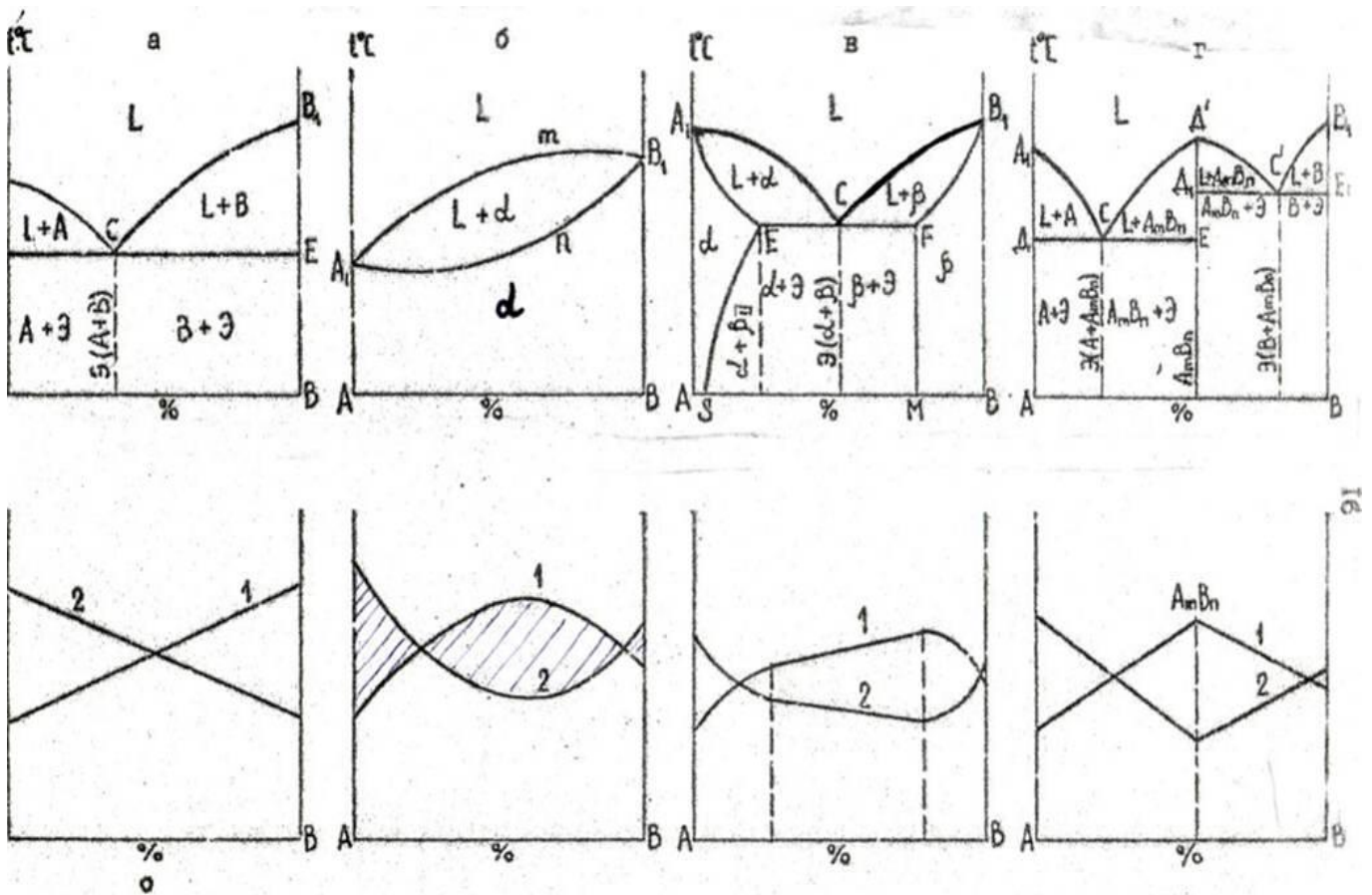


Рис. 2 Изменение свойств сплавов в зависимости от типа диаграммы состояния:  
 а - первого типа; б - второго типа; в - третьего типа, г - четвертого типа

### Связь между свойствами сплавов и типом диаграмм состояния

Химический состав и структура определяют свойства металлического сплава. Структура, в свою очередь, зависит от характера взаимодействия компонентов, входящих в состав сплава, что и отражают диаграммы состояния. Следовательно, между диаграммами состояния и полученными свойствами сплавов существует определенная зависимость. Эта зависимость впервые была изучена Н.С. Курнаковым, который представил ее в виде диаграммы состав - свойства. На рис. 5 приведены четыре основных типа диаграмм состояния и соответствующие им закономерности изменения свойств сплава с изменением концентрации. По ординате на нижних диаграммах откладывают показатели свойств или обратные им числовые величины. В данном случае рассмотрены твердости (кривая 1) и электропроводность (кривая 2). Крайний ординаты на диаграммах показывают свойства чистых компонентов.

Если компоненты сплава образуют механические смеси, то свойства сплавов сконцентрированной усадочной раковины.

Обработке давлением лучше поддаются однофазные сплавы - чистые металлы или однородные твердые растворы, обладающие меньшим сопротивлением пластическому деформированию.

Обрабатываемость режущим инструментом повышается с применением структурно-неоднородных сплавов. Наличие в сплаве твердых фаз способствует износу режущего инструмента. Это однофазные твердые растворы и химические соединения. Если в сплаве отсутствуют твердые фазы, то двухфазные сплавы легче обрабатываются резанием, чем однофазные, которые имеют более высокую коррозионную стойкость, чем двухфазные. Таким образом, характер образующихся фаз определяет свойства сплава и обуславливает вид диаграммы состояния.

#### **Для усвоения материала необходимо:**

1. Вычертить схемы четырех типов диаграмм состояния и построить графики изменения свойств сплавов в зависимости от их состава.
2. Охарактеризовать линии, точки и области диаграмм состояния указанных типов.
3. Для всех диаграмм состояния (по заданию преподавателя) построить кривую охлаждения сплава и определить при конкретной температуре концентрацию и количество фаз сплава, пользуясь правилом фаз и правилом отрезков.
4. Используя полученные данные описать изменение механических, физико-химических и технологических свойств сплавов в зависимости от изменения концентрации компонентов.

#### **Вопросы для самопроверки:**

1. Что понимают под системой?
2. Что называют компонентами?
3. Какая часть системы называется фазой?
4. Когда образуется механическая смесь?
5. Какие фазы называют твердыми растворами?
6. Чем отличаются твердые растворы внедрения от твердых растворов замещения?
7. Какие растворы называют неупорядоченными?
8. Назовите одно из условий неограниченной растворимости.
9. Какие твердые растворы называют упорядоченными?
10. Какую механическую смесь называют эвтектикой?
11. Что выражает закон Гиббса?
12. Что понимают под числом степеней свободы (вариантностью) системы?
13. Сформулируйте первую и вторую часть правила отрезков.
14. Какую температуру называют точкой Курнакова?

#### **Практическая работа №1.**

##### *«Связь между свойствами сплава и типом диаграммы состояния»*

1. Дать определение каждого типа диаграмм состояния.
2. Вычертить схемы четырех типов диаграмм состояния и построить графики изменения свойств сплавов в зависимости от их состава.

3. Охарактеризовать линии, точки и области диаграмм состояния указанных типов.
4. Для всех диаграмм состояния (по заданию) построить кривую охлаждения сплава и определить при конкретной температуре концентрацию и количество фаз сплава, пользуясь правилом фаз и правилом отрезков.
5. Используя полученные данные описать изменение механических, физико-химических и технологических свойств сплавов в зависимости от изменения концентрации компонентов.

Таблица заданий.

	Температура, °C/ Концентрация							
	I тип	Sn-Zn	II тип	Cu-Ni	III тип	Pb-Sn	IV тип	Mg-Ca
1	210	95-5	1490	95-5	190	95-5	635	95-5
2	220	90-10	1480	90-10	195	90-10	630	90-10
3	230	85-15	1470	85-15	200	85-15	625	85-15
4	240	80-20	1460	80-20	205	80-20	620	80-20
5	250	75-25	1450	75-25	210	75-25	615	75-25
6	260	70-30	1440	70-30	215	70-30	610	70-30
7	270	65-35	1430	65-35	220	65-35	605	65-35
8	280	60-40	1420	60-40	225	60-40	600	60-40
9	290	55-45	1410	55-45	230	55-45	595	55-45
10	300	50-50	1400	50-50	235	50-50	590	50-50
11	310	45-55	1300	45-55	240	45-55	585	45-55
12	320	40-60	1290	40-60	245	40-60	580	40-60
13	330	35-65	1280	35-65	250	35-65	575	35-65
14	340	30-70	1270	30-70	255	30-70	570	30-70
15	350	25-75	1260	25-75	260	25-75	560	25-75
16	360	20-80	1250	20-80	265	20-80	555	20-80
17	370	15-85	1240	15-85	270	15-85	550	15-85
18	380	10-90	1230	10-90	275	10-90	545	10-90
19	390	5-95	1220	5-95	280	5-95	530	5-95
20	400	5-95	1200	5-95	285	5-95	525	5-95

### Литература

1. Материаловедение и технология материалов : учебное пособие / Под ред. А. И. Батышева, А. А. Смолькина. - М. : ИНФРА-М, 2013. - 288 с. : ил. - (Высшее образование: Бакалавриат). - Рек.: НМО. - Биб-

лиогр.: с. 285. - ISBN 978-5-16-004821-5

2. Сильман, Г. И. Материаловедение : учебное пособие / Г. И. Сильман. - М. : Академия, 2008. - 336 с. : ил. - (Высшее профессиональное образование). - Доп. МОиН РФ. - Прил.: с. 322. - Библиогр.: с. 330. - ISBN 978-5-7695-4255-8
3. Научные основы материаловедения : учебник / под ред. Б. Н. Арзамасова. - М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1994. - 366 с. : ил. - ISBN 5-7038-1104-X
4. Колесов, С. Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов / С. Н. Колесов, И. С. Колесов. - М. : Высшая школа, 2004. - 519с. - Библиогр.: с. 511. - ISBN 5-06-004412-2

#### Интернет-ресурсы:

1. <http://window.edu.ru/> – Единое окно доступа к образовательным ресурсам.
2. [www.biblioclub.ru](http://www.biblioclub.ru) – Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека онлайн».
3. [www.e.lanbook.com](http://www.e.lanbook.com) – Электронно-библиотечная система «Лань»
4. [catalog.ncstu.ru](http://catalog.ncstu.ru) – Электронный каталог фолиант СКФУ
5. [www.library.stavsu.ru](http://www.library.stavsu.ru) – Электронная библиотека и электронный каталог научной библиотеки СКФУ

*МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ*

по выполнению практических работ

по дисциплине «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»

для студентов заочной формы обучения направления подготовки

18.03.01 Химическая технология

*Составители*

*Е.Н. Павленко, к.т.н., доцент*

*Отв. редактор*

*Д.В. Казаков, к.т.н., доцент*

Редактор Л.Д. Бородастова

---

Подписано в печать 10.04.2016 г.

Формат 60 × 84 1/16

Уч.-изд. л. 0,4 п.л. Усл. печ. л. 0,5 п.л.

Тираж 50 экз.

---

Северо-Кавказский федеральный университет

Невинномысский технологический институт (филиал)

357108, г. Невинномысск, ул. Гагарина, 1

---

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Невинномысский технологический институт (филиал)

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
по выполнению лабораторных работ  
по дисциплине «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»  
для студентов направления подготовки  
15.03.02 Технологические машины и оборудование

Невинномысск 2020

Методические указания разработаны в соответствии с требованиями ФГОС ВО и рабочей программы дисциплины «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ». Указания предназначены для студентов направления подготовки 15.03.02 Технологические машины и оборудование.

Составители

Д.В. Казаков, к.т.н., доцент

Отв. редактор

Е.Н. Павленко, к.т.н., доцент



## ВВЕДЕНИЕ

Методические указания и задания по курсу материаловедения составлены в соответствии с программой данного курса, читаемого в ФГАОУ ВО «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ», Невинномысский технологический институт (филиал).

В методических указаниях приведено описание лабораторных установок, изложена методика проведения лабораторных работ, предусмотренных учебным планом. Каждая лабораторная работа направлена на закрепление знаний студентов по соответствующему разделу дисциплины «Материаловедение».

Пособие по лабораторным работам предназначено для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки 15.03.02 Технологические машины и оборудование.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЧИСТЫХ МЕТАЛЛОВ И ГРАДУИРОВКА ТЕРМОПАРЫ

#### Цель работы

Ознакомиться с методикой проведения термического анализа чистых металлов и градуировки термопар.

#### Задание

1. Произвести термический анализ чистых металлов и построить для них кривые охлаждения.
2. По кривым охлаждения определить значения ЭДС, характеризующие температуры кристаллизации чистых металлов.
3. Построить градуировочную кривую для хромельалюмелевых термопар.

#### Основные сведения

Переход металла из жидкого состояния в твердое с образованием кристаллов называется кристаллизацией. Особенностью перехода из жидкого состояния в твердое является то, что в чистых металлах он протекает при постоянных температурах, которые зависят от природы металла и давления.

Расположение атомов в жидкости характеризуется отсутствием дальнего порядка, т.е. отсутствием правильного расположения атомов, периодически повторяющегося в трех измерениях.

Внутренняя энергия неупорядоченной жидкости больше упорядоченного строения твердого тела, поэтому при переходе из одного состояния в другое наблюдается выделение (или поглощение) тепла.

Теплота, выделяющаяся при переходе металла из жидкого состояния в твердое, называется скрытой теплотой плавления. Температура кристаллизации определяется как температура, при которой свободные энергии жидкой и твердой фаз равны. Изменение свободной энергии жидкого и твердого состояний зависит от температуры (рис.1).

Температура  $T_s$  называется равновесной температурой кристаллизации (плавления). Процесс кристаллизации при этой температуре не происходит, т.к.

в этих условиях свободные энергии жидкого и твердого состояний равны.

Процесс кристаллизации начинается, когда возникает разность сво-

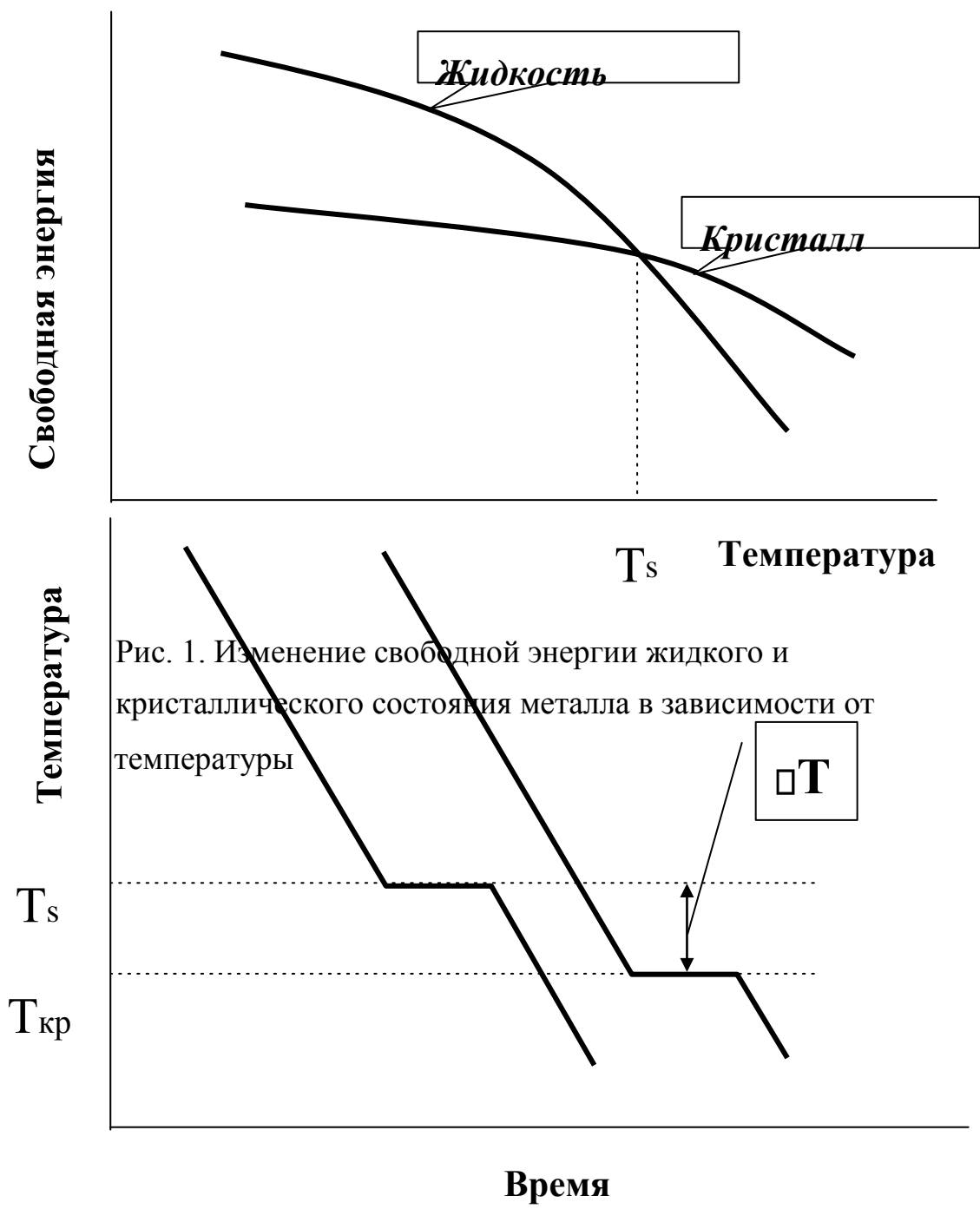


Рис. 1. Изменение свободной энергии жидкого и кристаллического состояния металла в зависимости от температуры

Рис. 2. Кривые охлаждения при кристаллизации

бодных энергий, которая образуется вследствие меньшей свободной энергии твердого металла по сравнению с жидким. Следовательно, для перехода металла из жидкого состояния в твердое необходимо переохладение ниже равновесной температуры кристаллизации.

Для проведения термического анализа испытуемый металл, если определяют температуру кристаллизации, помещают в тигель и доводят до плавления. После этого металл медленно охлаждают с постоянной скоростью и через равные промежутки времени замеряют его температуру. Для измерения высоких значений температур обычно используют термоэлектрические пирометры. Термоэлектрические пирометры состоят из термопары и регистрирующего устройства (милливольтметра, потенциометра).

Термопара состоит из двух проволочек разных металлов или сплавов и обладает тем свойством, что если соединить (сварить) одни концы проволок, а другие присоединить к гальванометру, то при нагреве спая возникает электродвижущая сила, вызывающая отклонения стрелки гальванометра. Величина электродвижущей силы зависит от состава материала термопары и температуры замкнутых концов цепи. Результирующая ЭДС тем больше, чем больше разность температур горячего и холодного спая. При постоянной температуре одного из концов, выведенных к измерительному прибору (называемого холодным спаем), результирующая ЭДС определяется температурой второго конца (горячего спая), который вводится в расплавленный металл.

В качестве термопары применяют следующие сочетания металлов:

платинородий (10% Rh) - платина (ПП1); платинородий (30% Rh) - платинородий (6 % Rh) (ДР30/6), хромельальюмель (ХА); хромель-копель(ХК).

Таблица 1

### **Химический состав сплавов для термопар**

Хромель	Алюмель	Константан	Платинородий
Ni - 89,0 % Cr - 9,8 % Fe - 1,0 % Mn - 0,2 %	Ni - 94 % Al - 2 % Si - 1,0 % Fe - 0,5 % Mn - 2,5 %	Ni - 40 % Cu - 59 % Mn - 1 %	Pt - 90 %  Rh - 10 %

Таблица 2

### Область применения термопар

Термопара	Температурный предел, °С
Медь- константан	400
Серебро-константан	600
Железо-константан	650
Хромель-алюмель	900
Платина-платинородий	1600

Горячий спай термопары, защищенный огнеупорным колпачком от соприкосновения с жидким металлом, опускается в металл с таким расчетом, чтобы спай находился в середине объема металла, что позволяет характеризовать его действительную температуру. Холодный спай термопары выводят к измерительным приборам. По показаниям этих приборов - по отдельным замерам температуры через определенные промежутки времени получают графики  $T=f(t)$ , в координатах ЭДС - время (рис.2).

На кривой охлаждения можно выделить три участка:

- 1 - охлаждение металла в жидком состоянии,
- 2 - период кристаллизации,
- 3 - охлаждение металла в твердом состоянии.

На кривой охлаждения при кристаллизации появляется горизонтальная площадка (остановка в падении температуры), причиной которой является выделение скрытой теплоты кристаллизации.

Фактическая температура кристаллизации ниже теоретической температуры. Разность между теоретической и фактической температурами кристаллизации называется степенью переохлаждения

$$\Delta T = T_s - T_{кр}$$

Степень переохлаждения зависит от природы, чистоты металла и скорости охлаждения. Чем больше скорость охлаждения, тем больше степень переохлаждения, и процесс кристаллизации протекает при температурах, лежащих значительно ниже теоретической температуры кристаллизации.

Механизм кристаллизации состоит в образовании центров кристаллизации и последующем их росте.

При достижении температуры кристаллизации в жидком металле возникают мельчайшие частицы кристаллов, называемые "зародышами" или "центрами кристаллизации", из которых с определенной скоростью растут кристаллы. Пока кристаллы окружены жидкостью, они имеют правильную форму. При столкновении растущих кристаллов их правильная форма нарушается. Форма кристаллов зависит от условий их соприкосновения в процессе роста.

Скорость процесса кристаллизации зависит от скорости зарождения центров кристаллизации (ч.ц) и скорости роста кристаллов из этих центров (с.к.). Число центров кристаллизации и скорость роста кристаллов определяются степенью переохлаждения.

С увеличением степени переохлаждения с.к. и ч.ц. возрастают, достигают максимума при определенной степени переохлаждения, после чего снижаются

(рис.3).

Размер образовавшихся кристаллов зависит от числа центров кристаллизации и скорости роста кристаллов при данной степени переохлаждения. При небольших степенях переохлаждения в жидкости образуется малое количество центров кристаллизации, а скорость роста кристаллов из этих центров велика, в результате образуются немногочисленные крупные кристаллы. С увеличением степени переохлаждения число центров кристаллизации увеличивается и размер зерна в затвердевшем металле

уменьшается. Для получения высоких механических, в частности, прочностных свойств желательно получение мелкозернистой структуры.

Зависимость между ЭДС в мВ и температурой в  $^{\circ}\text{C}$  устанавливают по результатам построения градуировочной кривой, т.е. проводят градуировку термопар.

Градуированную кривую строят по известным температурам плавления (кристаллизации) чистых металлов и соответствующим им значениям ЭДС, определяемым по экспериментальным кривым охлаждения.

### **Методика проведения работы**

В экспериментах используются чистые металлы: олово, свинец, цинк, сурьма.

1. Тигель с металлом установить в электропечь и нагревать несколько выше температуры плавления исследуемого металла.

2. В расплавленный металл опустить термопару, защищенную огнеупорным колпачком.

3. Печь выключить. Металл охлаждается вместе с печью.

4. С момента начала охлаждения показания милливольтметра через каждые 30 секунд записывать в табличной форме.



Рис. 3. Скорость роста кристаллов (1) и число центров кристаллизации (2) в зависимости от степени переохлаждения металла

Таблица 3

Номер опыта	Показания милливольтметра мВ	Примечания



## Порядок оформления отчета

В отчете приводятся:

1. Цель работы и задание по ее выполнению.
2. Краткие сведения по теории кристаллизации металлов.
3. Результаты измерения ЭДС для всех исследуемых металлов в табличной форме (табл. 3).
4. Кривые охлаждения в координатах: ЭДС - время.
5. Таблица со значениями ЭДС кристаллизации исследуемых металлов (табл. 4).

Таблица 4

Металл	Температура плавления, °С	ЭДС кристаллизации мВ
олово	232	
свинец	327	
цинк	419	
сурьма	630	

6. График - градуировочная кривая для хромель-алюмелевой термопары.

# ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СВИНЦОВО-СУРЬМЯНИСТЫХ СПЛАВОВ И ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ

## Цель работы

Ознакомиться с методиками проведения термического анализа сплавов и экспериментального построения диаграмм состояния.

## Задание

1. Произвести термический анализ свинцово-сурьмянистых сплавов с различным соотношением компонентов.
2. Определить значения критических температур для каждого исследуемого сплава.
3. Построить приближенную диаграмму состояния для свинцово-сурьмянистых сплавов.
4. Изучить правила фаз и отрезков.

## Основные сведения

Сплавы - это сложные вещества, полученные сплавлением двух и более компонентов.

Строение сплава зависит от того, в какие взаимодействия вступают компоненты, образующие сплав. В связи с этим могут быть образованы три вида сплавов: механические смеси, твердые растворы. и химические соединения.

Сплав системы Pb - Sb относится к сплавам типа "механические смеси". Механическая смесь образуется тогда, когда компоненты, образующие сплав, взаимно растворимы в жидком состоянии, не растворимы в твердом состоянии и не образуют химических соединений.

Особенность кристаллизации сплавов типа механические смеси рассмотрим на примере сплавов Pb-Sb следующего состава:

1. 5% Sb и 95% Pb
2. 13% Sb и 87% Pb
3. 30% Sb и 70% Pb

Кривые охлаждения этих сплавов представлены на рис.1.2.3.

Кривая охлаждения сплава из 5 % Sb и 95 % Pb состоит из

четырёх участков (рис.1)

1 - охлаждение сплава в жидком состоянии;

2 - кристаллизация избыточного компонента (Pb) в интервале температур  
–  $T_1 - T_2$ ;

3 - одновременная кристаллизация свинца и сурьмы при постоянной температуре  $T_2$ .

4 - охлаждение сплава в твердом состоянии.

Кристаллизация сплава начинается при температуре  $T_1$  (верхняя критическая температура) и протекает при переменной температуре до  $T_2$  (нижняя критическая температура).

В интервале температур  $T_1 \dots T_2$  из жидкости выделяются кристаллы избыточного компонента (Pb).

Если из жидкости выделяются кристаллы Pb, то концентрация Pb в жидкой фазе уменьшается, а концентрация Sb в жидкой базе увеличивается. В процессе кристаллизации концентрация компонентов в жидкой фазе изменяется и стремится к такой концентрации (13% Sb и 87% Pb), когда оба компонента Pb и Sb из жидкости кристаллизуются совместно. Одновременная кристаллизация сурьмы и свинца протекает при постоянной температуре.

В сплаве, содержащем 13 % Sb и 87 % Pb, из жидкой фазы происходит одновременная кристаллизация обоих компонентов (рис.2). В результате образуется однородная механическая смесь. Структура, состоящая из двух или более твердых фаз, одновременно кристаллизовавшихся из жидкости, называется эвтектикой.

В сплаве, содержащем 30% Sb и 70% Pb, процесс кристаллизации начинается при температуре  $T_1$ . Из жидкой фазы начинают кристаллизоваться кристаллы компонента, находящегося в избытке относительно эвтектической концентрации, т.е. Sb (рис.3). Если из жидкости выделяются кристаллы сурьмы, то в процессе кристаллизации жидкая фаза обогащается свинцом. Когда концентрация компонентов в жидкой фазе достигнет эвтектической концентрации (т.е. 13% Sb

и 87% Pb), то начнется совместная кристаллизация обоих компонентов при постоянной температуре  $T_2$ .

Кривые охлаждения показывают, что все сплавы системы Pb - Sb окончательно затвердевают при постоянной температуре -  $T_2$ . Это дает основание считать, что затвердевшая при постоянной температуре -  $T_2$  часть жидкого сплава имеет постоянный состав. Такому составу соответствует сплав, содержащий 13 % Sb и 87 % Pb. Для сплавов типа механические смеси температура конца кристаллизации не зависит от концентрации сплава, она постоянна для всех сплавов. Температура начала кристаллизации изменяется в зависимости от концентрации компонентов в сплаве.

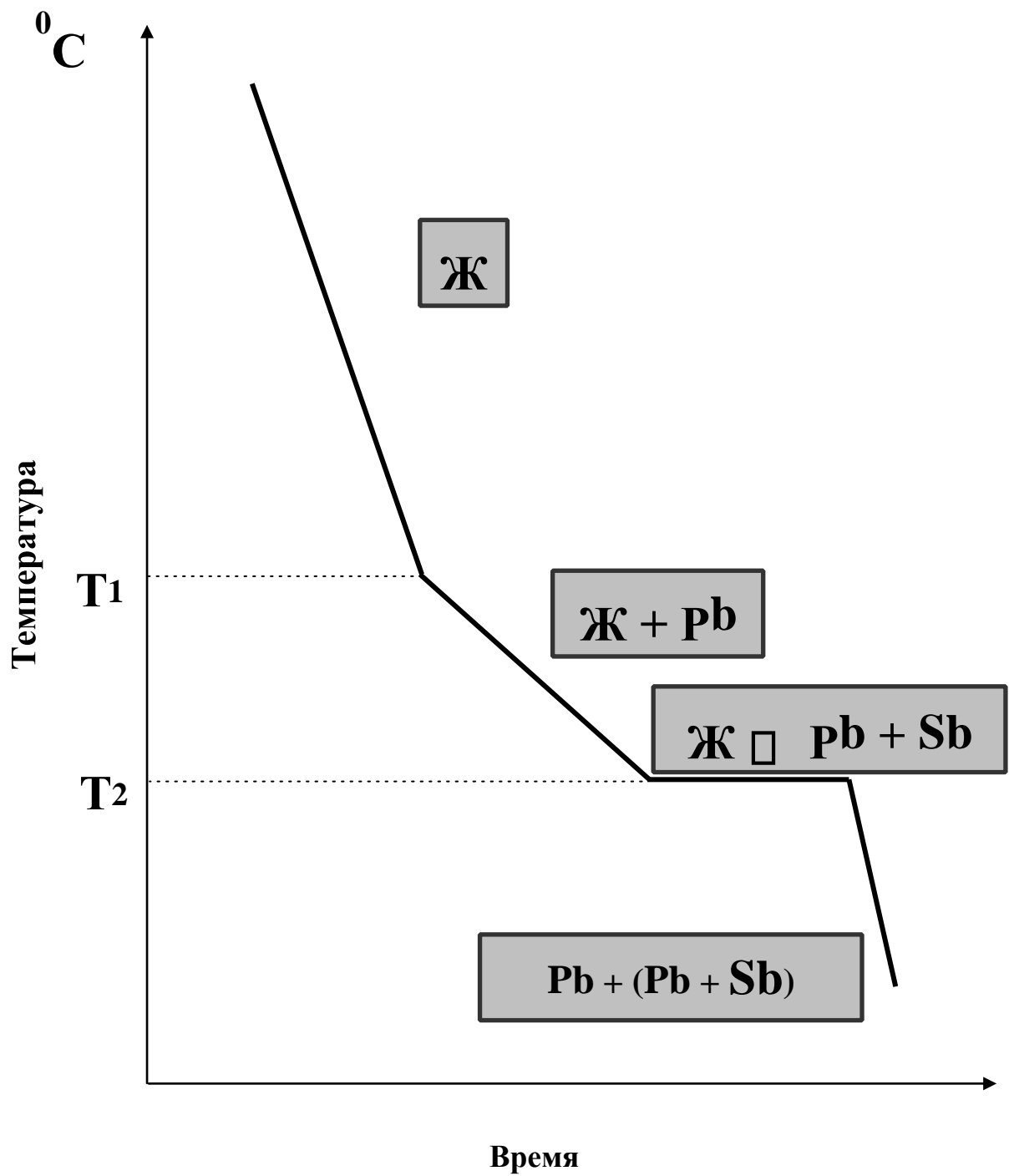


Рис.1. Кривая охлаждения доэвтектического сплава

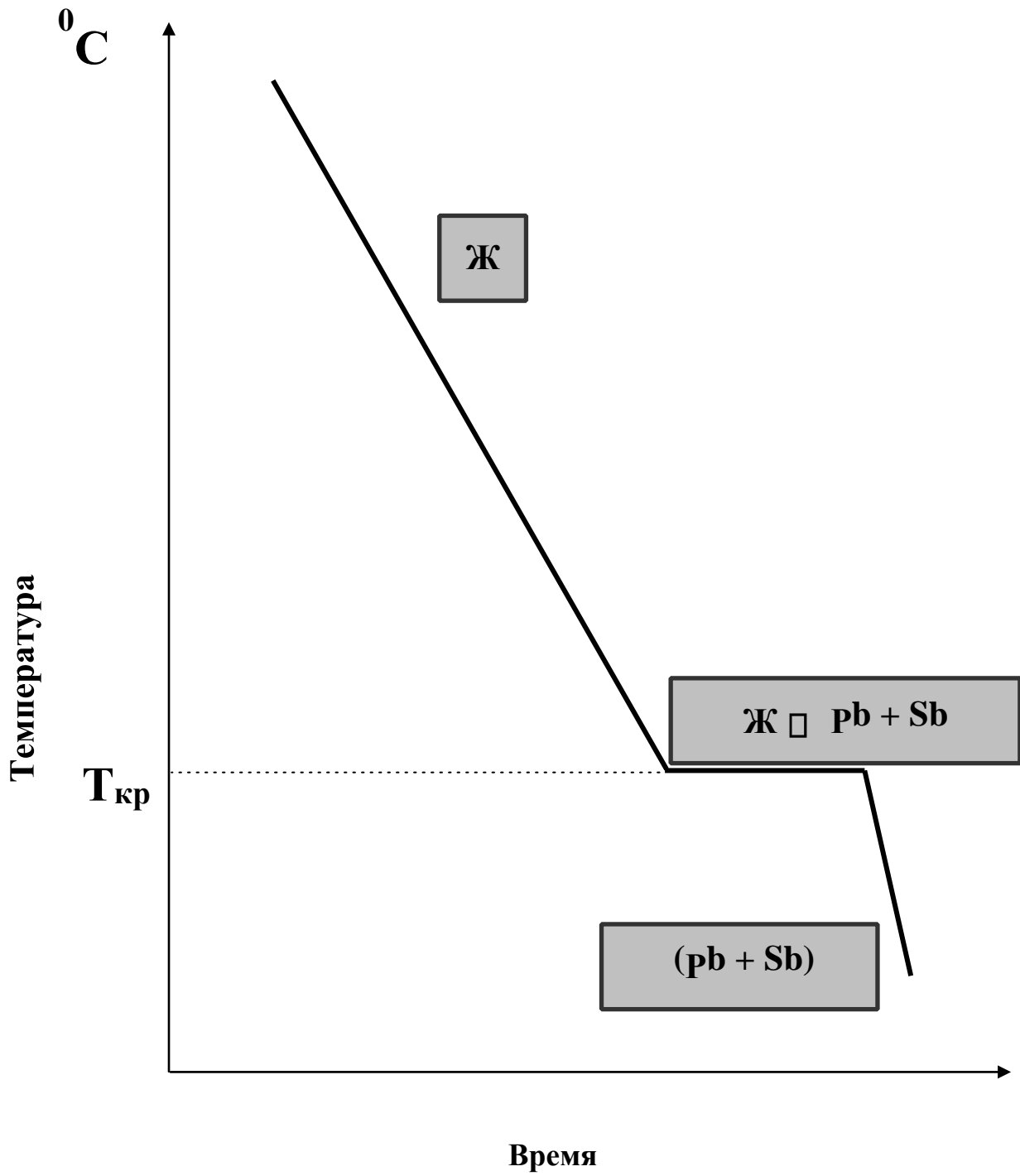


Рис.2. Кривая охлаждения эвтектического сплава

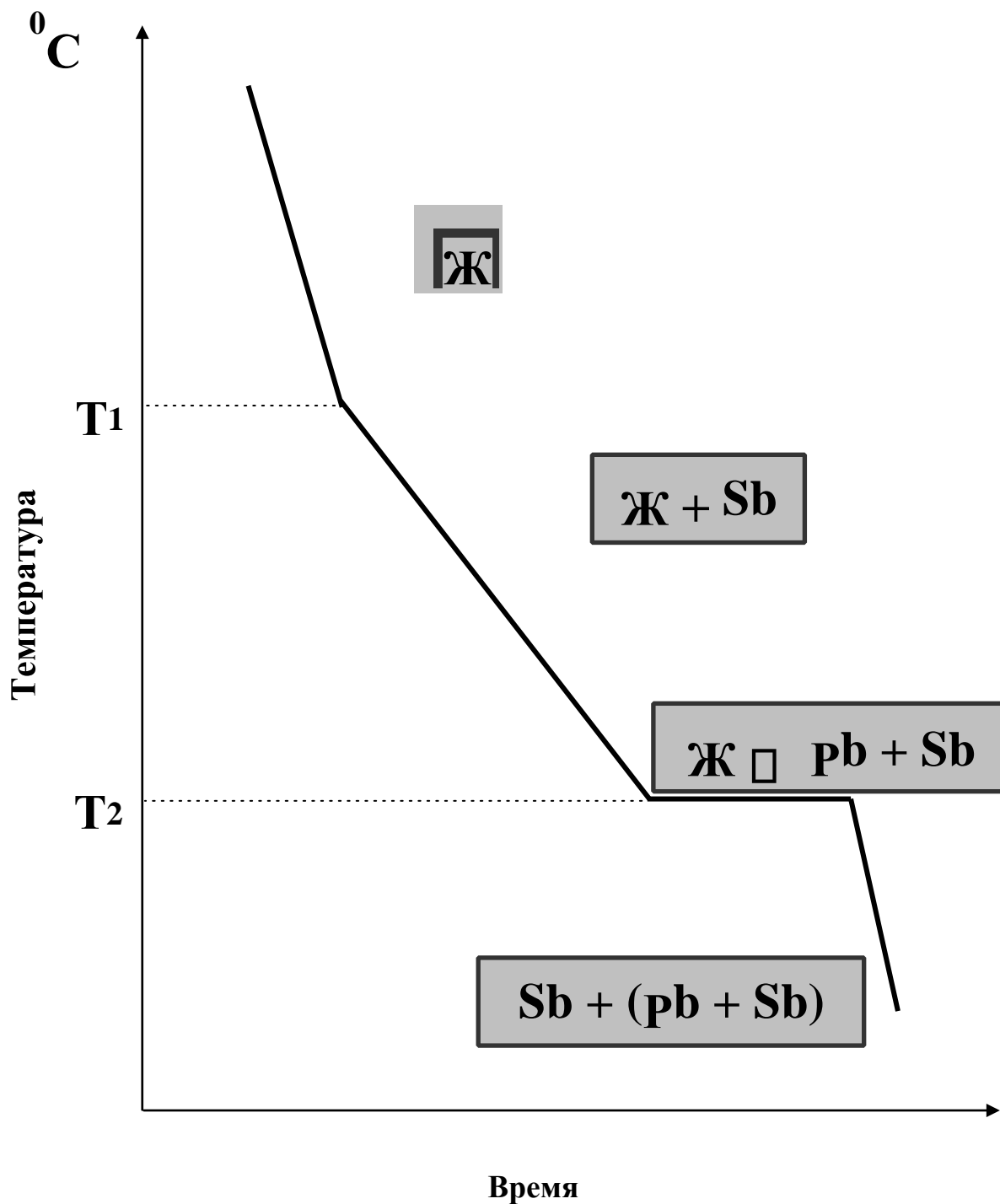


Рис.3. Кривая охлаждения заэвтектического сплава

### Построение диаграммы состояния

Диаграмма состояния представляет собой графическое изображение состояния сплава в зависимости от температуры и концентрации компонентов.

Диаграмма состояния может быть построена по данным кривых охлаждения сплавов различного состава.

Диаграмму состояния сплавов, состоящих из двух компонентов, строят в координатах "температура - концентрация" (рис.4). По оси ординат откладывают

температуру, по оси абсцисс - концентрацию. Общее содержание обоих компонентов в сплаве равно 100 %. По оси абсцисс от 0 до 100 % увеличивается концентрация Sb в сплаве, следовательно, концентрация Pb в сплаве будет возрастать справа налево. Таким образом, крайние ординаты соответствуют чистым компонентам Pb и Sb. На оси ординат в точках, соответствующих чистым компонентам, отмечают значения температур кристаллизации Pb и Sb. Затем на основании проведенного термического анализа сплавов Pb - Sb с различным содержанием компонентов строят кривые охлаждения с целью определения температуры начала кристаллизации  $T_1$  и конца кристаллизации  $T_2$ .

Значения температур –  $T_1$  и  $T_2$  для каждого сплава наносят на вертикаль, соответствующую концентрации данного сплава. Соединяют температуры кристаллизации чистых металлов и температуры начала кристаллизации -  $T_2$  плавной линией. Кривая, отвечающая началу равновесной кристаллизации сплавов, называется линией ликвидус (АСВ).

Кривая, проведенная через точки конца кристаллизации, называется линией солидус (ДСЕ).

Выше линии ликвидус сплав находится в жидком состоянии, ниже линии солидус - в твердом. Сплав, содержащий 13% Sb, является эвтектическим. Сплавы, в которых Sb меньше 13%, называются доэвтектическими; если содержание Sb больше 13%, - до такие сплавы являются заэвтектическими,

В доэвтектических сплавах ниже линии АС начинается процесс кристаллизации, из жидкости выделяются кристаллы Pb, в заэвтектических сплавах ниже линии GB выделяются кристаллы Sb. Следовательно, в области АСД существуют две фазы: Ж + Pb, в области СВЕ: Ж + Sb.

В процессе кристаллизации доэвтектических и заэвтектических сплавов концентрация жидкой фазы изменяется и стремится к эвтектической. На линии ДСЕ из жидкости эвтектической концентрации одновременно выделяются кристаллы Pb и Sb, т.е. кристаллизуется эвтектика





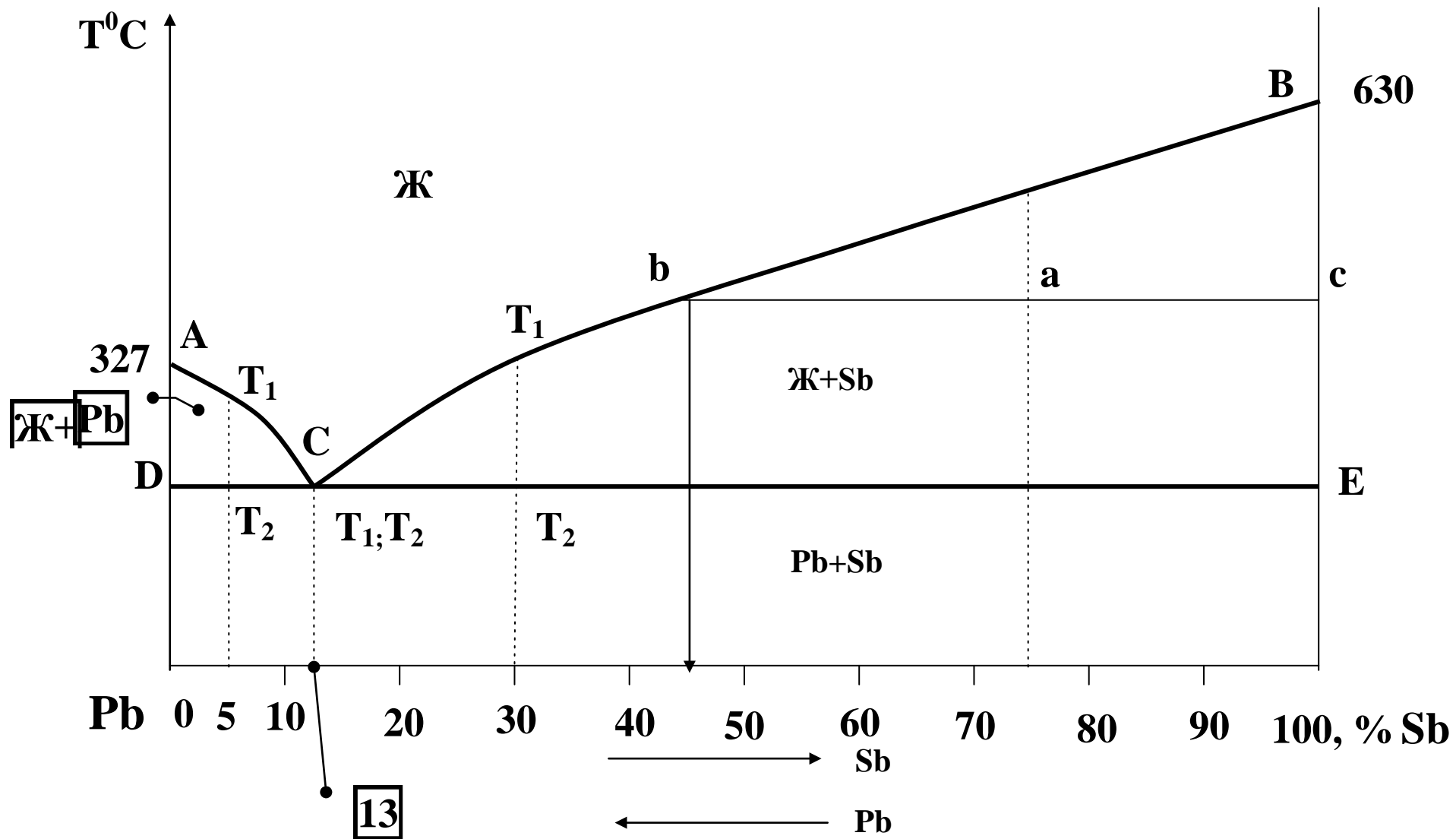


Диаграмма состояния Pb-Sb

## Правило фаз

Диаграмма состояния дает представление о процессах кристаллизации сплавов, показывает области существования сплавов в жидком и твердом состояниях и интервал кристаллизации, позволяет определять равновесный состав жидкой и твердой фаз на любой стадии кристаллизации.

Процесс кристаллизации подчиняется правилу фаз, которое дает количественную зависимость между степенью свободы системы и количеством фаз и компонентов.

Фазой называется однородная часть неоднородной системы, разграниченная от других частей системы (фаз) поверхностью раздела, при переходе через которые химический состав или структура вещества изменяются скачком.

Для условий, когда все превращения происходят при постоянном давлении, правило фаз выражается уравнением

$$C = k - f + 1$$

где:  $C$  - число степеней свободы системы, т.е. число внешних (температура) и внутренних (концентрация) факторов, которые можно изменять без изменения числа фаз в системе;  
 $k$  - число компонентов;  
 $f$  - число фаз.

Процесс кристаллизации сплавов Pb-Sb с точки зрения правила фаз представляется в таком виде.

В период охлаждения жидкого сплава число степеней свободы будет две:

$$C = k - f + 1 = 2 - 1 + 1 = 2$$

Это значит, что можно менять в известных пределах температуру, а также можно изменять концентрацию жидкого раствора, добавляя к нему свинец или сурьму, а сплав останется однофазным (жидкий раствор).

В период выделения кристаллов пересыщающего компонента из жидкого раствора (между линией ликвидус и солидус).

$$C = k - f + 1 = 2 - 2 + 1 = 1.$$

Это значит, что в известных пределах можно повышать или понижать температуру, но число фаз останется равным двум:

жидкий раствор и твердые кристаллы.

В период образования эвтектики (линия солидус) число степеней свободы равно 0, так как

$$C = k - f + 1 = 2 - 3 + 1 = 0.$$

Это значит, что процесс кристаллизации эвтектики происходит при постоянной температуре, причем концентрация сурьмы в каждой фазе строго постоянна, а именно: в жидком растворе - 13 % - Sb, в твердых кристаллах сурьмы - 100 % Sb, в твердых кристаллах свинца - 100 % Pb.

### Правило отрезков

Для определения количественного соотношения фаз и концентрации фаз применяют правило отрезков (или правило рычага).

Рассмотрим на диаграмме состояния системы Pb-Sb сплав с исходной концентрацией K. При температуре T сплав состоит из кристаллов сурьмы и жидкости. Для определения состава фаз через заданную точку *a* проводят линию до пересечения с границами области диаграммы. Проекция точки *b* на ось концентрации покажет состав жидкой фазы, а проекция точки *c* - состав твердой фазы. Из диаграммы видно, что в процессе кристаллизации при понижении температуры, состав жидкой фазы изменяется по линии ликвидус и стремится к эвтектической концентрации, а состав твердой фазы остается постоянным.

При кристаллизации изменяется и соотношение фаз: количество твердой фазы увеличивается, жидкой - уменьшается.

Обозначим вес жидкой фазы через  $Q_{ж}$ , твердой через  $Q_{ТВ}$ , а общий вес жидкой и твердой фаз через  $Q$ . Если написать уравнение моментов

относительно точки *a*, то

$$Q_{ж} \cdot ab = Q_{ТВ} \cdot ac ; Q_{ж} / Q_{ТВ} = ac/ab ; Q_{ж} / Q = ac/bc ; Q_{ж} = ac/bc \cdot 100\%$$

;

$$Q_{ТВ} / Q = ab/bc ; Q_{ТВ} = ab/bc \cdot 100\%$$

## Методика работы

Методика выполнения работы аналогична работе № I. Исследования проводятся на той же установке. Результаты термического анализа каждого из трех сплавов записываются в таблицу.

Таблица 1

Номер отсчета	Показания гальванометра, мВ			Примечание
	5 % Sb	13 % Sb	30 % Sb	
				Отсчет производится каждые через 30 сек.

- 1.
- 2
- 3
- 4
- 5.
- и
- т.д

По данным термического анализа строят кривые охлаждения в координатах "ЭДС - время", где определяют значения ЭДС<sub>1</sub> - соответствующее началу кристаллизации и ЭДС<sub>2</sub> - соответствующее концу кристаллизации.

Пользуясь градуировочной кривой (лабораторная работа № I), определяют по значению ЭДС верхнюю и нижнюю критические температуры в

0

С. Эти данные также записываются в табличной форме, (табл. 2) .

Таблица 2

Металл или сплав	Верхняя критическая температура T <sub>1</sub> (начало кристаллизации)		Нижняя критическая температура T <sub>2</sub> , (конец кристаллизации)	
	ЭДС	°С	ЭДС	°С

0 % Sb  
(чистый свинец) 5 %  
Sb, 95 % Pb  
13 % Sb, 87 % Pb  
30 % Sb, 70 %  
Pb 100 % Sb  
(чистая сурьма).

На основании табл.2 строится диаграмма состояния системы свинец-сурьма.

### **Порядок оформления отчета**

В отчете приводятся:

1. Цель работы и задания по ее выполнению.
2. Результаты измерения ЭДС для всех исследованных сплавов (табл. 1).
3. Значения критических температур для свинца, сурьмы и их сплавов (табл. 2).
4. Построенная по результатам эксперимента приближенная диаграмма состояния сплавов Pb - Sn.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА N 3 МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ СВИНЦОВО-СУРЬМЯНИСТЫХ СПЛАВОВ**

### **Цель работы**

Ознакомиться с методикой проведения микроструктурного анализа с использованием металлографического микроскопа на примере свинцовосурьмянистых сплавов.

### **Задание**

1. Зарисовать оптическую схему металлографического микроскопа.

2. Описать методику изготовления шлифов.
3. Просмотреть шлифы свинцово-сурьмянистых сплавов под микроскопом и зарисовать наблюдаемые микроструктуры.
4. Нарисовать диаграмму состояния сплавов Pb - Sb .

### **Основные сведения**

#### **Сущность и назначение микроструктурного анализа**

В металловедении используют различные методы для изучения кристаллического строения металлов и сплавов. Эти методы разделяются на два вида: методы для изучения внутреннего строения металлов и методы для изучения внешних форм кристаллов.

Внутреннее строение кристаллов, т.е. взаимное расположение атомов в кристаллической решетке, изучают с помощью рентгеноструктурного анализа, Внешние формы и размеры кристаллов изучают с помощью макро - и микроструктурного анализа.

Совокупность и взаимное расположение кристаллов (зерен) в металлах и сплавах, называется структурой.

В связи с тем, что металлы непрозрачны, форму кристаллов (зерен), их размеры и взаимное расположение можно изучать на изломах или специально приготовленных образцах, называемых шлифами.

Макроструктурный анализ применяют для изучения и контроля строения сплавов невооруженным глазом или с помощью лупы с тридцатикратным увеличением на изломах и на шлифах.

С помощью микроструктурного анализа дается оценка металла в состоянии поставки, выявляется присутствие вредных и легкоплавких включений, проверяется качество различных методов термической и химико-термической обработки, устанавливается связь между структурой и показателями прочности, пластичности и износостойкости металлов и сплавов и т. д.

Микроструктурный анализ выполняется в следующей последовательности: приготовление шлифов, выявление структуры травлением шлифов, изучение структуры под микроскопом.

Оптическая схема вертикального микроскопа приведена на рис. 1.

Нить лампы 1 коллектором 2 проектируется в плоскость апертурной диафрагмы 5. Системой, состоящей из линз 6 и 10, призмы 9 и отражательной пластины 11, апертурная диафрагма изображается в плоскости опорного торца для объективов. Отражательная пластинка 11 направляет в объектив лучи, которые, отразившись от объекта, вновь проходят через объектив, выходят из него параллельным пучком, проходят отражательную пластинку и попадают на ахроматическую линзу 14.

Таким образом, объектив служит не только для получения изображения, но и является частью осветительной системы. Выходящие из объектива параллельные лучи при помощи линзы 14 образуют изображение объекта в фокальной плоскости окуляра. При визуальном наблюдении в ход лучей вводится зеркало 18, которое отклоняет лучи в сторону окуляра 19.

При фотографировании зеркало 18 выключается и лучи направляются непосредственно к фотоокуляру 15. За фотоокуляром 15 находится зеркало 16, которое направляет лучи на фотографическую пластинку.

Полевая диафрагма 8 служит для ограничения участка наблюдаемого объекта.

Следует учитывать, что микроструктурный анализ предполагает изучение под микроскопом определенного сечения металла. Для обеспечения этого условия выбирают участок для изучения, вырезают образец металла таким образом, чтобы в разрез попало нужное сечение. Размеры образцов зависят от изучаемых объектов и в значительной мере - от целей и задач исследования.

Резка образцов производится на токарных станках или ножовкой, если изучаемый металл имеет низкую твердость, если предстоит изучение закаленных сталей, то резку образцов осуществляют анодно-механическим способом или бакелитовыми кругами с обильным охлаждением водой.

После изготовления образца, предназначенного для изучения, его поверхность проходит несколько стадий последовательной обработки: грубое механическое шлифование на наждачных кругах, тонкое ручное шлифование на наждачной бумаге и окончательное механическое полирование на кругах,

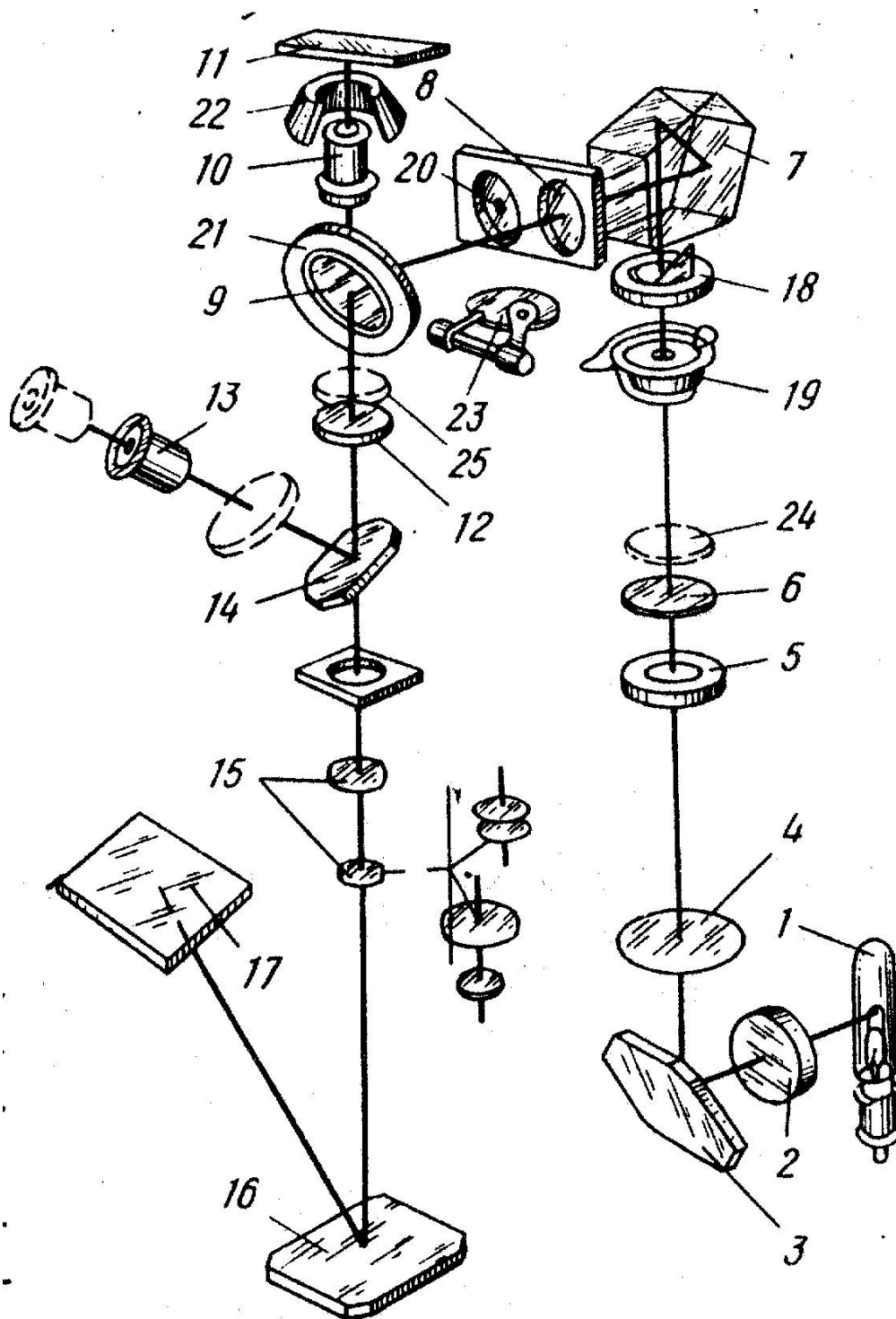


Рис. 1. Оптическая схема металлографического микроскопа

При замене бумаги на бумагу другого номера, образец следует повернуть на  $90^{\circ}$ , чтобы риски при шлифовании на более мелкой бумаге были направлены перпендикулярно ранее образованным рискам при шлифовании на более крупной бумаге.



Шлиф для микроструктурного анализа считается подготовленным качественно, если его поверхность имеет зеркальный вид без единой, даже незначительной, риски или царапины.

После механической подготовки поверхности шлифа проводится операция травления. Эта операция вызвана тем, что полированный шлиф металла в нетравленном виде имеет под микроскопом вид светлого круга, на котором, при наличии, можно различить: поры, раковины, трещины и неметаллические включения. Однако, структуру металла на таком шлифе увидеть невозможно. Для выявления структуры металла шлифа проводят травление специальными реактивами, преимущественно раствором азотной кислоты в спирте.

Реактив выбирают таким образом, чтобы он обеспечивал избирательное растворение структурных составляющих.

В результате избирательного растворения при травлении на поверхности шлифа образуются выступы и впадины, соответствующие конфигурации отдельных структурных составляющих.

При рассмотрении поверхности шлифа под микроскопом световые лучи от выступов и впадин отражаются различно (рис. 2).

Структурные составляющие, протравленные больше (впадины) будут казаться темными, а непротравленные или протравленные меньше - светлыми. Поэтому в поле зрения микроскопа можно видеть размер, форму и взаимное расположение отдельных зерен.

При проведении микроструктурного анализа следует учитывать, что под микроскопом изучается разрез определенного участка металла, поэтому видимые под микроскопом плоские зерна имеют в действительности объемную форму, а сетка вокруг кристаллов в плоскости шлифа, если таковая существует и видна, в действительности является сечением оболочки.

### **Микроструктура свинцово-сурьмянистых сплавов**

В зависимости от концентрации компонентов, свинцово-сурьмянистые сплавы делятся на три группы: эвтектический сплав, доэвтектические и заэвтектические сплавы.

Структура каждой группы сплавов имеет свои особенности.

Структура эвтектического сплава (13 % Sb и 87 % Pb) образована равномерно перемешанными кристалликами свинца и сурьмы. Под микроскопом кристаллы свинца в структуре имеют черный цвет, а кристаллы сурьмы - белый. Анализ этой структуры показывает, что основным металлом этого сплава является свинец, а кристаллики сурьмы равномерно в нем рассеяны.

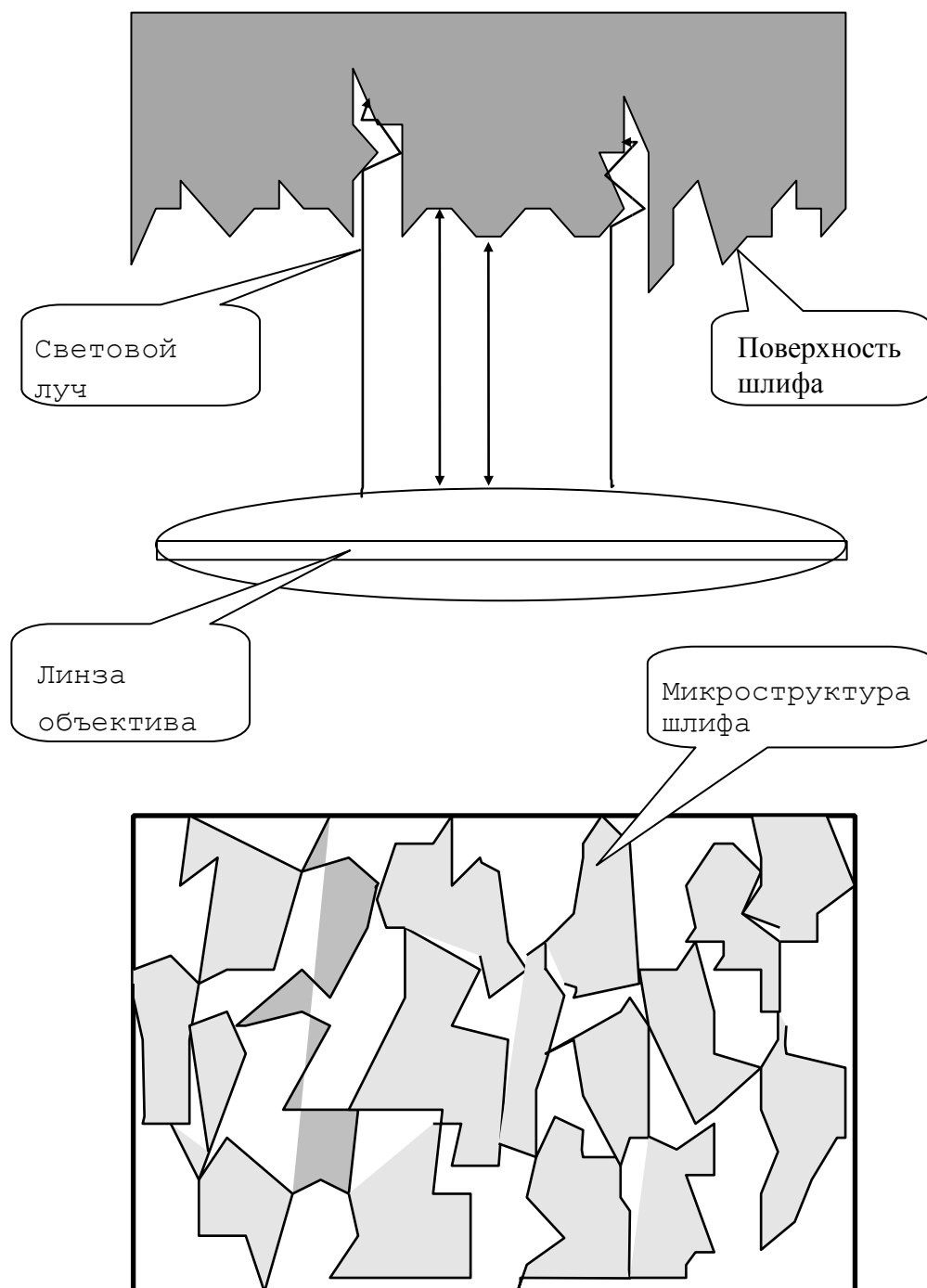


Рис.2. Схема отражения световых лучей от поверхности шлифа и характерный вид микроструктуры

Формирование такой структуры обусловлено тем, что свинец, преобладавая по количеству в составе этого сплава, при кристаллизации успевает развиться до

полных взаимно соприкасающихся зерен. При этом сурьма не успевает развиться до размеров нормального зерна и остается, главным образом, в виде недоразвившихся осей дендритов в форме мелких пластинок. Такая форма кристаллизации сурьмы и отсутствие возможности для развития ее крупных зерен объясняется тем, что затвердевание обоих металлов идет одновременно, при одной температуре, когда больший объем занимают кристаллы свинца, препятствующие росту и развитию кристаллов сурьмы.

Доэвтектические сплавы, содержащие менее 13 % Sb, имеют в своей структуре кристаллы избыточного свинца, в виде дендритных образований и эвтектику.

Следовательно, свинец в структуре этих сплавов присутствует в двух структурных разновидностях: крупных кристаллических образований в виде дендритов и более мелких кристалликов, имеющих форму пластин и входящих в состав структур эвтектики.

Структура эвтектических сплавов отличается тем, что в ней в качестве избыточного компонента в первую очередь кристаллизуется сурьма: в структуре этих сплавов избыточная сурьма представлена в виде светлых и крупных по размеру кристаллических образований. Между этими кристаллами сурьмы расположена эвтектика

Таким образом, все свинцово-сурьмянистые сплавы, независимо от их концентрации, имеют в структуре эвтектику. Однако, количество эвтектики в сплавах неодинаково и меняется в зависимости от концентрации компонентов. В структуре сплава (13 % Sb и 87 % Pb) находится 100 % эвтектики.

### **Методика проведения работы**

1. Металлографический микроскоп настраивается на требуемое увеличение.

2. На предметный столик металлографического микроскопа устанавливаются последовательно микрошлифы из коллекции свинцово-сурьмянистых сплавов.

3. Изучается микроструктура каждого шлифа и определяется количественное соотношение структурных составляющих. 4. Производится зарисовка микроструктур.

### **Порядок оформления отчета**

В отчете приводится:

1. Цель работы и задания по ее выполнению.
2. Оптическая схема металлографического микроскопа.
3. Краткое описание методики изготовления шлифов.
4. Рисунки микроструктур трех типичных сплавов: доэвтектического, эвтектического, заэвтектического с указанием их химического состава, количества эвтектики и первичных кристаллов свинца или сурьмы.
5. Диаграмма состояния сплавов Pb- Sb.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4**

### **ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ И МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ В РАВНОВЕСНОМ СОСТОЯНИИ**

#### **Цель работы**

1. Ознакомиться с диаграммой состояния железоуглеродистых сплавов и изучить природу превращений в углеродистых сталях при медленном непрерывном охлаждении.
2. Изучить микроструктуру углеродистых сталей в равновесном состоянии.
3. Изучить влияние содержания углерода на механические свойства медленно-охлажденных сталей.

#### **Задание**

1. Построить диаграмму состояния системы Fe-Fe<sub>3</sub>C.
2. Построить кривую охлаждения для сплава с содержанием углерода, указанным преподавателем.

3. Исследовать с использованием микроскопа контрольные шлифы сталей, определить их фазовый состав, структуру и примерное содержание углерода. Зарисовать микроструктуры исследованных сталей.

### Основные сведения

Принципиально важным для железо-углеродистых сплавов является то, что основной компонент - железо существует в двух аллотропических модификациях: объемноцентрированного куба ( $Fe_{\square}$ ) и гранецентрированного куба ( $Fe_{\square}$ ). Из кривой охлаждения чистого железа (рис.1) видно, что  $Fe_{\square}$  существует в двух интервалах температур: ниже  $911^{\circ}C$  и от  $1392$  до  $1539^{\circ}C$ . Достигнув при охлаждении температуры  $1392^{\circ}C$ ,  $Fe_{\square}$  претерпевает аллотропическое превращение, в процессе которого кристаллическая решетка объемноцентрированного куба при постоянной температуре перестраивается в решетку гранецентрированного куба  $Fe_{\square}$ . Второе аллотропическое превращение в процессе охлаждения происходит при температуре  $911^{\circ}C$ , когда  $Fe_{\square}$  (решетка гранецентрированного куба) перестраивается в объемноцентрированную кубическую решетку  $Fe_{\square}$ .

При температуре  $768^{\circ}C$ , называемой точкой Кюри, железо испытывает магнитное превращение: ниже  $768^{\circ}C$  железо становится магнитным. Магнитное превращение есть особый вид превращения и имеет ряд особенностей, отличающих его от аллотропического превращения.

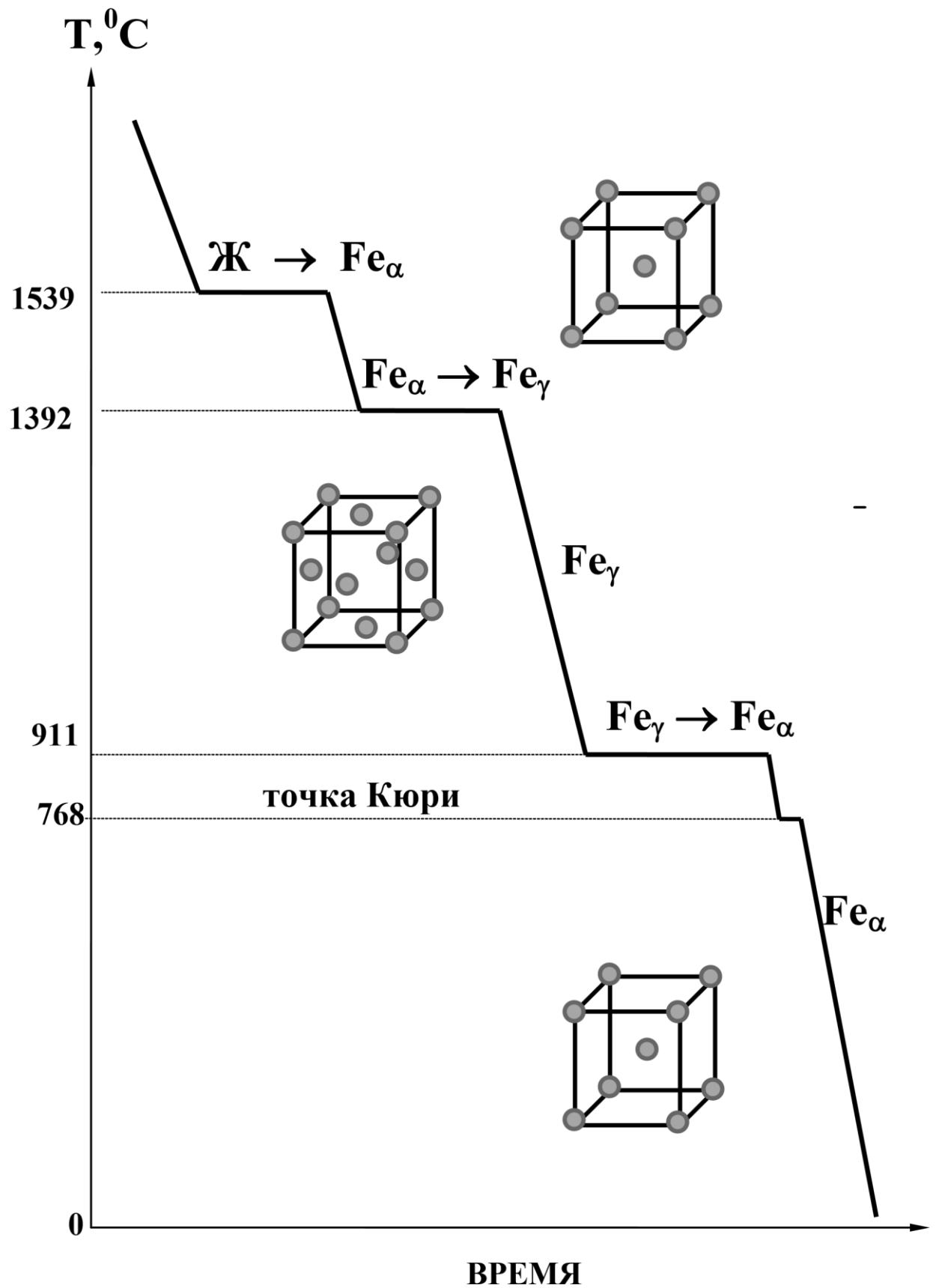


Рис. 1 Кривая охлаждения чистого железа

Железо с углеродом образует твердые растворы внедрения и химические соединения.

В зависимости от содержания углерода железо-углеродистые сплавы делятся на два класса: стали и чугуны.

Сталями называются сплавы, содержащие до 2,14% углерода. Чугуны имеют в своем составе от 2,14 до 6,67% углерода.

В зависимости от содержания углерода и структуры сталей различают:

- техническое железо - сплавы, содержащие до 0,02% углерода.
- доэвтектоидные стали - сплавы, содержащие от 0,02 до 0,8% углерода,
- эвтектоидные стали - сплавы, содержащие 0,8% углерода, -
- заэвтектоидные стали - сплавы, содержащие от 0,8 до 2,14% углерода.

### **Первичная и вторичная кристаллизация стали**

При изучении превращений в железо-углеродистых сплавах в процессе медленного охлаждения и их микроструктуры в равновесном состоянии пользуются диаграммой состояния "железо-цементит" (рис.2), основы для разработки которой были впервые даны Д.К.Черновым в 1886 г.

Диаграмма состояния "железо-цементит", как и другие диаграммы состояния для двухкомпонентных систем, построена в координатах "температура-концентрация углерода в %". Максимальная концентрация углерода на диаграмме состояния составляет 6,67 %, что соответствует 100% цементита.

Первичная кристаллизация - это переход металла из жидкого состояния в твердое, т.е. процесс образования твердых кристаллов непосредственно из жидкого расплава.

Для углеродистых сталей этот процесс начинается при охлаждении, когда температура достигает значений, соответствующих линии ABC, и заканчивается на линии HJE. После окончания первичной кристаллизации и достижения температуры, соответствующей линии HJE, сталь, независимо от содержания в ней углерода, имеет полиэдрическую структуру аустенита, который при дальнейшем медленном охлаждении сохраняется до линии GS — в доэвтектоидных сталях и до линии SE - в заэвтектоидных.

В отличие от первичной кристаллизации процесс выделения вторичных кристаллов из твердой фазы носит название вторичной кристаллизации.

Сущность вторичной кристаллизации для углеродистых сталей состоит в распаде аустенита при охлаждении стали и образовании новых фаз: феррита и цементита.

Вторичная кристаллизация в доэвтектоидных сталях начинается выделением феррита при достижении уровня температур при охлаждении, соответствующих линии GS. Из диаграммы состояния видно, что температура начала вторичной кристаллизации не постоянна. В доэвтектоидных сталях она понижается с увеличением содержания углерода.





В области GSP структура состоит из двух фаз: аустенита и феррита. По мере охлаждения от линии GS к линии PS количество феррита постепенно увеличивается, а количество аустенита уменьшается; при этом в оставшемся аустените концентрация углерода увеличивается по линии GS в направлении к точке S и достигнет 0,8 % при 727°C (линия PS).

При охлаждении заэвтектоидных сталей из аустенита по линии ES начинает выделяться вторичный цементит. При дальнейшем охлаждении между линиями ES и SK структура стали состоит из аустенита и вторичного цементита, количество которого непрерывно возрастает. Охлаждаясь, аустенит обедняется углеродом и достигает эвтектоидного состава (0,8 %C) при температуре 727° C (линия SK).

Таким образом в доэвтектоидных, эвтектоидных и заэвтектоидных сталях при температуре 727°C аустенит содержит 0,8 %C и распадается при постоянной температуре на две фазы: феррит и цементит:



а структура образующейся механической смеси называется **перлитом**.

### **Структура углеродистой стали в равновесном состоянии**

Согласно диаграмме состояния сплавы, содержащие до 0,01% углерода, являются однофазными сплавами и имеют структуру чистого феррита. При содержании углерода от 0,01% до 0,02% структура сплавов состоит из феррита и третичного цементита, выделяющегося из феррита по линии PQ. Ввиду очень малого количества третичного цементита в структуре он обычно не наблюдается.

Структура доэвтектоидной стали, содержащей углерода более 0,02 %, состоит из феррита и перлита. С увеличением содержания углерода количество перлита увеличивается, а количество феррита уменьшается.

В доэвтектоидных сталях по микроструктуре можно с достаточной точностью определить содержание углерода, считая, что весь углерод находится в перлите. Для определения содержания углерода необходимо определить, какую часть поля зрения на шлифе занимают перлитные участки, и умножить полученную величину на 0,8. Например, если 40% всей площади занято перлитом, то

содержание углерода в стали  $40: 100 \times 0,8 = 0,32$  %. Структура эвтектоидной стали - перлит, т.е. механическая смесь двух фаз - феррита и цементита, в которой частицы цементита равномерно распределены в массе феррита. В зависимости от формы выделений цементита различают пластинчатый и зернистый перлит.

Структура заэвтектоидной стали состоит из перлита и вторичного цементита. С увеличением содержания углерода в стали количество вторичного цементита также увеличивается, в заэвтектоидной стали вторичный цементит выделяется главным образом в виде тонкой сетки по границам зерен перлита. При обычном травлении четырехпроцентным раствором азотной кислоты в спирте цементитная сетка имеет такую же светлую окраску, как и ферритная сетка в доэвтектоидных сталях. Для того, чтобы в сомнительных случаях убедиться, что включениями является цементит, шлиф заново полируется и подвергается травлению специальным раствором пикрата натрия, который окрашивает в темный цвет цементит и не окрашивает феррит.

### **Механические свойства медленноохлажденных сталей**

Увеличение содержания углерода приводит к увеличению перлита в структуре доэвтектоидных сталей и вторичного цементита в структуре заэвтектоидных сталей.

Таким образом, с увеличением содержания углерода в структуре медленноохлажденных сталей количество цементита в них увеличивается, а количество феррита уменьшается. Такие изменения в структуре стали приводят к изменению ее механических свойств. Феррит имеет невысокую прочность ( $\sigma \approx 250$  МПа), небольшую твердость (НВ  $\approx 80$ ) и высокую пластичность ( $\delta \approx 50\%$ ). Цементит имеет высокую твердость (НВ  $\approx 800$ ) и практически не обладает пластическими свойствами.

На рис.3 приведены зависимости механических свойств горячекатаной стали, для которой окончательное формирование структуры, а следовательно и свойств, определяется относительно медленным охлаждением после горячей прокатки, от содержания углерода. Приведенные значения механических свойств являются осредненными и могут колебаться в пределах 10 % в зависимости от условий охлаждения после прокатки, содержания примесей и др.

Из приведенных зависимостей видно, что с увеличением содержания углерода в медленноохлажденной стали ее твердость и прочность возрастают, а пластичность (относительное удлинение и относительное сужение) – понижается.

Понижение предела прочности при увеличении содержания углерода выше 1% связано с появлением в структуре стали хрупкой сетки вторичного цементита по границам зерен перлита.

### **Порядок оформления отчета**

В отчете приводятся:

1. Цель работы и задание по ее выполнению.
2. Кривая охлаждения для стали с заданной концентрацией углерода.
3. Рисунки микроструктур - доэвтектоидной, эвтектоидной и заэвтектоидной углеродистой стали и их анализ.

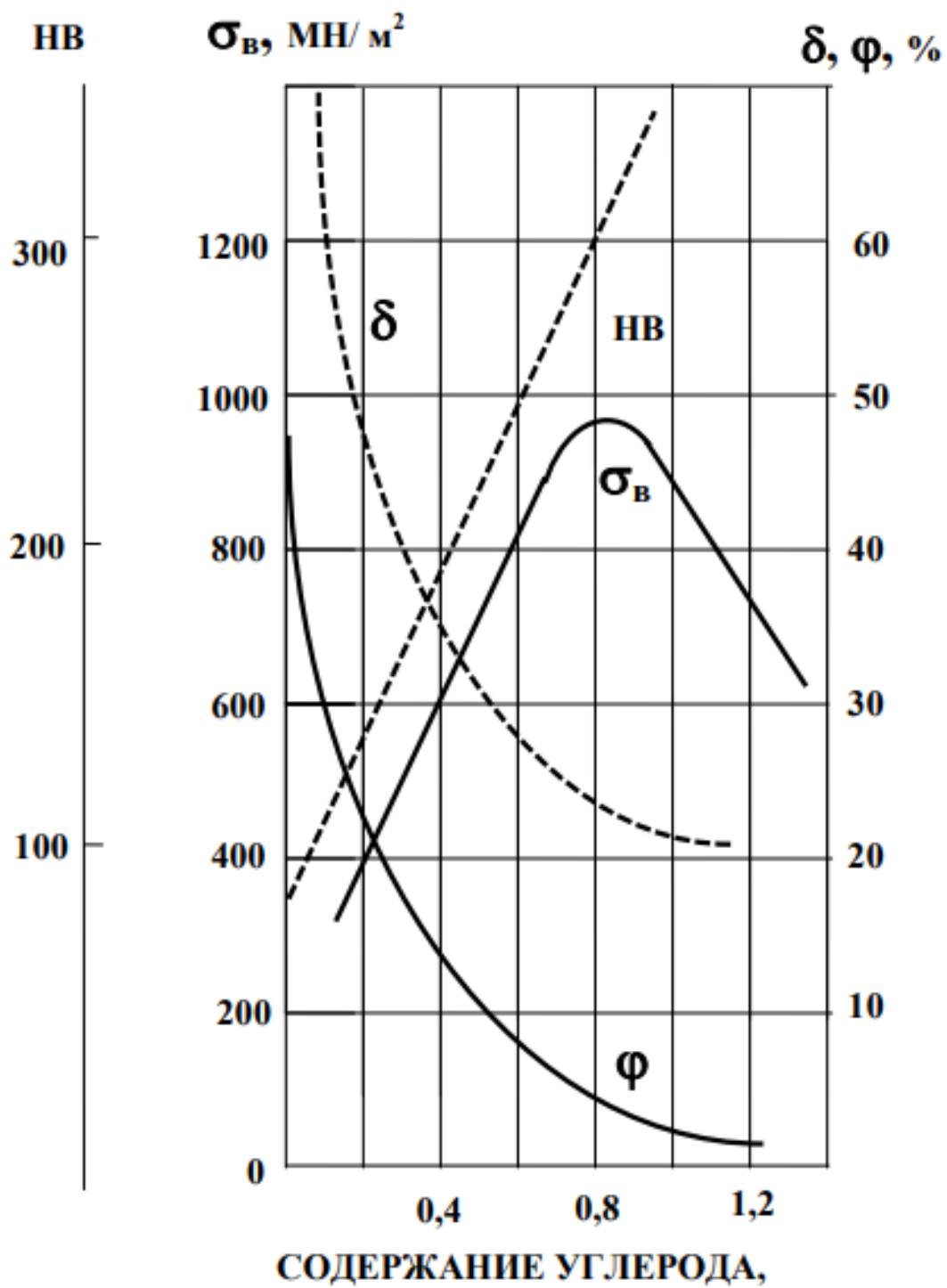


Рис. 3. Влияние содержания углерода на механические свойства стали.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА N 5

### МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ И СВОЙСТВА ЧУГУНОВ

#### Задание

1. Построить кривую охлаждения для белых чугунов с содержанием углерода, указанным преподавателем.
2. Исследовать с использованием микроскопа шлифы белых, серых, ковких и высокопрочных чугунов. Зарисовать микроструктуры исследованных чугунов.

#### Основные сведения

В зависимости от количества и формы выделившегося углерода (зависящей от скорости охлаждения, содержания примесей и последующей обработки) чугуны подразделяются на белые, серые, ковкие и высокопрочные.

#### Белые чугуны

Белым называется чугун, в котором при нормальной температуре практически весь углерод\* находится в связанном состоянии в виде цементита. Такой чугун в изломе имеет белый цвет.

Первичная кристаллизация белых чугунов начинается на линии BCD. Согласно диаграмме состояния различают доэвтектические ( $C < 4,32 \%$ ), эвтектические ( $C = 4,32 \%$ ) и заэвтектические ( $C > 4,32 \%$ ) белые чугуны. В доэвтектических чугунах ниже линии BC из жидкого расплава выделяются кристаллы аустенита, в заэвтектических - кристаллы цементита первичного, образующегося при первичной кристаллизации.

При уменьшении температуры в доэвтектических чугунах возрастает количество образовавшегося аустенита, а в заэвтектических - цементита. В связи с этим концентрация углерода в жидкой фазе доэвтектических чугунов растет, а заэвтектических - снижается.

На линии ECF (температура  $1147^\circ\text{C}$ ) содержание углерода в жидкой фазе чугунов становится равным  $4,32 \%$ . При этой температуре из жидкой фазы одновременно образуются кристаллы аустенита и цементита - происходит эвтектическое превращение.



Структура механической смеси аустенита и цементита, содержащей 4,32 %С, называется ледебуритом (Л).

Таким образом, в момент окончания первичной кристаллизации структура доэвтектических чугунов будет **А + Л**, эвтектических - **Л**, а заэвтектических - **Ц<sub>1</sub> + Л**.

Вторичная кристаллизация в чугунах на линии PSK по своему механизму аналогична вторичной кристаллизации в сталях и сводится к распаду аустенита на феррито-цементитную смесь.

---

\* Небольшое количество (примерно 0,02%) углерода находится в феррите - одной из фаз в структуре белого чугуна.

Поэтому ниже линии PSK (727°С) структура доэвтектических чугунов будет **Л<sub>пр</sub> + П + Ц**, эвтектических - **Л<sub>пр</sub>**, а заэвтектических - **Л<sub>пр</sub> + Ц<sub>1</sub>**.

Ледебурит превращенный (Л<sub>пр</sub>), в отличие от ледебурита, состоит из смеси перлита и цементита, также содержащей 4,32 % С. Вторичный цементит, выделяющийся из зерен аустенита при охлаждении сплава от 1147<sup>0</sup> до 727<sup>0</sup>С обычно сливается с цементитом ледебурита.

Белый чугун, в структуре которого в большом количестве присутствует цементит, является очень твердым и хрупким сплавом, поэтому он не находит непосредственного применения в качестве конструкционного материала. Этот чугун используется в металлургии для передела в сталь и в небольшом количестве - для получения ковкого чугуна.

### **Серые чугуны**

Серым называется чугун, в котором практически весь углерод или большая его часть находится в виде графита, имеющего форму тонких пластинок (чешуек), в связанном состоянии (в форме цементита) углерода содержится не более 0,8%.

Вследствие большого количества графита в структуре такой чугун в изломе имеет серый цвет.

Содержание углерода в серых чугунах обычно колеблется в пределах от 2,9 до 3,7%.

В зависимости от структуры металлической основы различают:

- ферритный чугун, в котором углерода в связанном состоянии (в феррите) около 0,02%, а остальной - в виде графита;
- феррито-перлитный, в котором углерода в связанном состоянии (в феррите и цементите) до 0,8%, а остальной - в виде графита;
- перлитный, в котором углерода в связанном состоянии 0,8% (в феррите и цементите), а остальной - в виде графита.

Структура металлической основы, а также количество, размеры и форма графита в сером чугуне зависят от его химического состава и технологии получения отливок. При этом наиболее важное значение имеет содержание углерода, кремния, марганца и скорость охлаждения отливок,

Серый чугун - дешевый и недефицитный, типичный литейный сплав - находит широкое применение в машиностроении для изготовления литых деталей. Он обладает очень хорошими литейными свойствами (малая усадка, хорошая жидкотекучесть, относительно невысокая температура плавления), легко обрабатывается режущим инструментом.

Механические свойства серого чугуна зависят от структуры его металлической основы и, в значительной мере, определяются количеством, формой и размерами графитовых включений,

В связи с низкой механической прочностью графита пластинчатая форма его включений в сером чугуне невыгодна. Уже при невысоких напряжениях растяжения около пластинок с острыми краями в материале возникает значительная местная концентрация напряжений, причем ввиду резко выраженной объемности напряженного состояния возможность пластической деформации металла будет практически исключена.

Поэтому относительное удлинение и ударная вязкость серых чугунов близки к нулю (табл.).

### **Ковкий чугун**

Чугун с хлопьевидными включениями графита в практике называют ковким чугуном. Название "ковкий чугун" является условным, поскольку заготовки изделий из него, как и из любого другого чугуна, изготавливают не ковкой, а



отливкой. Вместе с тем этот чугун обладает более высокими по сравнению с серым чугуном пластическими свойствами.

Принципиальная схема технологии получения деталей из ковкого чугуна состоит из двух операций. Сначала путем отливки получают детали из белого доэвтектического чугуна (2,5 ... 3,3 % С), структура которого состоит из перлита и ледебурита. Затем полученные отливки подвергают отжигу, в процессе которого цементит, входящий в состав ледебурита и перлита, распадается на феррит и графит (углерод отжига).

В зависимости от степени распада цементита, определяемого условиями проведения отжига, структура металлической основы ковкого чугуна может быть:

- феррит - при полном распаде цементита, входящего в перлит и ледебурит,
- феррит + перлит или перлит - при частичном распаде цементита, входящего только в ледебурит.

Хлопьевидная форма графита является основной причиной более высокой прочности и пластичности ковкого чугуна по сравнению с серым чугуном (табл.) из-за менее резко выраженной объемности напряженного состояния вблизи концентратора напряжений - полости, занятой включением графита.

Несмотря на высокие механические свойства ковкого чугуна, применение его ограничено из-за толщины отливок, которая бывает не более 50 мм.

### **Высокопрочный (модифицированный) чугун**

Чугун с шаровидным графитом называется высокопрочным чугуном. Операция модифицирования заключается в том, что перед разливкой в литейные формы в ковш вводят небольшие добавки, называемые модификаторами, которые оказывают сильное влияние на процесс кристаллизации. Для модифицирования чугуна применяется ферросилиций, алюминий, но лучшим модификатором считается магний, при введении которого (около 0,5%) в жидкий чугун выделяющийся графит приобретает шаровидную форму.

Включения шарообразной формы не вызывают значительной не-

равномерности в распределении напряжений, и следовательно, такого сильного снижения пластичности, как пластинчатые включения с острыми краями.

Структура металлической основы модифицированного высокопрочного чугуна может быть:

- ферритной;
- феррито-перлитной; - перлитной.

В чугуне, модифицированном магнием и имеющем ферритную основу, предел прочности временное сопротивление при растяжении может превышать 400 МПа, а относительное удлинение составляет около 15 %. В перлитном высокопрочном чугуне предел прочности при растяжении превышает 600 МПа. а относительное удлинение 3 % (табл.).

Таблица

**Механические свойства чугунов**

Характеристика механических свойств	Серый чугун <sup>x</sup> (с пластинчатым графитом) ГОСТ 1412-85		Ковкий чугун (с хлопьевидным графитом) ГОСТ 1215-79		Высокопрочный чугун (с шаровидным графитом) ГОСТ 7293-85		
	Феррит- ный	Перлит- ный	Феррит- ный	Перлит- ный	Феррит- ный	Феррит- ный	Перлит- ный
	СЧ15	СЧ350	КЧ35	КЧ40	ВЧ35	ВЧ40	ВЧ60
Минимальное временное сопротивление при растяжении, МПа	150	350	350	400	350	400	600
Относительное удлинение, %			10	3	22	15	3
Твердость по Бринеллю, НВ	210	275	149	201	140-170	140-202	192-277

x При толщине стенки отливки 15 мм.

Из магниевого высокопрочного чугуна можно получать отливки любых размеров, так как форма и распределение графита не зависят от скорости охлаждения отливок.

## Порядок оформления отчета

В отчете приводятся:

1. Цель работы и задание по ее выполнению.
2. Кривая охлаждения для белого чугуна с заданной концентрацией углерода.
3. Рисунки микроструктур доэвтектического, эвтектического и заэвтектического белых чугунов, серого, ковкого и высокопрочного чугунов с различной структурой металлической основы. Анализ изученных микроструктур.

#### Используемые источники:

1. Лахтин, Ю. М. Материаловедение : учебник / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Машиностроение, 1990. - 528 с. : ил. - (Для вузов). - Библиогр.: с. 520. - Предм. указ.: с. 521. - ISBN 5-217-00858-X
2. Материаловедение и технология материалов : учебное пособие / Под ред. А. И. Батышева, А. А. Смолькина. - М. : ИНФРА-М, 2013. - 288 с. : ил. - (Высшее образование: Бакалавриат). - Рек.: НМО. - Библиогр.: с. 285. - ISBN 978-5-16-004821-5
3. Горелик, С. С. Материаловедение полупроводников и металловедение : учебное пособие / С. С. Горелик, М. Я. Дашевский. - М. : Металлургия, 1973. - 496 с. : ил. - Мин- во высш. и сред. спец. образования СССР. - Библиогр.: с. 495
4. Научные основы материаловедения : учебник / под ред. Б. Н. Арзамасова. - М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1994. - 366 с. : ил. - ISBN 5-7038-1104-X

#### Интернет-ресурсы:

1. <http://window.edu.ru/> – Единое окно доступа к образовательным ресурсам.
2. [www.biblioclub.ru](http://www.biblioclub.ru) – Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека онлайн».
3. [www.e.lanbook.com](http://www.e.lanbook.com) – Электронно-библиотечная система «Лань»
4. [catalog.ncstu.ru](http://catalog.ncstu.ru) – Электронный каталог фолиант СКФУ
5. [www.library.stavsu.ru](http://www.library.stavsu.ru) – Электронная библиотека и электронный каталог научной библиотеки СКФУ

*МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ*

по выполнению лабораторных работ  
по дисциплине «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»  
для студентов направления подготовки

15.03.02 Технологические машины и оборудование

*Составители*

*Е.Н. Павленко, к.т.н., доцент*

*Отв. редактор*

*Д.В. Казаков, к.т.н., доцент*

Редактор Л.Д. Бородастова

---

Подписано в печать 10.04.2016 г.

Формат 60 × 84 1/16

Уч.-изд. л. 0,4 п.л. Усл. печ. л. 0,5 п.л.

Тираж 50 экз.

Северо-Кавказский федеральный университет

---

Невинномысский технологический институт (филиал)

357108, г. Невинномысск, ул. Гагарина, 1

---