

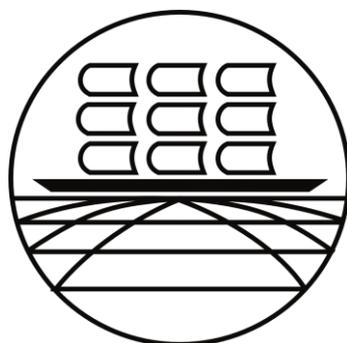
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
(ФГБОУ ВО «МГТУ»)  
«ММРК имени И.И. Месяцева» ФГБОУ ВО «МГТУ»

УТВЕРЖДАЮ  
Начальник ММРК им.И.И. Месяцева  
ФГБОУ ВО МГТУ

\_\_\_\_\_ И.В. Артеменко  
*подпись*

\_\_\_\_\_ 2020 г.  
*дата*



**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ**

Учебной дисциплины: ОП 04 Материаловедение

программы подготовки специалистов среднего звена (ППССЗ)

Специальность: 26.02.05 Эксплуатация судовых энергетических установок  
15.02.06 Монтаж и техническая эксплуатация холодильно-компрессорных машин и установок

по программе базовой подготовки  
форма обучения: очная

Мурманск  
2020

## Методические указания

Выполнение согласно заданиям в каждой работе. Если приводиться вариант, номер выбирается по списку группы в учебном журнале. Готовая работа сдается на проверку в распечатанном виде. После проверки выдаются дополнительные задания для проверки усвоенного материала.

### Практическая работа № 1

**Тема практической работы: Определение твердости металлов способами Бринелля и Роквелла**

#### Цель работы:

1. Изучить методику определения твердости металлов методом вдавливания.
2. Дать ответы на вопросы.

#### Содержание и порядок выполнения

##### Определение твердости прибором Бринелля

Испытание производится вдавливанием стального шарика определенного диаметра в испытываемый образец под действием заданной нагрузки в течение некоторого времени.

В результате на поверхности исследуемого образца образуется отпечаток – лунка.

Твердость по Бринеллю измеряется отношением приложенной нагрузки  $P$  (кгс или Н) к поверхности полученного отпечатка (шарового сегмента)  $F$  (мм<sup>2</sup>) и обозначается  $HB$ :

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

##### Подготовка образца

Для получения отпечатка с четкими краями образец перед испытанием обрабатывают наждачным камнем или напильником для того, чтобы поверхность была ровной и гладкой, не было окалины или других дефектов.

##### Подготовка прибора и проведение испытания

Испытания проводят следующим образом. В соответствии с таблицей 1 выбирают условия испытания (нагрузку, диаметр шарика). Устанавливают образец на предметный столик и поворачивая маховик по часовой стрелке поднимают до соприкосновения с шариком, пока шарик не будет плотно прижат к образцу (при этом создается предварительная нагрузка усилием 100Н). Нажатием на кнопку включают электродвигатель. После автоматического отключения электродвигателя, поворачивая маховик против часовой стрелки, опускают столик и снимают образец. В результате вдавливания в образце остается отпечаток – лунка. Диаметр отпечатка измеряют и по измеренному значению определяют по таблице 2 твердость по Бринеллю.

Таблица 1

Толщина испытываемого образца, мм	Диаметр шарика, мм	Нагрузка, кгс		
		Сталь, чугун 30D <sup>2</sup>	Медные сплавы 10D <sup>2</sup>	Олово, свинец 2,5D <sup>2</sup>
Более 6	10	3000	1000	250
3-6	5	750	250	62,5
1,6-3	2,5	187,5	62,5	15,6
1,3-1,6	2	120	40	10
0,6-1,3	1	30	10	2,5

Таблица 2  
 Определение числа твердости НВ (ГОСТ 9012)

Диаметр отпечатка, d, мм	Число твердости по Бринеллю при нагрузке Р (кгс), равной			Диаметр отпечатка, d, мм	Число твердости по Бринеллю при нагрузке Р (кгс), равной		
	30D <sup>2</sup>	10D <sup>2</sup>	2,5D <sup>2</sup>		30D <sup>2</sup>	10D <sup>2</sup>	2,5D <sup>2</sup>
2,90	444	-	-	4,45	183	60,9	15,2
2,95	429	-	-	4,50	179	59,5	14,9
3,00	415	-	34,6	4,55	174	58,1	14,5
3,05	401	-	33,4	4,60	170	56,8	14,2
3,10	388	129	32,3	4,65	167	55,5	13,9
3,15	375	125	31,3	4,70	163	54,3	13,6
3,20	363	121	30,3	4,75	159	53	13,3
3,25	352	117	29,3	4,80	156	51,9	13,0
3,30	341	114	28,4	4,85	152	50,7	12,7
3,35	331	110	27,6	4,90	149	49,6	12,4
3,40	321	107	26,7	4,95	146	48,6	12,2
3,45	311	104	25,9	5,00	143	47,5	11,9
3,50	302	101	25,2	5,05	140	46,5	11,6
3,55	293	97,7	24,5	5,10	137	45,5	11,4
3,60	285	95	23,7	5,15	134	44,6	11,2
3,65	277	92,3	23,1	5,20	131	43,7	10,9
3,70	269	89,7	22,4	5,25	128	42,8	10,7
3,75	262	87,2	21,8	5,30	126	41,9	10,5
3,80	255	84,9	21,2	5,35	123	41	10,3
3,85	248	82,6	20,7	5,40	121	40,2	10,1
3,90	241	80,4	20,1	5,45	118	39,4	9,86
3,95	235	78,3	19,6	5,50	116	38,6	9,66
4,00	229	76,3	19,1	5,55	114	37,9	9,46
4,05	223	74,3	18,6	5,60	111	37,1	9,27
4,10	217	72,4	18,1	5,65	109	36,4	9,10
4,15	212	70,6	17,6	5,70	107	35,7	8,93
4,20	207	68,8	17,2	5,75	105	35	8,76
4,25	201	67,1	16,8	5,80	103	34,3	8,59
4,30	197	65,5	16,4	5,85	101	33,7	8,43
4,35	192	63,9	16	5,90	99,2	33,1	8,26
4,40	187	62,4	15,6	5,95	97,3	32,4	8,11

### Определение твердости прибором Роквелла

Испытание производится вдавливанием в испытываемый образец наконечника (стальной или алмазный конус с углом при вершине 120° или стальной шарик диаметром 1,59 мм) под действием заданной нагрузки (600, 1000, 1500 Н).

Число твердости *HR* выражается формулой

$$HR = \frac{K - H}{c}$$

где

*H* – глубина внедрения наконечника под действием общей нагрузки, мм;

*K* – постоянная величина, равная для шарика 0,26 и для конуса 0,2;

*c* – цена деления циферблата индикатора 0,002 мм.

Твердость по Роквеллу – число отвлеченное и выражается в условных единицах.

Каждому условию испытания соответствует шкала А (алмазный конус), В (шарик) или С (стальной конус). Число твердости обозначается HRA, HRB, HRC.

Прибор Роквелла дает возможность испытывать материалы любой твердости (пластичные, твердые, после отжига, закалки, а также тонкие).

### Подготовка образца

Образец перед испытанием обрабатывают наждачным камнем или напильником для того, чтобы поверхность была ровной и гладкой, не было окалины или других дефектов.

### Подготовка прибора и проведение испытания

Нагрузку и наконечник выбирают в зависимости от твердости испытываемого образца согласно таблице 3.

Таблица 3

Примерная твердость, HB	Шкала	Наконечник	Нагрузка, Н	Обозначение твердости
60-230	B	Стальной шарик	1000	HRB
230-700	C	Стальной конус	1500	HRC
Свыше 700	A	Алмазный конус	600	HRA

Перемещением тумблера в верхнее положение включить прибор. Установить образец на предметный столик и поворотом маховика по часовой стрелке вдавливать наконечник в образец, пока малая стрелка на циферблате индикатора не примет вертикальное положение, указанное красной точкой. Это означает, что наконечник вдавился в образец под действием предварительной нагрузки, равной 100 Н. Установить большую стрелку индикатора на «0» по черной шкале. После этого нажатием на педаль привода прибора сообщить испытываемому образцу основную нагрузку. Время приложения основной нагрузки 5-7 с. Цифра на шкале циферблата, на которую указывает большая стрелка, и есть число твердости. Показание единицы твердости записывают и поворачивая маховик против часовой стрелки, опускают столик с образцом, снимая нагрузку. Затем прибор выключают, если не требуется повторных испытаний.

### Задания:

1. Изучить способы определения твердости, методом вдавливания.
2. Дать ответы на вопросы

### Вопросы для самоконтроля

1. Что такое твердость?
2. В чем заключается испытание на твердость?
3. В чем сущность метода Бринелля?
4. Как производится измерение твердости на приборе Бринелля?
5. В чем сущность метода Роквелла?
6. Как производятся измерения твердости на приборе Роквелла?
7. Перечислить механические свойства сплавов.
8. Дать определение твердости, прочности, пластичности, вязкости.
9. По какой формуле определяется относительное удлинение и сужение?
10. Что понимают под временным сопротивлением на разрыв?
11. Что понимают под пределом текучести?
12. Почему величина твердости измеренная на приборе Роквелла - безразмерная?

## Практическая работа № 2

**Тема практической работы:** Изучение диаграмм состояния двухкомпонентных систем.

### Цель работы:

1. Ознакомиться с методикой построения диаграмм состояния двухкомпонентных сплавов.
2. Изучить изменение свойств сплавов в зависимости от изменения концентрации компонентов для основных типов диаграмм состояния.

### Содержание и порядок выполнения

#### Понятие о диаграммах состояния

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, выделяемых 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, т.к. 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 или 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 процесс перераспределения 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 и металла-растворителя. Это важный момент, определяющий изменение свойств твердого раствора.

Химическое соединение чаще всего образуется между элементами, расположенными далеко друг от друга в таблице Л.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 (диссоциации). Как правило, химические соединения обладают большой твердостью и очень хрупки.

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

Диаграммы состояния показывают равновесные, стойкие состояния т.е. такие, которые при данных условиях обладают минимальной свободной энергией. Они имеют большое теоретическое и практическое значение, т.к. 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, подчиняют систему 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 диаграммы 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 (твердый).

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.

### **Задания:**

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

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Что такое сплав, компонент, фаза, система сплавов, диаграмма?
2. Основные типы сплавов, образуемые при взаимодействии компонентов.
3. Основные типы диаграмм равновесного состояния.
4. Правило фаз и правило отрезков.
5. Что называется критическими точками?
6. Основные методы построения диаграммы состояния.
7. Принцип построения кривых охлаждения и диаграмм состояния систем сплавов.
8. Что такое ликвидус, солидус?
9. Дать определение эвтектики и эвтектической реакции.
10. Дать определение эвтектическому, доэвтектическому и заэвтектическому сплавам.
11. Особенности кристаллизации эвтектического сплава и сплава твердого раствора.
12. Построение кривых охлаждения с применением имеющейся диаграммы и правил отрезков и фаз.

## Практическая работа № 3

### Тема практической работы: Анализ диаграммы состояния сплавов железо-цементит

#### Цель работы:

1. Изучить диаграмму состояния железо – цементит.
2. Научиться строить кривые охлаждения для любого сплава.

#### Содержание и порядок выполнения

##### Краткие теоретические сведения

Диаграммы состояния представляет собой графическое изображение фазового состояние сплавов, в зависимости от температуры и концентрации компонентов. Диаграммы состояния строят для условий равновесия, т.е. такого состояние сплавов, которое достигается при очень малых скоростях охлаждения или длительном нагреве.

К системе железоуглеродистых сплавов относятся стали и чугуны, для изучения которых в равновесном состоянии пользуются диаграммой состояния.

Диаграмма рассматривается только до содержания углерода 6,67 %, т.к. сплавы с большим содержанием углерода не имеют практического применения, вследствие высокой твердости и хрупкости.

Если основными компонентами диаграммы состояния являются железо и цементит (химическое соединение  $Fe_3C$ ) то такую диаграмму называют цементитной (метастабильной).

Равновесными фазами в системе железо - цементит являются:

феррит (Ф), аустенит (А), цементит (Ц), жидкость (Ж).

1. Феррит (Ф) - твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе. Максимальное содержание углерода в феррите при температуре  $727^\circ C$  составляет 0,02 %. Феррит имеет незначительную твердость 60-100 НВ и прочность ( $\sigma_B = 250 \text{ Н/мм}^2$ ), но высокую пластичность ( $\delta = 50 \%$ )

2. Аустенит (А) - твердый раствор углерода в  $\gamma$ -железе. Максимальное содержание углерода в аустените при температуре  $1147^\circ C$  составляет 2,14 % и 0,8 % - при температуре  $727^\circ C$ . Аустенит имеет кристаллическую решетку гранцентрированного куба, немагнитен. Твердость аустенита 160 — 220 НВ, пластичность довольно высокая:  $\delta = 40-50 \%$ .

3. Цементит (Ц) - химическое соединение железа с углеродом (карбид железа  $Fe_3C$ ). В цементите содержится 6,67 % углерода. Температура плавления цементита около  $1250^\circ C$ . Цементит очень тверд (800 НВ), хрупок и практически не обладает пластичностью. Цементит неустойчив и в определенных условиях распадается, выделяя свободный углерод в виде графита по реакции  $Fe_3C = 3 Fe + C$

4. Жидкость (Ж) - раствор углерода в жидком железе с неограниченной растворимостью.

Кроме вышеперечисленных равновесных фаз в системе железоуглеродистых сплавов присутствуют следующие структурные составляющие: графит, перлит, ледебурит.

5. Графит (Г) - это свободный углерод, мягкий (3 НВ), обладает низкой прочностью, в чугунах и графитизированной стали содержится в виде включений различной формы (пластинчатой, шаровидной, хлопьевидной). С изменением формы графитовых включений меняются механические и технологические свойства сплава.

6. Перлит (П) - механическая смесь феррита и цементита (эвтектоид), содержащая 0,8 % углерода. Перлит имеет предел прочности  $\sigma_B = 800 \text{ Н/мм}^2$ , относительное удлинение  $\delta = 15 \%$  и твердость 160 НВ.

7. Ледебурит (Л) - механическая смесь аустенита и цементита первичного (эвтектика), содержащая 4,3 % углерода и образующаяся при кристаллизации жидкого расплава при температуре  $1147^\circ C$ . В процессе дальнейшего охлаждения строение ледебурита меняется: при температуре  $727^\circ C$  ледебурит состоит из перлита и цементита первичного. Ледебурит тверд (600 - 700 НВ) и очень хрупок.

##### Диаграмма состояния железо - цементит

На диаграмме Fe -  $Fe_3C$  точка А ( $1539^\circ C$ ) соответствует температуре плавления чистого железа, а точка D - температуре плавления цементита.

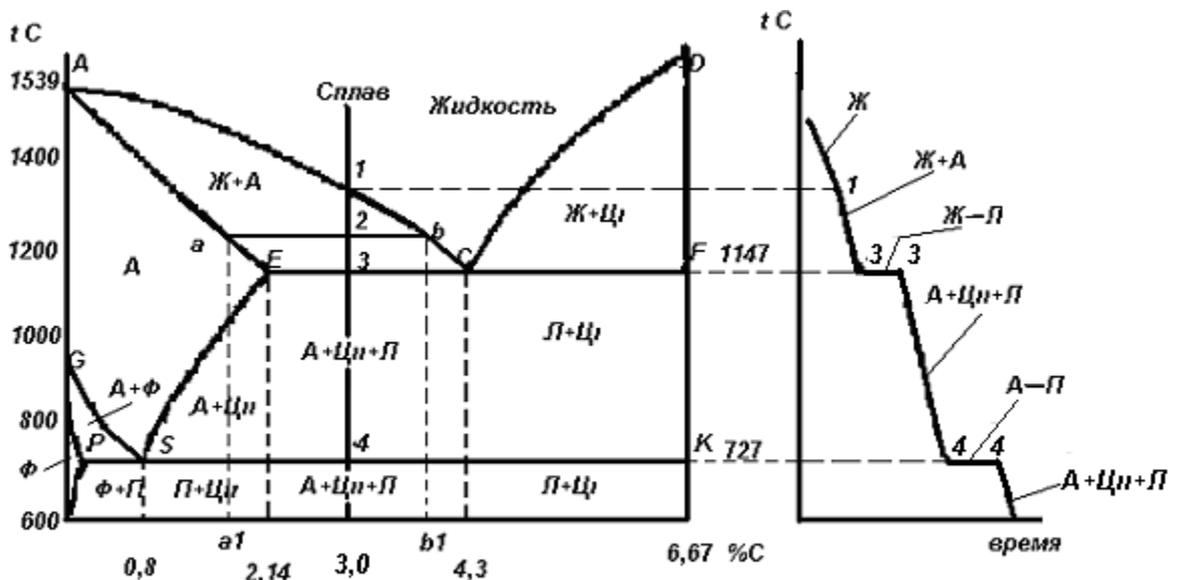
Концентрация углерода в точке Р 0,02 %. Предельное содержание углерода в аустените, при эвтектоидной температуре 727°С (точка S) 0,8 %. При эвтектической температуре 1147°С (точка С) содержание углерода в ледебурите 4,3%.

Линия АСD - линия ликвидуса, соответствующая температуре начала кристаллизации сплава из жидкого состояния.

Линия АЕСF - линия солидуса, соответствует температуре конца кристаллизации сплав.

Линия ЕСF - линия эвтектического превращения. При температуре 1147 °С жидкость точки С распадается на две твердые фазы: аустенит состава точки Е и цементит состава точки F. При этой температуре существует невариантное равновесие (число степеней свободы равно нулю). В равновесии находятся три фазы: аустенит (A<sub>E</sub>), цементит (Ц<sub>F</sub>), жидкость (Ж<sub>C</sub>).

Линия PSK - линия эвтектоидного превращения. При температуре 727°С аустенит точки S распадается на две твердые фазы: феррит состава точки Р и цементит состава точки К. При этой температуре существует невариантное равновесие (число степеней свободы равно нулю). В равновесии находятся три фазы: феррит (Ф<sub>P</sub>) аустенит (A<sub>S</sub>) и цементит (Ц<sub>K</sub>).



*Диаграмма состояния железо - цементит  
и кривая охлаждения для сплава содержащего 3 % углерода*

### Кристаллизация сплавов

Процесс кристаллизации сплава описывается кривой охлаждений, которая строится в координатах температура-время. Рассмотрим кристаллизацию сплавов содержащих от 2,14 до 4,3 % углерода. В качестве примера возьмем сплав который содержит 3 % углерода. Кристаллизация этого сплава начинается при температуре в точке 1. Несколько ниже температуры точки 1 из жидкой фазы начинают выделяться кристаллы аустенита. Сплав становится двухфазным (жидкость и кристаллы аустенита). Число степеней свободы  $S = K - \Phi + I = 2 - 2 + 1 = 1$ ,  $K = 2$  (железо и углерод).

Состав жидкой фазы при понижении температуры меняется по линии ликвидуса АС, а аустенита - по линии АЕ. Процесс кристаллизации закончится при температуре 1147°С соответствующей линии солидуса АЕСF.

При температуре 1147 °С аустенит достигает предельной концентрации, соответствующей точке Е (2,14 % углерода), а жидкость - эвтектического состава точки С (4,3 % углерода). При температуре эвтектики (линия ЕСF) существует невариантное равновесие аустенита состава точки Е (A<sub>E</sub>) и цементита состава точки F (Ц<sub>F</sub>) и жидкой фазы состава точки С (Ж<sub>C</sub>):  $Ж_C \leftrightarrow A_E + Ц_F$  - образуется эвтектика ледебурит. Число степеней свободы  $S = 2 - 3 + 1 = 0$ . На кривой охлаждения при постоянной температуре 1147°С образуется площадка (3-3) которая показывает что для превращения всей жидкости в твердые кристаллы необходимо определенное время.

Несколько ниже температуры точки 3 сплав имеет структуру аустенита, цементита вторичного и ледебурита. Дальнейшее охлаждение сплава до температуры точки 4 не ведет к изменению его структуры. При достижении сплавом температуры 727°C происходит превращение аустенита в перлит. Для полного превращения сплава требуется определенное время которое изображается на кривой охлаждения площадкой 4-4. При этом аустенит состава точки S распадается на две твердые фазы: феррит состава точки P и цементит состава точки K.  $A_S \leftrightarrow F_P + C_K$  - образуется эвтектоид перлит. При наличии трех фаз - феррита, аустенита и цементита - система невариантна, число степеней свободы:  $C = 2 + 3 - 1 = 0$ .

Несколько ниже температуры точки 4 сплав имеет структуру перлита, цементита вторичного и ледебурита (фаз при этом две - феррит и цементит):  $C = 2 - 2 + 1 = 1$ . При дальнейшем охлаждении структура сплава не меняется - идет простое охлаждение сплава.

### Правило отрезков

В процессе кристаллизации сплава меняется не только состав фаз, но и количественное соотношение между ними.

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

В качестве примера возьмем сплав, который содержит 3,0 % углерода.

В точке 2, показывавшей состояние сплава при температуре  $t_2$ , сплав состоит из кристаллов аустенита и жидкости.

Первое положение правила отрезков:

Чтобы определить концентрацию компонентов в фазах, через данную точку, характеризующую состояние сплава, необходимо провести горизонтальную линию до пересечения с линиями, ограничивающими данные фазы; проекции точек пересечения на ось концентрации покажут состав фаз.

Следовательно, для сплава при температуре  $t_2$  состав аустенита определится проекцией точки  $a$  на ось концентрации (точки  $a1$ ), состав жидкости - проекцией точки  $b$  на ось концентраций (точка  $b2$ ). Таким образом, аустенит содержит 1,8 %, а жидкость - 3,9 % углерода.

Для определения количества каждой фазы 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 пропорциональны количествам этих фаз.

Следовательно, если для сплава, содержащего 3,0% углерода (рисунок 3), точка 2 определяет состояние всего сплава, точка  $a$  состав аустенита, точка  $b$  - состав жидкости, то отрезок  $[ab]$  определяет все количество сплава, отрезок  $[a2]$  - количество жидкости, отрезок  $[2b]$  - количество аустенита.

Следовательно, в приведенном примере количество аустенита ( $Q_A$ ) в процентах определяется отношением отрезков:

$$Q_A = \frac{[2b]}{[ab]} \cdot Q_{\text{СПЛ}}$$

Количество жидкости ( $Q_J$ ) определяется отношением отрезков:

$$Q_J = \frac{[a2]}{[ab]} \cdot Q_{\text{СПЛ}}$$

Если общая масса сплава ( $Q_{\text{СПЛ}}$ ) дана в килограммах, то количественное соотношение фаз определяют в килограммах. Если масса дана в процентах, то в процентах.

Отсюда

$$Q_J = \frac{[a2]}{[ab]} \cdot Q_{\text{СПЛ}} = \frac{1,2}{2,1} \cdot 100\% = 56 \%$$

$$Q_A = \frac{[2b]}{[ab]} \cdot Q_{\text{СПЛ}} = \frac{0,9}{2,1} \cdot 100\% = 44 \%$$

Правило отрезков в двойных диаграммах состояния можно применять только в двухфазных областях. В однофазной области имеется лишь одна фаза. Любая точка внутри области характеризует ее концентрацию, а количество данной фазы составляет 100%.

### Задания:

1. Начертить диаграмму состояния железо - цементит с указанием температур фазовых превращений и структурных составляющих в различных областях диаграммы.
2. Построить кривые охлаждения для сплава данной системы (по вариантам).
3. Описать превращения происходящие при охлаждении заданного сплава.
4. Используя правило отрезков, подсчитать весовое количество и концентрацию углерода в фазах, которые присутствуют в исследуемом сплаве.
5. Дать ответы на вопросы.

### Исходные данные для анализа диаграммы состояния железо - цементит.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Содержание углерода, %	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,4	1,6
Интервал темп., °С	1600	750	1300	740	730	1470	1400	1400	1350	1300
	600	100	400	100	200	700	740	750	800	850

Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Содержание углерода, %	1,8	2,4	2,6	2,8	3,0	4,3	4,6	5,0	5,5	6,0
Интервал темп., °С	1000	1200	1200	1200	1200	1200	1150	1200	1200	1200
	600	900	600	850	600	900	800	600	900	600

### Вопросы для самоконтроля

1. Что представляет собой цементит?
2. Что представляет собой перлит?
3. Что представляет собой аустенит?
4. Что представляет собой феррит?
5. Что представляет собой ледебурит?
6. Какие превращения происходят в железоуглеродистых сплавах при охлаждении ниже линии AC?
7. Какие превращения происходят в железоуглеродистых сплавах при охлаждении ниже линии CD?
8. Какие превращения происходят в железоуглеродистых сплавах при охлаждении ниже линии AE?

## Практическая работа № 4

**Тема практической работы:** Термическая обработка углеродистых сталей. Закалка.

### Цель работы:

1. Ознакомится с основными видами термической обработки углеродистых сталей.

### Содержание и порядок выполнения

Термическая обработка заключается в нагреве детали до определенных температур, выдержке при этой температуре и охлаждении с той или иной скоростью. При этом происходит изменение структуры, а следовательно, механических и технологических свойств обрабатываемой детали.

При нагревании и охлаждении в железоуглеродистых сплавах происходят превращения при определенных температурах, называемых критическими точками. При нагревании их принято условно обозначать  $A_{C1}$ ,  $A_{C3}$ ,  $A_{Cm}$ ; при охлаждении -  $A_{r1}$ ,  $A_{r3}$ ,  $A_{rm}$ .

Закалка — это процесс, который заключается в нагреве стали выше критических температур  $A_{C3}$ ,  $A_{C1}$  на 30...50°C, выдержке при этой температуре и последующем быстром охлаждении в воде, масле или других охлаждающих средах. Основная цель закалки — получение высокой твердости и прочности.

Резкое увеличение твердости и прочности в процессе закалки происходит за счет изменения структуры в процессе нагрева и охлаждения, за счет образования неравновесных, твердых структур — мартенсита, троостита и сорбита.

Температура нагрева под закалку зависит от химического состава стали. Доэвтектоидную углеродистую сталь нагревают выше критической температуры  $A_{C3}$  на 30...50°C, а эвтектоидную и заэвтектоидную стали нагревают выше  $A_{C1}$  на 30...50°C. Температура под закалку доэвтектоидной стали изменяется с изменением содержания в стали углерода, температура нагрева заэвтектоидных сталей постоянна и равна 770...780° С.

Нагрев деталей должен быть медленным, чтобы не возникали напряжения и трещины. Время нагрева зависит от химического состава стали, от формы и размеров детали. Время выдержки должно быть достаточным, чтобы весь процесс превращения феррито-цементитной смеси в аустенит полностью завершился. Продолжительность выдержки обычно составляет 25% общего времени нагрева. Скорость охлаждения должна быть такой, чтобы обеспечить получение нужной структуры — мартенсита, троостита или сорбита, т. е. обеспечить необходимые механические свойства обрабатываемой детали.

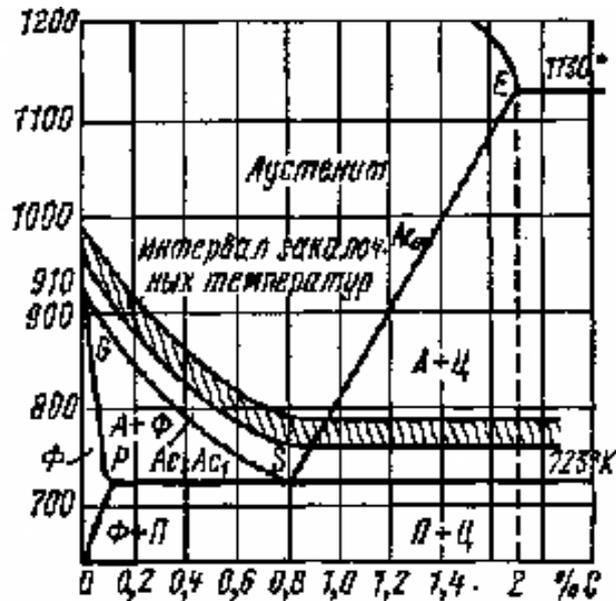
Для успешного проведения термической обработки правильный выбор закалочной среды имеет большое значение. Закалку среднеуглеродистых сталей производят в воде при температуре 18° С, а большинства остальных сталей — в масле.

Превращения в сталях при нагревании носят кристаллизационный характер, т. е. при этом происходит образование центров зародышей и последовательный их рост.

Исходная структура всех сталей представляет собой смесь двух фаз - феррита и цементита.

При медленном нагревании до температуры  $A_{C1}$  (723° С) никаких превращений в стали не происходит. При достижении критической точки  $A_{C3}$  перлит переходит в аустенит.

При дальнейшем нагреве в доэвтектоидных сталях происходит постепенное растворение феррита в аустените, а в заэвтектоидных сталях — растворение вторичного цементита в аустените. При температуре выше линии  $GSE$  стали будут иметь однородную структуру — аустенит.



*Оптимальный интервал закалочных температур стали*

При медленном охлаждении эвтектоидной стали аустенит превращается в перлит (смесь феррита и цементита). Превращение аустенита в перлит происходит диффузионно, углерод, выделяясь из аустенита, образует зародыши цементитовых включений, число которых и последовательный рост зависят от степени переохлаждения. Регулируя степень переохлаждения аустенита, можно получать следующие продукты его распада: а) перлит — крупнозернистую смесь феррита и цементита; б) троостит — мелкозернистую (высокодисперсную) смесь феррита и цементита.



*а б в*

*Структуры семейства перлитов:*

*а — пластинчатый перлит; б — сорбит закалки; в — троостит закалки.*

При больших степенях переохлаждения аустенита диффузионное перемещение углерода практически прекращается и образование цементита становится невозможным. При таких скоростях охлаждения происходит бездиффузионная перестройка решеток  $Fe_\gamma$  в  $Fe_\alpha$  без выделения углерода. Образуется структура мартенсит, которая представляет собой перенасыщенный твердый раствор углерода в  $Fe_\alpha$ .

Наименьшая скорость охлаждения, при которой аустенит превращается в мартенсит, называется критической скоростью закалки. Мартенсит имеет игольчатое строение и высокую твердость (HV 500-650). Мартенситное превращение происходит в интервале температур  $M_n - M_k$  (где  $M_n$  — начало мартенситных превращений;  $M_k$  — конец мартенситных превращений), которые определяются содержанием углерода в стали.

**Задания:**

1. Пользуясь диаграммой железо-цементит, определить для стали марки 30 режим закалки.
2. Зарисовать структуру закаленных образцов стали марки 30.
3. Дать ответы на вопросы.

**Вопросы для самоконтроля**

1. Что такое закалка?
2. Какова цель закалки?
3. Дать определение структурным составляющим после закалки.
4. Как выбрать температуру закалки?
5. Дать понятие закаляемости и прокаливаемости?
6. Какие внутренние напряжения возникают в закаленной стали?
7. Перечислите способы закалки.
8. Какие дефекты возникают при закалке?

## Практическая работа № 5

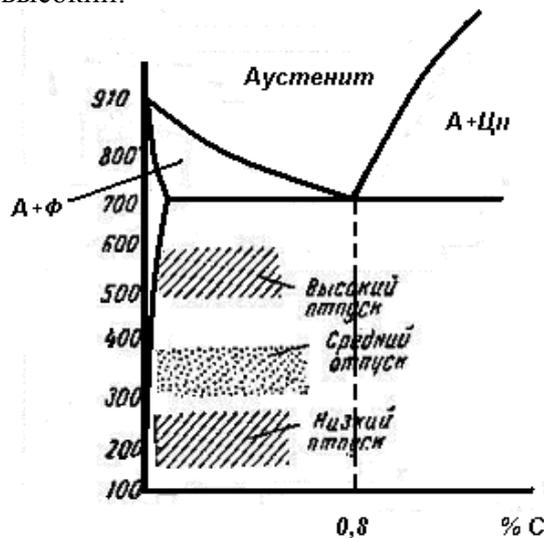
Тема практической работы: Термическая обработка углеродистых сталей. Отпуск.

### Цель работы:

1. Ознакомится с основными видами отпуска углеродистых сталей.

### Содержание и порядок выполнения

Отпуск — это завершающая операция термической обработки, формирующая структуру, а следовательно, и свойства стали. Назначение отпуска — снять внутренние напряжения, возникшие в процессе закалки, и получить необходимую структуру. Процесс отпуска заключается в нагревании стали до температуры ниже  $A_{C1}$ , выдержке при этой температуре и охлаждении. В зависимости от температуры нагрева закаленной детали различают три вида отпуска: низкий, средний и высокий.



Температурные интервалы отпуска стали

Низкий отпуск производится при температурах 150...250°C с целью уменьшения закалочных напряжений при сохранении мартенситной структуры. Твердость детали после низкого отпуска почти не изменяется. Низкий отпуск применяется для углеродистых и легированных сталей, для которых необходимы высокая твердость и износоустойчивость.

При первой стадии отпуска (150°C) происходит зарождение карбидов, перераспределение углерода в мартенсите — образуются участки, где концентрация атомов углерода существенно выше среднего количества его в решетке мартенсита. В этих участках образуются зародыши  $\epsilon$ -карбидной фазы, отличной от  $Fe_3C$ .

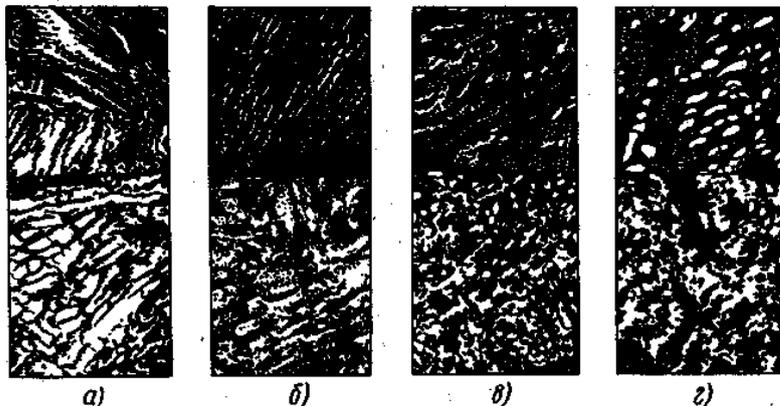
Таким образом, на первой стадии отпуска содержание углерода в разных участках мартенситных кристаллов оказывается крайне неоднородным. Такой мартенсит называется мартенситом отпуска (рис. 1, б).

Средний отпуск производится при температурах нагрева 350...500°C и применяется для пружинных и рессорных сталей, а также для сталей, идущих на изготовление штампов.

При второй стадии отпуска происходит обособление карбидов. Повышение температуры ведет к дальнейшей диффузии углерода из мартенсита отпуска к образовавшимся зародышам карбидов и к росту последних. После достижения критических размеров зародышей напряжения в участках межфазных границ приводят к нарушению когерентных связей в решетках и карбиды обособляются в самостоятельные кристаллы. Дальнейший нагрев до 400...450°C приводит к полному выделению углерода в виде  $Fe_3C$  из твердого раствора, что сопровождается снятием внутренних напряжений. К 450°C структура стали «феррит + карбиды» оказывается в весьма мелкодисперсном состоянии. Такая структура называется трооститом отпуска (рис. 1, в).

Высокий отпуск производится при температурах нагрева 500...650°C и применяется для конструкционных сталей. При 500...600°C частицы цементита в феррите имеют размеры  $\sim 0,1 \cdot 10^{-7}$

<sup>3</sup>мм. Подобная структура называется сорбитом отпуска (*рис. 1, з*). Основным отличием структур типа троостита и сорбита отпуска от троостита и сорбита закалки является сфероидальная форма частиц цементита в структурах отпущенной стали, в то время как у структур после распада аустенита форма частиц пластинчатая.



*Рисунок 1. Микроструктуры мартенсита и продуктов его отпуска:  
а — мартенсит; б — мартенсит отпуска при 120°C;  
в — троостит отпуска при 370°C; з — сорбит отпуска при 600°C*

Кроме температуры нагрева, при отпуске весьма важно время выдержки, скорость же охлаждения в большинстве случаев значения не имеет.

Время выдержки при температуре отпуска определяется из расчета 2-3 мин на 1 мм диаметра или толщины образца.

#### **Задания:**

1. Определить для марки стали 30 режим отпуска.
2. Зарисовать микроструктуры стали 30 после отпуска.
3. Дать ответы на вопросы.

#### **Вопросы для самоконтроля**

1. Дайте определение понятию отпуск?
2. Какова цель отпуска?
3. Дайте определение структуре троостита отпуска.
4. Дайте определение структуре сорбита отпуска.
5. Какими свойствами обладает структура сорбита?
6. Какому виду отпуска подвергают рессоры и пружины?
7. Какой вид отпуска нужно назначить для получения высоких характеристик твердости?
8. Как называют термическую обработку, состоящую из закалки и высокого отпуска?
9. Какой вид отпуска увеличивает предел выносливости?

## Практическая работа № 6

### Тема лабораторной работы: Термическая обработка углеродистых сталей. Отжиг.

#### Цель работы:

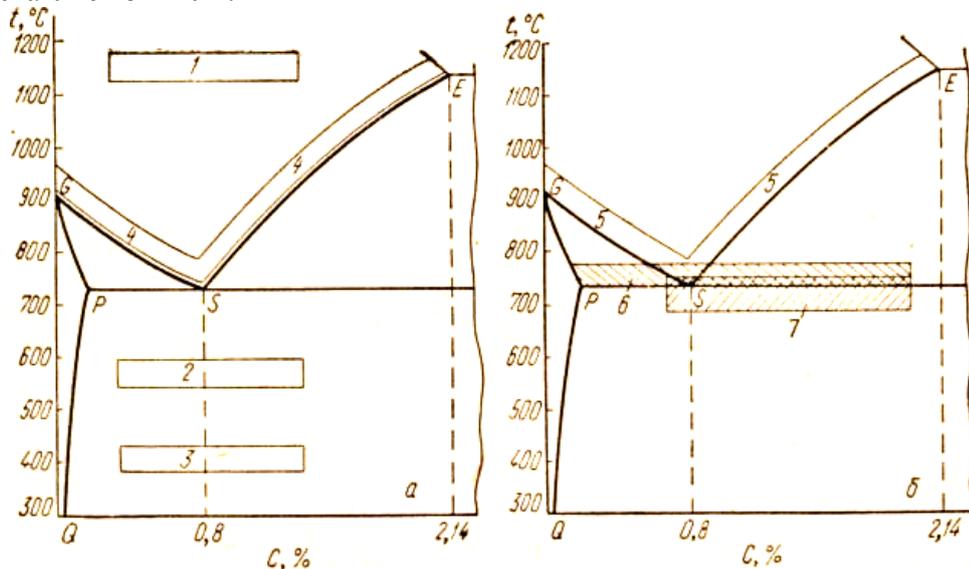
1. Ознакомится с основными видами отжига.

#### Содержание и порядок выполнения

Сталь подвергают всем видам отжига (I и II рода). Основное назначение отжига — получение равновесной структуры, поэтому при отжиге, как правило, детали охлаждают медленно, вместе с печью со скоростями 50—200 град/ч.

Отжиг I рода устраняет физическую или химическую неоднородность, созданную предшествующими обработками.

Диффузионный отжиг (гомогенизирующий) применяют для устранения ликвации (выравнивания химического состава) и его проводят при высокой температуре и большом времени выдержки. Так, например, для легированных сталей нагрев проводят до температуры 1050—1200° С, время выдержки составляет 8—20 ч.



#### Температуры нагревов при различных видах термической обработки:

- а — отжиг I рода (1 — диффузионный отжиг, 2 — рекристаллизационный отжиг, 3 — отжиг для снятия напряжений), 4 — нормализация;*  
*б — отжиг II рода (5 — полный отжиг, 6 — неполный отжиг, 7 — циклический отжиг)*

Рекристаллизационный отжиг. В заводской практике для устранения наклепа холоднокатаных листов из углеродистой стали с 0,1—0,2% С отжиг проводят при 680—700° С, для холодно-тянутых прутков из легированных сталей — при 700—730° С и т. д. Время выдержки при нагреве зависит от толщины сечения. Для тонких листов и проволоки оно составляет 25—30 мин.

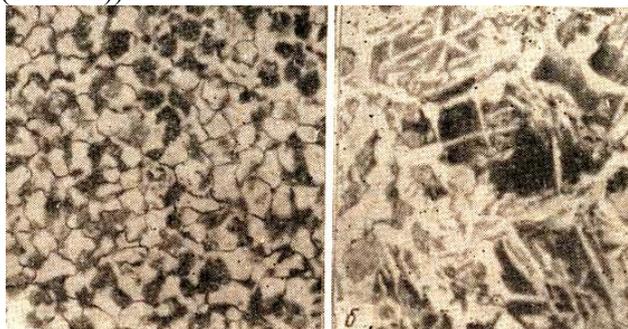
Отжиг для снятия напряжений проводят для деталей из углеродистой стали при нагреве до 400—600° С, с выдержкой 2,5 мин на 1 мм толщины сечения.

Нормализацией называют термическую обработку стали, при которой изделие нагревают до аустенитного состояния (на 30—50 град выше  $A_{с3}$  или  $A_{cm}$ ) и охлаждают на спокойном воздухе. В результате нормализации получается более тонкое строение эвтектоида (тонкий перлит или сорбит), уменьшаются внутренние напряжения, устраняются многие пороки, возникшие в процессе предшествующих обработок изделий. Твердость и прочность выше, чем после отжига. Поэтому, несмотря на значительную экономию времени, нормализация не всегда может заменить отжиг. В заэвтектоидных сталях нормализация устраняет грубую сетку вторичного цементита. Нормализацию чаще применяют как промежуточную операцию, улучшающую структуру.

Отжиг II рода применяют в качестве предварительной термической обработки перед обработкой резанием на металлорежущих станках.

В зависимости от температуры нагрева различают полный и неполный отжиг.

Полный отжиг обычно применяют для доэвтектоидной стали. Изделия нагревают до температуры на 30—50 град выше точки  $A_{c3}$ , что обеспечивает полную перекристаллизацию — превращение исходной ферритно-перлитной структуры в аустенит. При такой температуре нагрева аустенит получится мелкозернистым, следовательно, при охлаждении сталь будет иметь также мелкозернистую структуру. Если при отжиге нагреть изделия значительно выше  $A_{c3}$ , то зерна аустенита могут вырасти до крупных размеров. После охлаждения получится грубая структура, состоящая из крупных зерен феррита и перлита. Сталь с такой структурой обладает пониженной пластичностью. Иногда ферритные выделения имеют вид игл, такая структура называется видманштеттовой (названа в честь Видманштеттена (Австрия), впервые открывшего ее в метеоритном железе (1908 г.))



*Структура стали: а — нормальный отжиг; б — перегрев («видманштетт»)*

Неполный отжиг применяют для заэвтектоидной стали. При нагреве на 20—50 град выше  $A_{c1}$  (740—770° С) в структуре сохраняется вторичный цементит. В результате отжига цементит получается в виде зерен (глобулей) и поэтому такой отжиг называют также сфероидизацией. Получению зернистого цементита способствует предшествующая отжигу горячая пластическая деформация, при которой цементитная сетка дробится. Сталь с зернистым цементитом лучше обрабатывается режущим инструментом и приобретает хорошую структуру после закалки. Неполный отжиг для доэвтектоидной стали применяют редко. При нагреве до этой температуры не происходит полной перекристаллизации, часть зерен феррита остается в том же виде, что и до нагрева. Такой отжиг проводят только в тех случаях, когда исправления структуры не требуется, а необходимо только понижение твердости.

Если после проведения неполного отжига цементит остается пластинчатым, применяют так называемый циклический или маятниковый отжиг. В этом случае после нагрева выше  $A_{c1}$  изделие охлаждают до температуры примерно 680° С, затем вновь нагревают до 740—750° С и опять охлаждают до 680° С, повторяя циклы нагрев—охлаждение несколько раз. В результате перлит получается зернистым и сталь будет пластичной.

Иногда с целью экономии времени проводят изотермический отжиг. При таком отжиге изделие нагревают выше критических точек, быстро охлаждают до температуры на 50—100° С ниже  $A_{c1}$  и выдерживают при этой температуре в течение времени, необходимого для полного превращения аустенита в перлит. Затем изделие охлаждают на спокойном воздухе. При изотермическом отжиге в процессе выдержки, которую выбирают в соответствии с диаграммой изотермического распада аустенита для данной стали, происходит выравнивание температуры по сечению изделия. Это способствует получению более однородной структуры и, следовательно, более однородных свойств. Легированные стали подвергают именно такому отжигу. Следует заметить, что выигрыш во времени при изотермическом отжиге получается только для небольших по размерам изделий, так как для крупногабаритных деталей для выравнивания температуры по объему необходимо продолжительное время.

**Задания:**

1. Пользуясь диаграммой железо-цементит, определить для марки стали 30 режим отжига.
2. Дать ответы на вопросы.

**Вопросы для самоконтроля**

1. Что такое отжиг и для чего предназначен?
2. Чем отличается отжиг первого от второго рода?
3. Цель диффузионного отжига?
4. Для чего применяется рекристаллизационный отжиг?
5. Какие фазовые превращения происходят при полном отжиге?

## Практическая работа № 7

**Тема практической работы:** Изучение микроструктуры и свойств углеродистых сталей.

### Цель работы:

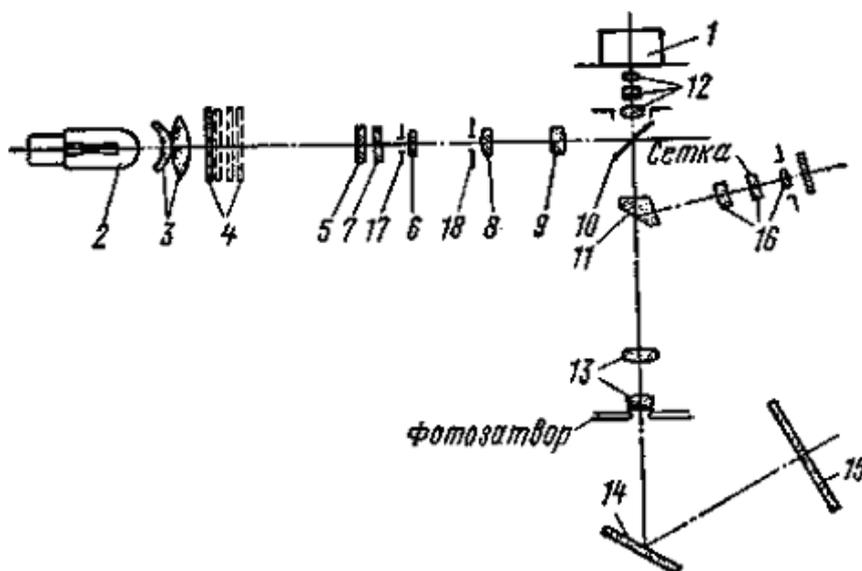
1. Изучить устройство металломикроскопа.
2. Изучить схемы микроструктур углеродистых сталей в равновесном состоянии.

### Содержание и порядок выполнения

#### Металломикроскоп.

Для исследования микроструктуры металлов и сплавов применяют металлографический микроскопы.

Лучи от источника света 2, пройдя через коллектор 3, светофильтры 4, полуматовую пластинку 7, апертурную диафрагму 17, линзы 6, 8, 9 и полевую диафрагму 18, отражаются от пластины 10 и через объектив 12 попадают на шлиф 1. Отразившись от поверхности шлифа, лучи света вновь проходят через объектив 12 и с помощью отражательной призмы 11 направляются в окуляр 16, попадая таким образом в глаз наблюдателя.



*Схема хода лучей в металлографическом микроскопе МИМ-6*

Для перевода изображения на фотокамеру нужно с помощью рычага отодвинуть отражательную призму 11 и открыть фотозатвор, при этом лучи проходят через фотоокуляр 13 и, отражаясь от зеркала 14, попадают на матовое стекло фотокамеры 15, вместо которого можно вставить подготовленную к съемке кассету.

#### Микроанализ сталей

Микроанализ – это исследование металлов и сплавов на специальных образцах (микрошлифах) с помощью металлографических микроскопов при увеличениях до 2000 раз.

Микроанализ применяют для выявления структурных составляющих и изменений внутреннего строения сплавов, происходящих под влиянием различных режимов термической или химико-термической обработки, а также после внешнего механического воздействия на сплав.

#### Приготовление микрошлифов

Образцы вырезают из того места, которое является наиболее важным в эксплуатационных условиях исследуемого металла или детали.

Одну из плоскостей образца обрабатывают напильником или на абразивном круге, затем эту же плоскость шлифуют и полируют, применяя различные номера шлифовальной шкурки и полирующих смесей.

Полированный шлиф подвергают травлению определенным химическим реактивом для выявления микроструктуры сплава. Для железо-углеродистых сплавов применяют 4%-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте.

Травление поверхности производится до ее потускнения, пока поверхность не примет слегка матовый оттенок без каких либо пятен. При рассмотрении под микроскопом такой поверхности элементы структуры четко заметны.

Для сталей характерно существование однофазных и двухфазных структур.

Однофазные структуры

1. Феррит – твердый раствор углерода в альфа-железе, имеет объемноцентрированную кубическую решетку, обладает высокой пластичностью (50%), ферромагнитен до температуры 768°. Твердость 60-100НВ.

2. Аустенит – твердый раствор углерода в гамма-железе, имеет гранцентрированную кубическую решетку, обладает высокой пластичностью, немагнитен. Твердость 160-220НВ.

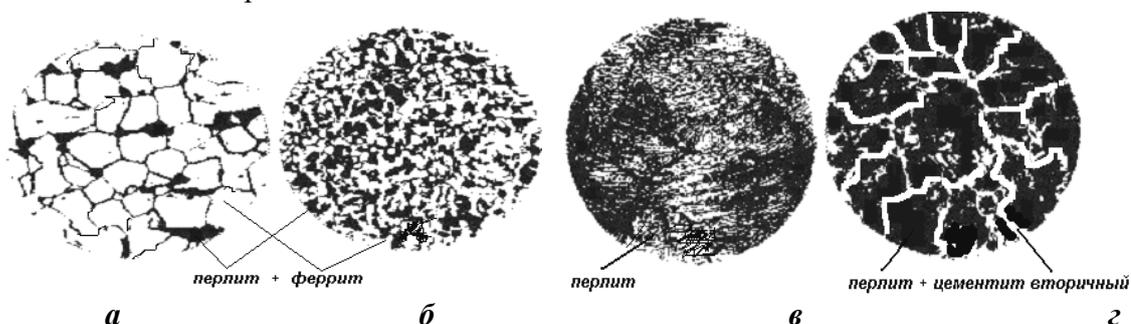
3. Цементит – химическое соединение железа с углеродом (карбид железа), имеет сложную орторомбическую решетку, обладает высокой твердостью 800НВ, большой хрупкостью и нулевой пластичностью, немагнитен выше 210°. Имеет три разновидности: первичный – выделившийся из жидкого сплава, вторичный – выделившийся из аустенита и третичный – выделившийся из феррита.

Двухфазные структуры

Перлит – эвтектоид, механическая смесь феррита и цементита, образующаяся при температуре 727°C в результате распада аустенита, содержит 0,8% углерода. Различают пластинчатый перлит, представляющий собой параллельное чередование пластинок цементита и феррита, и зернистый – когда округлые зерна цементита равномерно распределены в поле феррита. Твердость 160-250НВ.

### Микроструктуры углеродистых сталей

Стали с содержанием углерода от 0,02 % до 0,8 % называются доэвтектоидными. Микроструктура состоит из феррита и перлита. С увеличением содержания углерода количество феррита уменьшается, а перлита увеличивается. На *рисунке 1(а, б)* показаны микроструктуры доэвтектоидных сталей, содержащие 0,1% и 0,4% углерода соответственно. После травления в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте феррит выделяется в виде светлых, а перлит – в виде темных кристаллов.



**Рисунок 1. доэвтектоидная сталь 0,1% углерода (а), 0,4% углерода (б)  
эвтектоидная сталь 0,8% углерода (в), заэвтектоидная сталь 1,2% углерода (г).**

Сталь с содержанием 0,8% углерода называется эвтектоидной. Микроструктура состоит из перлита. С увеличением содержания углерода количество феррита уменьшается, а перлита увеличивается. На *рисунке 1(в)* показана микроструктура эвтектоидной стали. После травления в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте поверхность шлифа имеет перламутровый отлив.

Стали с содержанием углерода свыше 0,8 % называются заэвтектоидными. Микроструктура состоит из перлита и вторичного цементита, который выделяется в виде сетки, зерен или игл. С увеличением содержания углерода количество цементита увеличивается. На *рисунке 1(г)* показана микроструктура заэвтектоидной стали с содержанием 1,2% углерода. После травления в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте цементит выделяется в виде сетки располагающейся по границам зерен перлита.

**Задания:**

1. Зарисовать устройство микроскопа МИМ – 6.
2. Дать описание схемы хода лучей в металлографическом микроскопе МИМ-6.
2. Дать определение, какой сплав называется сталью.
3. Дать характеристику структурных составляющих сталей.
4. Зарисовать схемы микроструктур сталей марок 10, 45, У8 и У12.
5. Описать свойства и применение перечисленных марок сталей.
6. Дать ответы на вопросы

**Вопросы для самоконтроля**

1. Что такое сталь?
2. Как классифицируется сталь по составу и структуре, по качеству, по назначению?
3. Дать определение всем структурным составляющим железоуглеродистых сплавов.
4. Каковы основные критические точки у сталей?
5. Как маркируются стали?
6. Какие элементы в составе стали кроме Fe и C являются постоянными?
7. Какие элементы в составе стали являются вредными?
8. Каково назначение доэвтектоидных сталей?
9. Каково назначение заэвтектоидных сталей?
10. Какие изделия изготавливаются из эвтектоидной стали?

## Практическая работа № 8

**Тема практической работы: Изучение микроструктуры и свойств чугунов.**

### Цель работы:

1. Изучить микроструктуру серых, ковких и высокопрочных чугунов.
2. Установить связь между составом, условиями получения и структурой.

### Содержание и порядок выполнения

#### Микроструктура серых чугунов

При рассмотрении в микроскоп нетравленного микрошлифа серого чугуна хорошо видны включения пластинчатого графита.



На величину и расположение включений графита влияют скорость охлаждения, температура и время выдержки расплавленного чугуна перед отливкой, химический состав чугуна, введение в чугун некоторых примесей (модификаторов).

Например, скорость охлаждения влияет таким образом, что при прочих равных условиях графит образуется тем крупнее, чем медленнее охлаждение. Чем больше перегрев жидкого чугуна и чем дольше время выдержки при этом, тем меньше получают графитные включения.

Металлическая основа в серых чугунах очень сходна с микроструктурой сталей и в зависимости от количества связанного углерода может быть ферритной, феррито-перлитной и перлитной. При повышенных концентрациях фосфора в серых чугунах имеется фосфидная эвтектика, располагающаяся полностью или частично по границам зерен.

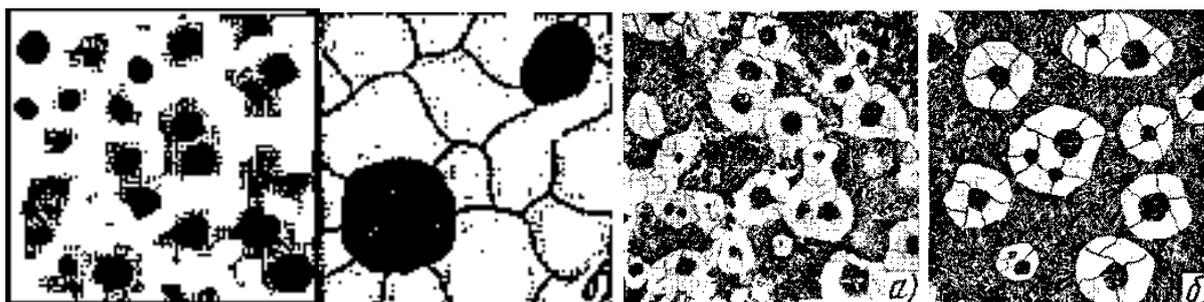


#### Микроструктура высокопрочных чугунов

При рассмотрении в микроскоп нетравленного микрошлифа высокопрочного чугуна хорошо видны включения шаровидного графита.

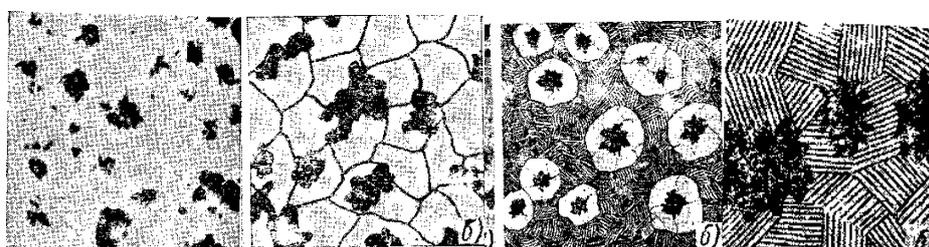
В высокопрочных чугунах могут быть те же типы структур, которые были указаны для серых чугунов но графит в этих чугунах шаровидный. Таким образом, возможны следующие типы микроструктуры высокопрочных чугунов: феррит + шаровидный графит — ферритный высокопрочный чугун; феррит + перлит + шаровидный графит — феррито - перлитный

высокопрочный чугун. Соотношение между количеством феррита и перлита в высокопрочном чугуне может быть различным в зависимости от химического состава и условий охлаждения.



### Микроструктура ковких чугунов

При рассмотрении в микроскоп нетравленного микрошлифа ковкого чугуна хорошо видны включения хлопьевидного графита (углерода отжига). Металлическая основа ковкого чугуна может быть ферритной, феррито-перлитной и перлитной.



### Задания:

1. Изучить микроструктуры серых, высокопрочных и ковких чугунов: в нетравленном виде — форму включений графита; после травления — структуры ферритных, феррито-перлитных и перлитных чугунов.
2. В серых, высокопрочных и ковких чугунах определить (приблизительно) содержание связанного углерода по микроструктуре, исходя из количества перлита.
4. Кратко описать способы получения высокопрочного и ковкого чугунов.
5. Дать ответы на вопросы.

### Вопросы для самоконтроля

1. Какой сплав называют чугуном?
2. Как классифицируется белый чугун по составу и структуре?
3. Что такое ледебурит, цементит, графит?
4. Как называются графитизированные чугуны по стальной основе?
5. Какую форму графита имеют серые, высокопрочные и ковкие чугуны?
6. Какие элементы способствуют кристаллизации графита?
7. Какие факторы кроме химического состава способствуют образованию графита?
8. Как маркируются графитизированные чугуны?
9. Какими характерными свойствами обладают чугуны?
10. Где чугуны находят применение?

## Практическая работа № 9

**Тема практической работы: Изучение микроструктуры и свойств медных сплавов.**

### Цель работы:

1. Изучить микроструктуру меди, бронз и латуней.
2. Научиться определять механические свойства по диаграмме состояния медь – олово и влияния олова на механические свойства.

### Содержание и порядок выполнения

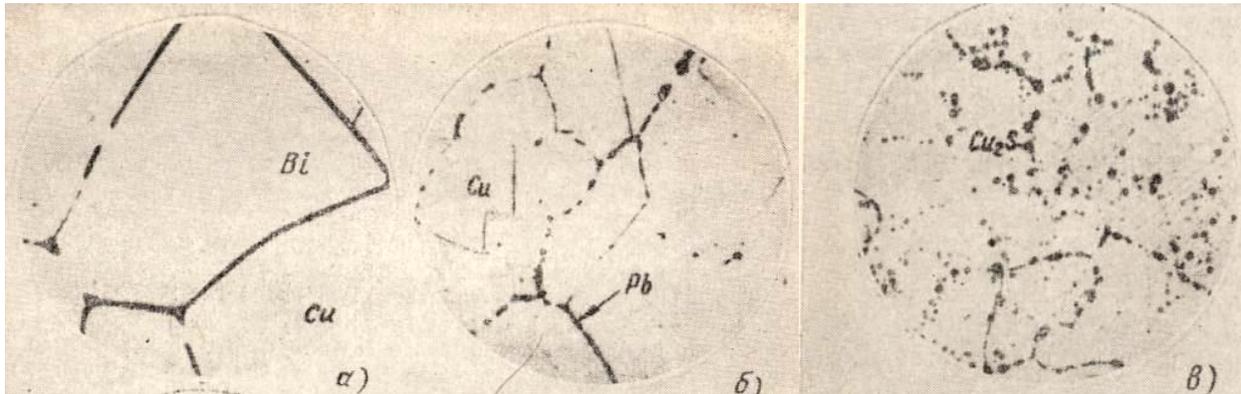
Медь — металл красноватого цвета, кристаллизуется в решетку ГЦК. Плотность меди — 8,94 г/см<sup>3</sup>. Температура плавления — 1083°С. Медь обладает высокой пластичностью.

Медь — металл красноватого цвета, кристаллизуется в решетку ГЦК. Плотность меди — 8,94 г/см<sup>3</sup>. Температура плавления — 1083°С. Медь обладает наибольшими (кроме серебра) электропроводностью и теплопроводностью.

В зависимости от чистоты медь изготовляют следующих марок: М00 (99,99% Cu), М0 (99,95% Cu), М1 (99,9% Cu), М2 (99,7% Cu), М3 (99,50% Cu).

Присутствующие в меди примеси оказывают большое влияние на ее свойства. Примеси Pb, Bi, образуют в ней легкоплавкие эвтектики; которые, выделяясь по границам зерен, затрудняют обработку давлением; при содержании 0,005% Bi медь разрушается при горячей обработке давлением; при более высоком содержании висмута медь становится, кроме того, хладноломкой; на электропроводность эти примеси оказывают небольшое влияние.

Сера улучшает обрабатываемость меди резанием



Микроструктура литой меди

- а) с примесью 0,2% висмута
- б) – 0,3% свинца
- в) – 0,1% серы

Механические свойства меди

в литом состоянии:

$\sigma_{\text{в}} = 16 \text{ кгс/мм}^2$ ,  $\sigma_{0,2} = 3,5 \text{ кгс/мм}^2$ ,  $\delta = 25\%$ ;

в горячедеформированном состоянии:

$\sigma_{\text{в}} = 24 \text{ кгс/мм}^2$ ,  $\sigma_{0,2} = 9,5 \text{ кгс/мм}^2$ ,  $\delta = 45\%$ .

Путем холодного деформирования предел прочности может быть повышен до 45 кгс/мм<sup>2</sup> (проволока) при снижении относительного удлинения до 3%. Модуль нормальной упругости меди  $E = 11\,500 \text{ кгс/мм}^2$ .

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

В электротехнической промышленности применяют бескислородную медь М0б (0,001% O<sub>2</sub>) и М1р (0,01% O<sub>2</sub>).

Сплавы меди с цинком называются латунями. В равновесных условиях при содержании цинка до 39% образуется твердый раствор  $\alpha$  (рис. 25, а). При большем содержании цинка образуется твердая  $\beta$ -фаза (CuZn), обладающая высокими твердостью и хрупкостью. В отличие от равновесного состояния  $\beta$ -фаза появляется в структуре при содержании цинка около 30%. В соответствии с изменением структуры изменяются механические свойства. В области  $\alpha$ -твердого раствора увеличение содержания цинка вызывает повышение прочности и пластичности латуни (рис. 25, б).

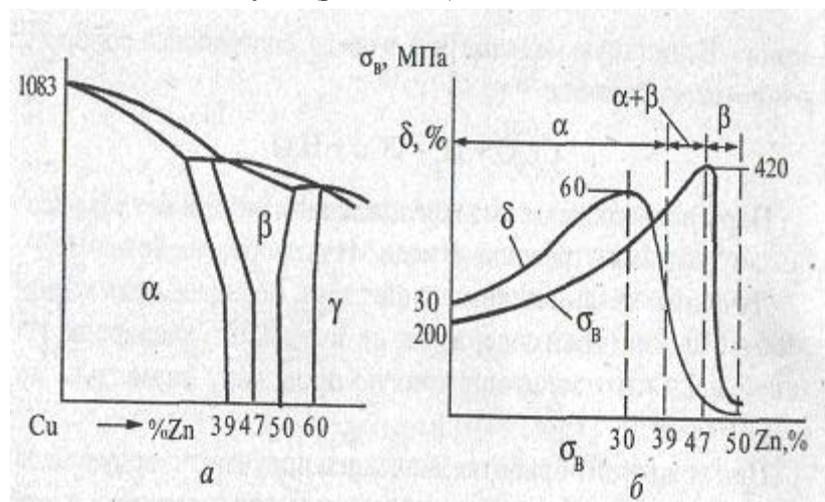
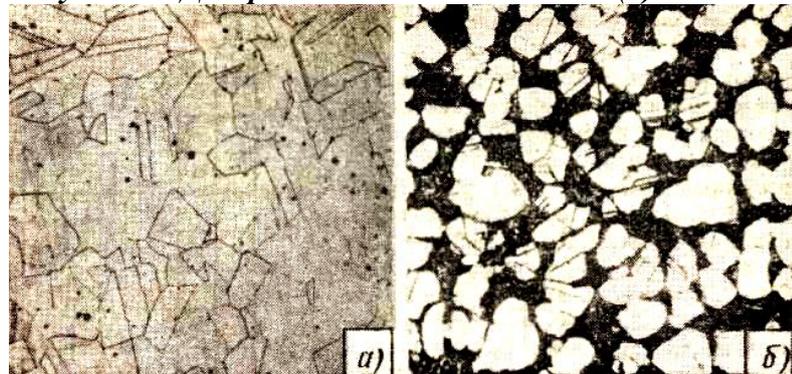


Рисунок 25. Диаграмма состояния Cu-Zn (а) и влияние цинка на механические свойства (б)



Микроструктура латуней  
а) однофазная  $\alpha$ -латунь  
б) двухфазная  $\alpha + \beta$ -латунь

Появление  $\beta$ -фазы сопровождается резким снижением пластичности. Прочность продолжает повышаться при увеличении содержания цинка до 47% (в равновесном состоянии), пока латунь находится в двухфазном состоянии. Переход латуни в однофазное состояние со структурой  $\beta$ -фазы вызывает резкое снижение прочности. Практическое значение имеют латуни, содержащие до 45% Zn. Ввиду высокой хрупкости сплавы с большим содержанием цинка не применяются. Повышение содержания цинка удешевляет латуни, улучшает их обрабатываемость резанием, способность прирабатываться и противостоять износу, но уменьшаются теплопроводность и электрическая проводимость.

Все латуни по способу изготовления деталей разделяются на деформируемые и литейные. Деформируемые латуни — это однофазные  $\alpha$ -латуни. Из деформируемых латуней детали изготавливают методом обработки давлением (ковка, штамповка, прокатка) чаще в холодном состоянии.

Литейные латуни — это двухфазные  $\alpha + \beta$  латуни. Вследствие небольшого температурного интервала кристаллизации они обладают низкой склонностью к дендритной ликвации, высокой

жидкотекучестью, хорошей герметичностью. Но они не применяются для фасонных отливок, так как имеют большую концентрированную усадочную раковину.

Двухфазные латуни ввиду малой пластичности при низких температурах подвергают горячей обработке давлением (изготавливают листы, прутки, трубы, штамповки).

Латуни маркируют буквой Л и цифрой, показывающей содержание меди в процентах. Марки латуней: Л96, Л90, Л85, Л80, Л70, Л68, Л62 — это однофазные  $\alpha$ -латуни. Латуни с высоким содержанием меди (Л 80) имеют цвет золота, их применяют для ювелирных и декоративных изделий. Такие латуни называют томпаком.

Латунь Л59 — это литейная ( $\alpha+\beta$ ) латунь.

Кроме двойных латуней — сплавов только меди и цинка, применяют специальные латуни. В эти сплавы для придания тех или иных свойств дополнительно вводят различные элементы: свинец — для улучшения обрабатываемости резанием (ЛС 59-1, содержит 59% меди и 1% свинца), олово для повышения сопротивления коррозии (ЛО 70-1 — морская латунь, содержит 70% меди и 1% олова), алюминий и никель — для повышения механических свойств (ЛАН 59-3-2, содержит 59% меди, 3% алюминия и 2% никеля). Присадка всех элементов (кроме никеля) по влиянию на структуру равносильна увеличению содержания цинка.

Бронзы — сплавы меди с любыми другими элементами, где цинк не является основным элементом.

В зависимости от входящих в сплав элементов различают оловянистые, свинцовистые, алюминиевые, кремнистые, бериллиевые и другие бронзы.

Оловянистые бронзы. Медь с оловом образует ряд твердых растворов. При содержании олова до 12% в равновесных условиях образуется однородный  $\alpha$ -твердый раствор олова в меди (рис. 26, а). Ввиду большого температурного интервала кристаллизации сплавы склонны к ликвации, и уже при содержании олова более 5-8% в реальных условиях кристаллизации в структуре сплава присутствует эвтектид ( $\alpha+\delta$ ). Он обладает высокой твердостью и хрупкостью. Поэтому практическое значение имеют бронзы, содержащие до 10% Sn.

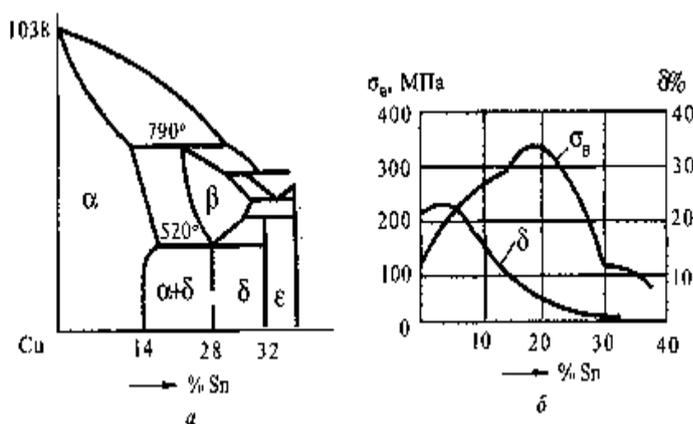
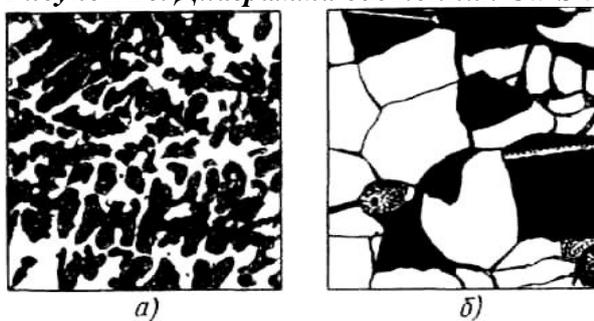


Рисунок 26. Диаграмма состояния Cu-Sn (а), и влияние олова на механические свойства (б)



Микроструктура бронзы с 6% олова: а — после литья; б — после отжига

Бронзы делятся на деформируемые и литейные. Если  $\text{Sn} < 4-5\%$ , бронзы состоят из твердого раствора  $\alpha$  мягкого и пластичного, и такие бронзы относятся к деформируемым. Наряду с хорошей электрической проводимостью, коррозионностойкостью и антифрикционностью деформируемые бронзы обладают высокими упругими свойствами и сопротивлением усталости.

Их используют для изготовления пружин и пружинящих деталей в точной механике, электронике и др.

При содержании  $\text{Sn} > 6\%$  появляется твердая и хрупкая  $\delta$ -фаза, что исключает возможность обработки давлением, и детали из таких бронз изготавливают методом литья. Такие бронзы относят к группе литейных. Наряду с хорошей коррозионной стойкостью литейные бронзы обладают хорошими литейными свойствами, в частности, малой усадкой. Усадка бронзы составляет менее 1%, в то время как у латуни усадка — 1,5%, а у сталей — более 2%. Наиболее сложные по конфигурации отливки обычно отливают из бронз.

Влияние олова на механические свойства меди аналогично влиянию цинка, но проявляется более резко. Уже при 5% олова пластичность сплава начинает падать (рис. 26, б).

В литой бронзе наличие твердого эвтектоида в мягком твердом растворе обеспечивает высокую стойкость против истирания и хорошую прирабатываемость. Бронза с 10% Sn является лучшей антифрикционной бронзой и её применяют как подшипниковый сплав.

Двойные оловянистые бронзы применяют редко, так как они дорогие. Оловянистые бронзы легируют Zn, Pb, Ni, P. Для экономии более дорогостоящего олова в бронзы добавляют от 2 до 15% Zn. В таком количестве он полностью растворяется в  $\alpha$ -твердом растворе, что повышает механические свойства. Кроме того цинк улучшает жидкотекучесть бронз, повышает плотность отливок, способность к сварке и пайке.

Свинец повышает антифрикционные свойства и улучшает обрабатываемость резанием, находясь в виде отдельных включений и определяя ломкость стружки. Это бронзы Бр ОЦ 4-3, Бр ОЦС 5-5-5 и др.

Фосфор раскисляет бронзу, повышает ее жидкотекучесть, износостойкость (благодаря наличию твердых включений  $\text{Cu}_3\text{P}$ ). Это бронзы Бр ОФ 4-0,25, Бр ОФ 6,5-0,4 и др.

Никель способствует измельчению структуры и повышению механических свойств (Бр ОЦСН 3-7-5-1 и др.).

Бронзы маркируются буквами Бр, затем следуют русские буквы, показывающие, какие легирующие элементы содержит бронза, а затем следуют цифры, показывающие содержание их в процентах соответственно.

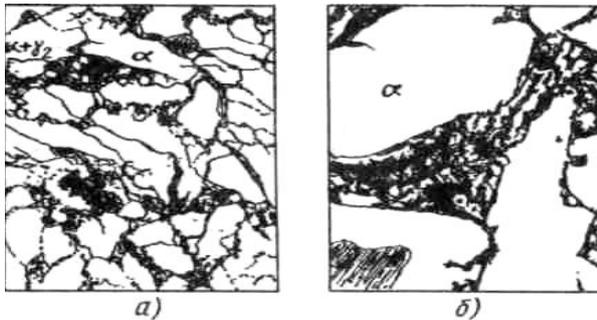
Алюминиевые бронзы отличаются высокими механическими, антифрикционными и антикоррозионными свойствами. По сравнению с оловянистыми бронзами, алюминиевые бронзы дешевле, прочнее и технологичнее (обладают большей жидкотекучестью, но и большей усадкой).

В равновесных условиях при содержании алюминия до 9% бронзы однофазные. При реальных скоростях охлаждения при содержании алюминия 6-8% в структуре сплавов появляется эвтектоид, что приводит к резкому снижению пластичности.

Однофазные бронзы (БрА5, БрАб) хорошо сопротивляются коррозии, легко обрабатываются давлением и в холодном состоянии, превосходят оловянистую бронзу по прочности (БрА7 —  $\sigma_{\text{в}}=420$  МПа,  $\delta=70\%$ ). Это деформируемые бронзы.

Двухфазные бронзы применяют для изготовления фасонных отливок. Такие бронзы подвергают также горячей обработке давлением. Они отличаются высокой прочностью ( $\sigma_{\text{в}}=600$  МПа) и твердостью ( $\text{HV}>1000$ ).

В алюминиевые бронзы вводят также железо, никель, марганец. Например, БрАЖ 9-4 — двухфазная антифрикционная бронза, стойкая в морской воде, обрабатывается давлением и лется. Железо измельчает зерно, повышает антифрикционные и механические свойства ( $\text{HV} 1800$ ). Бр АЖН 10-4-4 упрочняется термической обработкой. После закалки от  $980^\circ\text{C}$  и старения при  $400^\circ\text{C}$  в течение 2 ч твердость увеличивается до 4000 НВ (в отожженном состоянии НВ 1400-1600). Из такой бронзы изготавливают детали, работающие в тяжелых условиях износа при повышенных температурах ( $400-500^\circ\text{C}$ ): седла клапанов, направляющие втулки выпускных клапанов, части насосов, турбин, шестерни и др. Высокими механическими, антикоррозионными и технологическими свойствами и меньшей стоимостью обладает бронза БрАЖМц 10-3-1,5.



Микроструктура бронзы с 10 % Al: а — после медленного охлаждения; б — после закалки

Кремнистые бронзы содержат до 3% Si, характеризуются хорошими механическими, упругими и антифрикционными свойствами. Литейные свойства их хуже, чем оловянистых, алюминиевых бронз и латуней, они обладают высокой пластичностью и хорошей обрабатываемостью давлением, хорошо свариваются и паяются. Выпускают их в виде лент, полос, прутков, проволоки. Изготавливают пружины, мембраны и другие детали приборов, работающих в пресной и морской воде. Марки кремнистых бронз: Бр КЦ 4-4, Бр КН 1-3, Бр КМц 3-1.

Бериллиевая бронза (БрБ2) относится к сплавам, упрочняемым термической обработкой. В равновесном состоянии бронза двухфазная ( $\alpha+\gamma$ ). При нагреве до температуры 760-780°C образуется однородный твердый раствор  $\alpha$ . Путем быстрого охлаждения (закалки) сохраняется однофазное состояние.

Твердый раствор будет пересыщенным. После закалки бронза обладает высокой пластичностью ( $\delta=40\%$ ) с низкой прочностью ( $\sigma_b=450$  МПа). В процессе последующего отпуска при температуре 300-350°C происходит выделение дисперсных частиц  $\gamma$ -фазы (старение), что приводит к резкому упрочнению ( $\sigma_b=1250-1400$  МПа,  $\delta=3-5\%$ ).

Бронза хорошо сваривается, сопротивляется коррозии и обрабатывается резанием. Ее применяют для изготовления пружин, мембран, деталей, работающих на износ (кулачки полуавтоматов), в электронной технике. Бронзу легируют также титаном (0,1-0,25%), и никелем: Бр БИТ 1,9; Бр БИТ 1,7.

Свинцовистые бронзы. Свинец практически не растворяется в жидкой меди, поэтому сплавы в твердом состоянии состоят из кристаллов меди и включений свинца.

Такая структура обеспечивает высокие антифрикционные свойства. Бр С30 широко применяется для изготовления вкладышей подшипников скольжения, работающих с большими скоростями при повышенных давлениях. По сравнению с оловянистыми теплопроводность бронзы Бр С30 в 4 раза больше, поэтому она хорошо отводит теплоту, возникающую при трении.

Бронза Бр С30 обладает невысокими механическими свойствами ( $\sigma_b=60$  МПа,  $\delta=4\%$ ), поэтому ее наплавляют тонким слоем на стальные ленты.

### Задания:

1. Зарисовать микроструктуры латуни марки ЛС 49-1 и бронзы БР ОЦС 5-5-5 с указанием структурных составляющих, марок сплава и химического состава.
2. Описать свойства заданных сплавов и применение их в машиностроении.
3. Дать ответы на вопросы.

### Вопросы для самоконтроля

1. Какими свойствами обладает медь и где она применяется?
2. Как называются сплавы на основе меди с цинком, какими свойствами они обладают и где применяются?
3. Какие сплавы на основе меди называются бронзами, какими свойствами они обладают и где применяются?

## Практическая работа № 10

**Тема практической работы: Изучение микроструктуры и свойств антифрикционных сплавов**

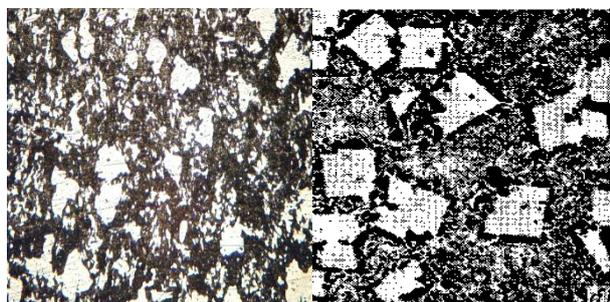
### Цель занятия

1. Изучить свойства и область использования подшипниковых сплавов.
2. Изучить микроструктуры баббитов (оловянного и свинцового).

### Содержание и порядок выполнения

Баббиты - антифрикционные сплавы на оловянной или свинцовой основе. Оловянные баббиты используют в подшипниках турбин крупных судовых дизелей, турбокомпрессоров, электрических и других тяжело нагруженных машин. Гетерогенная структура (мягкая пластичная основа и включения более твердых частиц) обеспечивает малый коэффициент трения, удержание смазки (в капиллярных порах) и высокую износостойкость (твердые частицы). Марки оловянистых баббитов - Б83, Б88. Б83 – содержит: медь-5,5%, сурьму-10-12%, остальное олово.

Цифра в марке баббита указывает на содержание олова. Мягкая основа баббита –  $\alpha$ -твердый раствор сурьмы в олове, а твердые кристаллы  $\beta$ -фазы - твердый раствор на основе химического соединения SnSb. Медь вводят для уменьшения ликвации. Она образует с сурьмой химическое соединение  $Cu_3Sn$ . Это соединение имеет более высокую температуру плавления и кристаллизуется первым, образуя разветвленные дендриты, которые препятствуют ликвации кубических кристаллов  $\beta$  (SnSb). Кроме того, кристаллы  $Cu_3Sn$  образуют в баббите твердые включения, дополнительно повышающие износостойкость вкладышей.



**а) б)**  
**Рисунок 27 а – микроструктура после травления антифрикционного слоя вкладыша подшипника, баббит Б83; б – микроструктура баббита Б16**

На *рисунке 27,а* приведена микроструктура баббита Б83. Темное поле представляет собой пластичную массу  $\alpha$ -твердого раствора сурьмы в олове, светлые кристаллы квадратной формы являются соединением SnSb ( $\beta$ ), а кристаллы в виде звездочек или удлинённых игл - соединением  $Cu_3Sn$ .

Свинцовые баббиты применяют для менее нагруженных подшипников. Свинцовооловянные сплавы Б16, БН, БС6 имеют структуру, состоящую из твердого раствора  $\alpha$  — Sn, Sb и Cu в свинце (мягкая составляющая) и твердых частиц  $\beta$  (SnSb),  $Cu_3Sn$  и  $Cu_2Sb$  (*рисунок 27,б*).

Антифрикционные и механические свойства баббитов повышаются при введении в их состав никеля, кадмия и мышьяка. Никель упрочняет  $\alpha$ -раствор. Кадмий с мышьяком (сплав БН) образуют соединения AsCd, которые служат зародышами для формирования соединения SnSb ( $\beta$ -фазы). Некоторое применение нашёл сплав свинца с сурьмой и небольшими добавками меди (БС). Структура сплава состоит из эвтектики  $\alpha$  (твердый раствор Sb в Pb) +  $\beta$  (твердый раствор Pb в Sb), первичных кристаллов  $\beta$  и соединения  $Cu_2Sb$ , играющих роль твердой составляющей. Баббиты, имея небольшую прочность ( $\sigma_B = 6 - 12$  кгс/мм<sup>2</sup>, HB 20 — 30), могут применяться только в подшипниках, имеющих прочный стальной (чугунный) или бронзовый корпус.

Тонкостенные подшипниковые вкладыши автомобильных двигателей изготавливают штамповкой из биметаллической ленты, полученной на линии непрерывной заливки. Подшипники большого диаметра заливают индивидуально стационарным или центробежным способом, а также литьем под давлением.

Основные требования, предъявляемые к антифрикционным сплавам, определяются условиями работы вкладыша подшипника. Эти сплавы должны иметь достаточную твердость, но не очень высокую, чтобы не вызвать сильного износа вала; сравнительно легко деформироваться под влиянием местных напряжений, т. е. быть пластичными; удерживать смазку на поверхности; иметь малый коэффициент трения между валом и подшипником.

Кроме того, температура плавления этих сплавов не должна быть высокой, и сплавы должны обладать хорошей теплопроводностью и устойчивостью против коррозии.

Для обеспечения этих свойств структура антифрикционных сплавов должна быть гетерогенной, состоящей из мягкой и пластичной основы и включений более твердых частиц. При вращении вал опирается на твердые частицы, обеспечивающие износостойкость, а основная масса, истирающаяся более быстро, прирабатывается к валу и образует сеть микроскопических каналов, по которым циркулирует смазка и уносятся продукты износа.

Наиболее широко применяются сплавы на оловянной и свинцовой основе (баббиты), сплавы на цинковой и алюминиевой основе, а также медносвинцовые сплавы.

Баббиты являются широко распространенными антифрикционными сплавами, обладающими высокой износостойкостью, низким коэффициентом трения, мало изнашивающими вал и хорошо прирабатывающимися к валу. Они обладают способностью впитывать продукты износа. Главным недостатком баббитов является их низкая усталостная прочность.

### **Задания**

1. Описать свойства и область использования подшипниковых сплавов.
2. Зарисовать микроструктуры баббитов (оловянного и свинцового).
3. Дать ответы на вопросы.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Каким строением и какими свойствами должны обладать подшипниковые сплавы, применяемые в подшипниках скольжения?
2. Какие подшипниковые сплавы используются в судостроении, привести примеры и назвать узлы механизмов.

## Перечень литературы

1. Моряков О.С. Материаловедение: учебник для студентов ССУЗов. Изд. центр «Академия» 2008- 240 с.
2. Никифоров В.М. Технология металлов и других конструкционных материалов. Учебник для техникумов.– СПб.: Политехника, 2000. – 382 с.: ил.
3. Фетисов Г.П. Материаловедение и технология металлов учебник для студентов ВТУЗов – М. Высшая школа. 2005 – 862 с.
4. Черепяхин А.А. Материаловедение. – М.: Академия, 2006 (ГРИФ)
5. Блинов И.С. Справочник технолога. – М.; 1979
6. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: Учебник для высших техн. учеб.заведений. - 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990.-528 с.
7. Мозберг Р.К. Материаловедение. – М.: Высшая школа, 1991 (ГРИФ)
8. Технология металлов и материаловедение: Учебник для вузов и техникумов /Под ред. Л.Ф. Усовой – Производственное издание. М.: Металлургия, 1987. - 800 с.
9. Чернов Н.Н. Металлорежущие станки - М. «Машиностроение», 1998. – 303 с.