

*Областное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
среднего профессионального образования  
«Иркутский авиационный техникум»*

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ОГБОУ СПО «ИАТ»  
\_\_\_\_\_ В.Г. Семенов

**Комплект методических указаний по выполнению  
лабораторных и практических работ по дисциплине  
ОП.04 Материаловедение**

образовательной программы (ОП)  
по специальности СПО

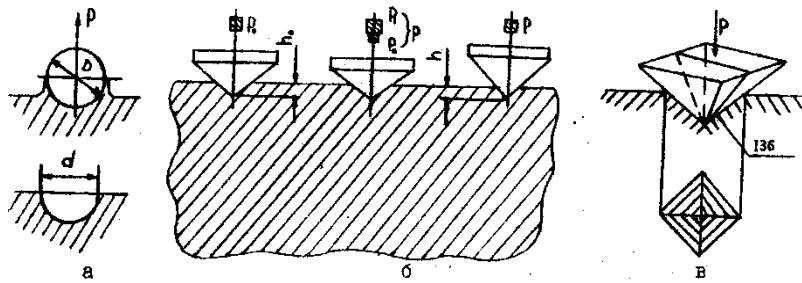
160108 Производство летательных аппаратов

базовой подготовки

**Иркутск 2013**

# Лабораторная работа 1

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ ПО МЕТОДУ БРИНЕЛЛЯ



Цель работы: ознакомление с методикой определения твердости по методу Бринелля, определение механических свойств стали по ее твердости.

### Содержание работы

Студенту выдаются образцы сталей в отожженном и закаленном состояниях и сплавов цветных металлов. Он изучает устройство прибора, готовит образцы, выбирает нагрузку и наконечники, готовит прибор, проводит испытания, оформляет отчет.

#### Техники безопасности

1. Все студенты, приступая к лабораторным работам, должны ознакомиться с правилами работы в лаборатории и расписаться в журнале по технике безопасности.
2. Работы проводятся только с разрешения преподавателя.
3. Все электроприборы должны быть заземлены.
4. Студенты обязаны осторожно обращаться с приборами и оборудованием.
5. По окончании работы приборы должны быть отключены от сети.

### Теоретические сведения

Твердостью называется свойство материала оказывать сопротивление местной пластической деформации при контактном воздействии в поверхностном слое. Измерение твердости вследствие быстроты и простоты осуществления, а также возможности без разрушения изделия суждения о его свойствах, получило широкое применение для контроля качества металлических изделий.

Существует несколько методов определения твердости.

*Определение твердости по Бринеллю HB (ГОСТ 9012-59).* Метод основан на том, что в плоскую поверхность металла вдавливается под постоянной нагрузкой  $P$  закаленный стальной шарик (рис.3, а).

Рис.3. Схема определения твердости  
по Бринеллю (а); Роквеллу (б); Виккерсу (в)

После снятия нагрузки в испытуемом материале образуется отпечаток (лунка). Твердость по Бринеллю, в МПа, определяется по формуле

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

где  $P$  - нагрузка, Н;

6

$D$  - диаметр шарика, мм;

$d$  - диаметр отпечатка, мм.

Диаметр шарика и нагрузка  $P$  выбираются в зависимости от вида испытуемого материала: для стали и чугуна  $D = 10$  мм,  $P = 30000$  Н ( $P = 300D^2$ );

для меди и сплавов  $D = 10$  мм,  $P = 10000$  Н ( $P = 100D^2$ );

для очень мягких сплавов (алюминий, баббиты и др.)  $D = 10$  мм,  $P = 2500$  Н ( $P = 25D^2$ )

При расчете твердости  $HB$  измеряют диаметр лунки  $d$  и по нему находят твердость по прилагаемым к прибору таблицам. Метод Бринелля не рекомендуется применять для металлов с твердостью более 450, так как шарик может деформироваться, что исказит результаты измерений.

*Методика выполнения работы*

- Провести испытания не менее трех раз на каждом образце.
- Определить твердость по Бринеллю измерив диаметр лунки, и сравнить с результатами по прилагаемым к прибору таблицам.
- Определить свойства образцов, используя формулу

$$\sigma_e = KHB,$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от материала. Для стали с твердостью  $120 \div 450 HB$   $K \approx 0,34$ ; для меди, латуни, бронзы отожженных  $K \approx 0,55$ , наклепанных  $K \approx 0,40$ ; для алюминия и алюминиевых сплавов с твердостью  $20 \div 45 HB$   $K \approx 0,35$ .

- Внести результаты испытаний в таблицу следующей формы:

Таблица записей результатов испытания

№ п/п	Марка материала	Нагрузка на шарик $P$ (Н)	Время выдержки (с)	Диаметр шарика $D$ (мм)	Диаметр отпечатка (мм)				Твердость по Бринеллю $HB$ (МПа)	Предел прочности $\sigma_b$ (МПа)
					$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_{cp}$		

Ориентировочный перевод значений твердости, определяемых различными методами

$HV$ , МПа	$HB$ , МПа	$HR$ по шкале			$HV$ , МПа	$HB$ , МПа	$HR$ по шкале		
		$C$	$A$	$B$			$C$	$A$	$B$
12340	7800	72	84	--	2280	2290	20	61	100
11160	7450	70	83	--	2220	2230	19	60	99
10220	7120	68	82	--	2170	2170	17	60	98
9410	6820	66	81	--	2130	2120	15	59	97
8680	6730	64	80	--	2080	2070	14	59	95
8040	6270	62	79	--	2010	2010	13	58	94
7460	6010	60	78	--	1970	1970	12	58	93
6940	5780	58	78	--	1920	1920	11	57	92
6500	5550	56	77	--	1860	1870	9	57	92
6060	5340	54	76	--	1830	1830	8	56	90
5870	5140	52	75	--	1780	1790	7	56	90
5510	4950	50	74	--	1740	1740	6	55	89
5340	4770	49	74	--	1710	1700	4	55	88
5020	4610	48	73	--	1660	1670	3	54	87
4740	4440	46	73	--	1620	1630	2	53	86
4600	4290	45	72	--	1590	1590	1	53	85
4350	4150	43	72	--	1550	1560	-	-	84
4230	4010	42	71	--	1520	1520	-	-	83
4010	3880	41	71	--	1490	1490	-	-	82
3900	3750	40	70	--	1480	1460	-	-	81
3860	3630	39	70	--	1430	1430	-	-	80
3610	3520	38	69	--	1400	1400	-	-	79
3440	3410	36	68	--	1380	1370	-	-	78
3340	3310	35	67	--	1340	1340	-	-	77
3200	3210	33	67	--	1310	1310	-	-	76
3110	3110	32	66	--	1290	1280	-	-	75
3030	3020	31	66	--	1270	1260	-	-	74
2920	2930	30	65	--	1230	1230	-	-	73
2850	2850	29	65	--	1210	1210	-	-	72

Таблица 3  
определляемых

2780	2770	28	64	--	1180	1180	-	-	71
2700	2690	27	64	--	1160	1160	-	-	70
2610	2620	26	63	--	1150	1140	-	-	68
2550	2550	25	63	--	1130	1110	-	-	67
2490	2480	24	62	--	1100	1100	-	-	66
2400	2410	23	62	102	1090	1090	-	-	65
2350	2350	21	61	101	1080	1070	-	-	64

### **Необходимое оборудование и материалы**

1. Автоматический рычажный пресс для определения твердости.
2. Портативный твердомер TH 170.
3. Образцы сплавов цветных металлов и сталей в отожженном и закаленном состояниях.
4. Шлифовальная бумага.

### **Содержание отчета**

1. Краткая характеристика методов определения твердости металлов.
2. Таблица испытаний твердости образцов металлов.
3. Определение механических свойства материалов.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие методы определения твердости Вам известны?
2. Каковы единицы измерения твердости, определяемой различными способами?
3. По каким формулам определяются числа твердости по различным методам?
4. Как проводится подготовка образца для измерении твердости?
5. Как проводятся испытания твердости на Автоматическом рычажном прессе?
6. Почему измерения твердости по Бринеллю нельзя применять для тонких образцов?
7. Каковы зависимости между твердостью и пределом прочности?

## **Лабораторная работа 2**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ ПО МЕТОДУ РОКВЕЛЛА**

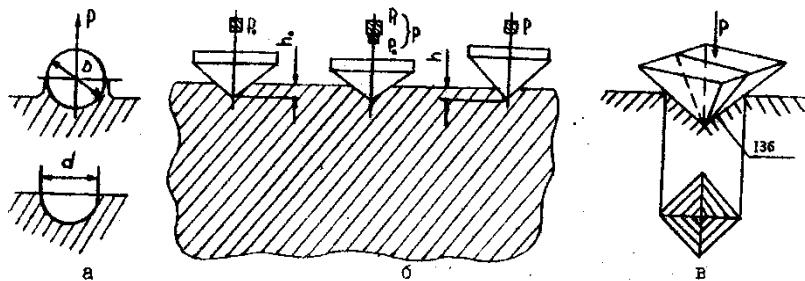
Цель работы: ознакомление с методикой определения твердости по методу Роквелла, определение механических свойств стали по ее твердости.

### **Содержание работы**

Студенту выдаются образцы сталей в отожженном и закаленном состояниях и сплавов цветных металлов. Он изучает устройство прибора, готовит образцы, выбирает нагрузку и наконечники, готовит прибор, проводит испытания, оформляет отчет.

## Техники безопасности

6. Все студенты, приступая к лабораторным работам, должны ознакомиться с правилами работы в лаборатории и расписаться в журнале по технике безопасности.
7. Работы проводятся только с разрешения преподавателя.
8. Все электроприборы должны быть заземлены.



9. Студенты обязаны осторожно обращаться с приборами и оборудованием.

10. По окончании работы приборы должны быть отключены от сети.

## Теоретические сведения

Твердостью называется свойство материала оказывать сопротивление местной пластической деформации при контактном воздействии в поверхностном слое. Измерение твердости вследствие быстроты и простоты осуществления, а также возможности без разрушения изделия суждения о его свойствах, получило широкое применение для контроля качества металлических изделий.

Существует несколько методов определения твердости.

*Определение твердости по Роквеллу HR (ГОСТ 9013-59 и ГОСТ 22975-78).* При этом методе твердость определяют по глубине отпечатка. Наконечником служит алмазный конус с углом при вершине 120° или стальной закаленный шарик ( $D = 1,588$  мм). Алмазный конус применяют для твердых, а шарик – для мягких металлов. Конус и шарик вдавливают двумя последовательными нагрузками (рис.3, б): предварительной  $P_0 = 100$  Н и общей  $P = P_0 + P_1$  (где  $P_1$  – основная нагрузка). Основная нагрузка для шарика 900 Н (шкала B), для алмазного конуса 1400 Н (шкала C) и 500 Н при испытании очень твердых и тонких металлов (шкала A). Твердость по Роквеллу измеряют в условных единицах. За единицу твердости принято значение осевого перемещения наконечника на 0,002 мм. Твердость по Роквеллу HR определяют по формулам  $HR = 100 - l$  (при измерении по шкалам A и C),  $HR = 130 - l$  (при измерении по шкале B). Значение  $l$ , мм:

$$l = \frac{h - h_0}{0,002},$$

где  $h$  – глубина внедрения наконечника в испытуемый материал под действием общей нагрузки  $P$ , измеренная после снятия основной нагрузки  $P_1$  с оставлением предварительной нагрузки  $P_0$ , мм;

$h_0$  – глубина внедрения наконечника в испытуемый материал под действием нагрузки  $P_0$ , мм.

Твердость по Роквеллу обозначается  $HRA$  при нагрузке 600 Н (испытание алмазным конусом).  $HRC$  при нагрузке 1500 Н и  $HRB$  при нагрузке 1000 Н (испытание стальным шариком). Значения твердости сразу считывают по шкале прибора.

Для определения твердости по Роквеллу широко применяется прибор ТК-2, так как он позволяет испытывать различные материалы, а также тонкие слои. Значения твердости по Роквеллу могут быть приближенно переведены в значения твердости по Бринеллю.

При испытании нагрузку и наконечник выбирают в зависимости от твердости испытываемого материала по табл. 2.

Таблица 2

Шкала	Вид наконечника	Нагрузка, Н	Обозначение твердости	Пределы измерения твердости в единицах HR
A	Алмазный конус	600	HRA	70-85
B	Стальной шарик	1000	HRB	25-100
C	Алмазный конус	1500	HRC	20-67

При испытании неответственных деталей твердостью (20-50)  $HRC$  допускается применение наконечника из твердого сплава.

Образец для испытаний должен иметь плоские и параллельные друг другу поверхности, без дефектов и окалины, поэтому сначала проводится зачистка поверхностей напильником, шлифовальным кругом или шлифовальной бумагой. Правильность показаний прибора периодически проверяют по эталонным образцам с известной твердостью.

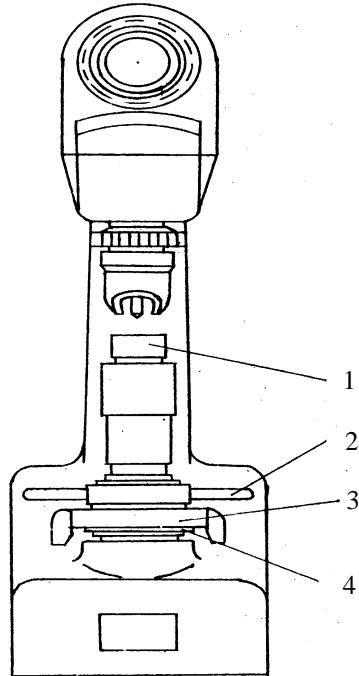


Рис. 4. Прибор ТК-2

Подготовленный образец помещают на столе прибора 1 (рис. 4), вращением маховика 2 по часовой стрелке устанавливают маленькую стрелку против красной точки, а вращением барабана 3 – нуль шкалы “С” против конца большой стрелки индикатора. Плавным нажатием на клавишу 4 включают привод механизма нагружения. После окончания цикла нагружения производят отсчет по шкале индикатора. Вращением маховика 2 опускают стол, и повторяют испытание не менее трех раз.

*Определение твердости при вдавливании алмазной пирамиды по Виккерсу HV (ГОСТ 2999-75).* Метод используют для определения твердости деталей малой толщины и тонких поверхностных слоев, имеющих высокую твердость. Твердость определяют, вдавливая в испытуемую поверхность (шлифованную или полированную) четырехгранную алмазную пирамиду (рис. 3, в), с углом при вершине  $136^\circ$ . Твердость по Виккерсу рассчитывают по формуле:

$$HV = 1,854 \frac{P}{d^2},$$

где  $P$  – нагрузка на пирамиду 50, 100, 200, 300, 500, 1000 или 1200 Н (обозначения:  $HV_5$ ,  $HV_{10}$ ,  $HV_{20}$  и т.д.);

$d$  – среднее арифметическое двух диагоналей отпечатка, измеряемых после снятия нагрузки, мм.

Чем тоньше материал, тем меньше должна быть нагрузка.

Твердость по Виккерсу определяется с помощью специальных таблиц по измеряемым значениям  $d$  в мм.

*Микротвердость* ( $H_\mu$ ). Определение микротвердости применяется для изделий мелких размеров и отдельных структурных составляющих сплавов. В испытуемую поверхность вдавливают алмазную пирамиду под нагрузкой 0,02-2 Н. Микротвердость  $H_\mu$  определяется по той же формуле, что и твердость по Виккерсу. Образцы для измерений подготавливаются так же, как микрошлифы.

## *Методика выполнения работы*

1. Провести испытания не менее трех раз на каждом образце.
  2. Перевести твердость по Роквеллу в твердость по Бринеллю по табл. 3.
  3. Определить свойства образцов, используя формулу

$$\sigma_6 = KHB,$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от материала. Для стали с твердостью  $120 \div 450 \text{ HB}$   $K \approx 0,34$ ; для меди, латуни, бронзы отожженных  $K \approx 0,55$ , наклепанных  $K \approx 0,40$ ; для алюминия и алюминиевых сплавов с твердостью  $20 \div 45 \text{ HB}$   $K \approx 0,35$ .

5. Внести результаты испытаний в таблицу следующей формы:

### Таблица записей результатов испытания

--	--	--	--	--	--	--	--

Таблица 3  
определяемых

Ориентировочный  
различными методами

перевод

значений

твердости,

HV, МПа	HB, МПа	HR по шкале			HV, МПа	HB, МПа	HR по шкале		
		C	A	B			C	A	B
12340	7800	72	84	--	2280	2290	20	61	100
11160	7450	70	83	--	2220	2230	19	60	99
10220	7120	68	82	--	2170	2170	17	60	98
9410	6820	66	81	--	2130	2120	15	59	97
8680	6730	64	80	--	2080	2070	14	59	95
8040	6270	62	79	--	2010	2010	13	58	94
7460	6010	60	78	--	1970	1970	12	58	93
6940	5780	58	78	--	1920	1920	11	57	92
6500	5550	56	77	--	1860	1870	9	57	92
6060	5340	54	76	--	1830	1830	8	56	90
5870	5140	52	75	--	1780	1790	7	56	90
5510	4950	50	74	--	1740	1740	6	55	89
5340	4770	49	74	--	1710	1700	4	55	88
5020	4610	48	73	--	1660	1670	3	54	87
4740	4440	46	73	--	1620	1630	2	53	86
4600	4290	45	72	--	1590	1590	1	53	85
4350	4150	43	72	--	1550	1560	-	-	84
4230	4010	42	71	--	1520	1520	-	-	83
4010	3880	41	71	--	1490	1490	-	-	82
3900	3750	40	70	--	1480	1460	-	-	81
3860	3630	39	70	--	1430	1430	-	-	80
3610	3520	38	69	--	1400	1400	-	-	79
3440	3410	36	68	--	1380	1370	-	-	78
3340	3310	35	67	--	1340	1340	-	-	77
3200	3210	33	67	--	1310	1310	-	-	76
3110	3110	32	66	--	1290	1280	-	-	75
3030	3020	31	66	--	1270	1260	-	-	74
2920	2930	30	65	--	1230	1230	-	-	73
2850	2850	29	65	--	1210	1210	-	-	72
2780	2770	28	64	--	1180	1180	-	-	71
2700	2690	27	64	--	1160	1160	-	-	70
2610	2620	26	63	--	1150	1140	-	-	68
2550	2550	25	63	--	1130	1110	-	-	67
2490	2480	24	62	--	1100	1100	-	-	66
2400	2410	23	62	102	1090	1090	-	-	65
2350	2350	21	61	101	1080	1070	-	-	64

### Необходимое оборудование и материалы

1. Твердомер типа ТК-2.
2. Портативный твердомер ТН 170.
3. Образцы сплавов цветных металлов и сталей в отожженном и закаленном состояниях.
4. Шлифовальная бумага.

### Содержание отчета

1. Краткая характеристика методов определения твердости металлов.
2. Таблица испытаний твердости образцов металлов.
3. Определение механических свойства материалов.

### Контрольные вопросы

1. Какие методы определения твердости Вам известны?
2. Каковы единицы измерения твердости, определяемой различными способами?
3. По каким формулам определяются числа твердости по различным методам?
4. Как проводится подготовка образца для измерении твердости?
5. Как проводятся испытания твердости на приборе ТК-2?
6. В каких случаях используют при измерении шарик, алмазный конус, твердосплавный конус?
7. Почему измерения твердости по Бринеллю нельзя применять для тонких образцов?
8. Почему широко применяется метод измерения твердости по методу Роквелла?
9. Каковы зависимости между твердостью и пределом прочности?

# Практическая работа 1

## ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ ОХЛАЖДЕНИЯ

### СПЛАВОВ ЖЕЛЕЗО-ЦЕМЕНТИТ

Цель работы: ознакомление с принципами построения диаграмм состояния сплавов, изучение диаграммы состояния железо-цементит и превращений в железоуглеродистых сплавах в равновесных условиях.

#### Содержание работы

Студент изучает диаграмму состояния железо-цементит, строит кривую охлаждения (или нагрева) сплава заданного состава, зарисовывает структуру сплава при комнатной температуре.

#### Теоретические сведения

Существует много методов построения диаграммы состояния (дилатометрический, электрический, магнитотермический, термический и др.). Сущность любого из них сводится к нахождению критических точек при нагреве или охлаждении металлов и сплавов. Критическими точками называются температуры, при которых начинаются и/или заканчиваются какие-либо превращения в сплавах. Определив экспериментально критические точки серии сплавов, строят полную диаграмму состояния в координатах "температура – концентрация".

Диаграмма состояния железо-цементит (рис. 5) охватывает сплавы, содержащие углерод в количестве от 0 до 6,67 %. При содержании 6,67 % углерода он образует химическое соединение с железом  $Fe_3C$  – карбид железа, называемый также цементитом. Один из компонентов сплавов – железо – имеет несколько аллотропических модификаций: до 911 °С железо имеет объемноцентрированную кубическую (ОЦК) кристаллическую решетку с периодом 0,286 нм, в интервале температур 911-1392 °С – гранецентрированную кубическую (ГЦК) кристаллическую решетку, а

\*Здесь и далее приведены массовые %.

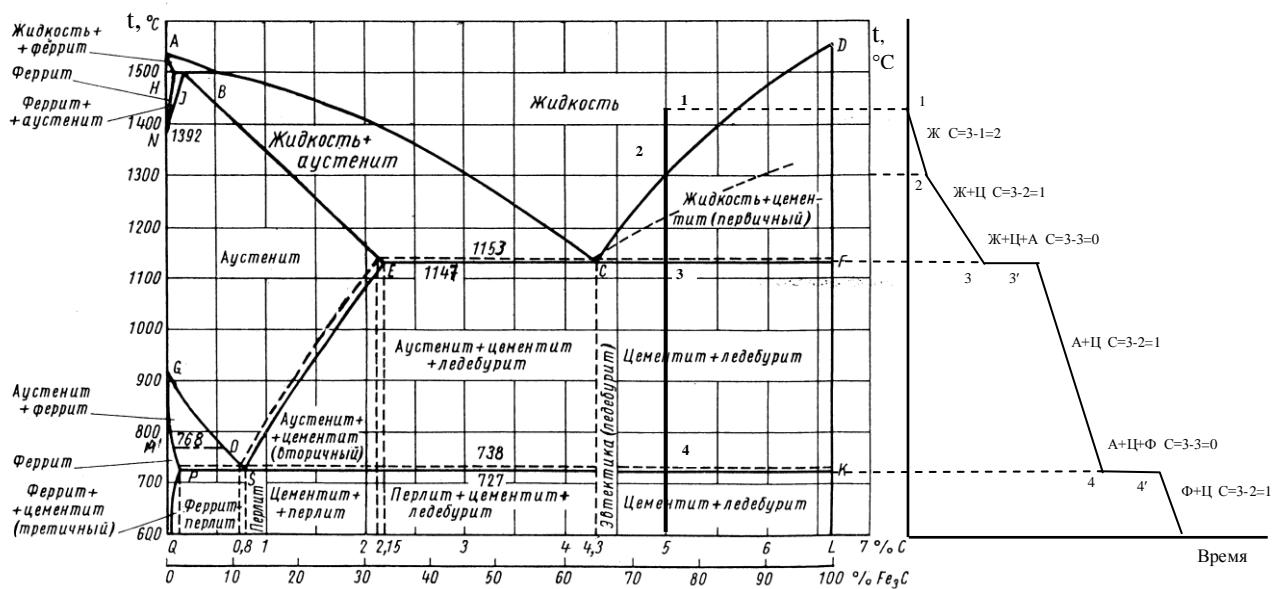


Рис. 5. Диаграмма состояния системы железо – цементит (слева) и кривая охлаждения чугуна содержащего 5 % углерода (справа)

выше 1392 °С – снова объемноцентрированную кубическую кристаллическую решетку, но с другим периодом – 0,293 нм.

В зависимости от содержания углерода железоуглеродистые сплавы подразделяются на техническое железо ( $\leq 0,02\% C$ ), углеродистые стали (от 0,02 до 2,14 % C) и чугуны (от 2,14 до 6,67 % C). Стали в свою очередь подразделяются на доэвтектоидные (0,02-0,8 % C), эвтектоидные (0,8 % C), заэвтектоидные (0,8-2,14 % C). Чугуны бывают доэвтектическими (2,14-4,3 % C), эвтектическими (4,30 % C), заэвтектическими (4,30-6,67 % C).

Процессы, происходящие в сплавах при их фазовых превращениях, подчинены общему закону равновесия, который носит название правила фаз и выражает зависимость числа степеней свободы системы «с» от количества компонентов «к», фаз « $\phi$ » и внешних переменных факторов « $n$ » в условиях равновесия:

$$c = k + n - \phi.$$

При рассмотрении равновесия в металлических сплавах, находящихся под воздействием атмосферного давления, единственным внешним переменным фактором является температура и поэтому  $n = 1$ . Система железо-цементит является двухкомпонентной, то есть  $k = 2$ . Отсюда следует, что

$$c = 2 + 1 - \phi = 3 - \phi.$$

Для построения кривой охлаждения (или нагрева) сплава прежде всего необходимо найти на концентрационной оси диаграммы состояния координату, соответствующую содержанию углерода в сплаве. Затем из найденной точки следует восстановить перпендикуляр до области существования жидкой фазы. Кривая охлаждения (или нагрева) строится справа от диаграммы состояния в координатах температура (ось абсцисс) - время (ось ординат). Масштаб оси времени произвольный, а масштаб оси температуры такой же, как и на диаграмме состояния.

Во время охлаждения сплава в нем происходят фазовые превращения. Каждое превращение протекает за определенный промежуток времени, поэтому соответствующие им участки кривой охлаждения имеют различные углы наклона по отношению к горизонтальной оси. Чем быстрее происходит превращение, тем круче кривая. Перитектическое, эвтектическое и эвтектоидное превращения идут во времени при постоянной температуре (так как  $c = 0$ ), следовательно им на кривой охлаждения будут соответствовать горизонтальные участки.

Построение кривой охлаждения рассмотрим на примере чугуна, содержащего 5 % углерода (рис. 5). Восстанавливаем перпендикуляр из отметки 5 % углерода на оси абсцисс до точки 1, находящейся в области жидкого состояния сплавов. Переносим пунктиром температуру точки 1 на ось температур нашего графика. В точке 1 рассматриваемый сплав находится в жидком состоянии (то есть существует только одна фаза – жидкий раствор углерода в железе), следовательно  $c = 3 - 1 = 2$ . При двух степенях свободы равновесие в системе не нарушается даже при одновременном изменении температуры и концентрации сплава в определенных пределах. При понижении температуры в сплаве не будет происходить никаких превращений, и температура будет падать быстро, кривая охлаждения идет круто вниз до точки 2.

Точкой 2 обозначено пересечение нашей вертикали с линией CD диаграммы состояния, соответствующей началу кристаллизации цементита. Следовательно, в сплаве появляется вторая фаза – цементит, число степеней свободы уменьшается ( $c = 3 - 2 = 1$ ), кривая охлаждения станет более пологой до температуры, соответствующей следующей критической точке 3. На участке кривой 1-2 указываем фазовое состояние сплава “ж” и число степеней свободы, равное 2, соответственно на участке 2-3 фазовое состояние “ж+ц”, а число степеней свободы  $c = 1$ . При изменении температуры в пределах точек 2 и 3 изменяется соотношение между жидкой и твердой фазами, но равновесие не нарушается.

Точка 3 (пересечение вертикали с линией ECF) соответствует эвтектическому превращению, то есть совместной кристаллизации цементита и аустенита с образованием ледебурита. При этом одновременно существуют три фазы – жидкость, цементит и аустенит, следовательно число степеней свободы  $c = 3 - 3 = 0$ , и система нонвариантна, три фазы могут находиться в равновесии только при строго постоянной температуре. На кривой охлаждения это отражено отрезком 3-3'.

Между точками 3 и 4 сплав имеет двухфазное состояние (аустенит и цементит) и  $c = 3 - 2 = 1$ . При температуре, соответствующей точке 4, в сплаве происходит эвтектоидное превращение, аналогичное эвтектическому. Отличие только в том, что в нем участвуют только твердые фазы – аустенит, цементит и феррит. На кривой охлаждения делаем соответствующие записи.

## **Содержание отчета**

1. Диаграмма состояния железо-цементит с обозначением критических точек и областей диаграммы.
2. Кривая охлаждения (или нагрева) сплава с заданной концентрацией углерода.
3. Определение феррита, аустенита, перлита, ледебурита и зарисовка их структур.

## **Контрольные вопросы**

1. Что такое фаза?
2. Что называется структурной составляющей?
3. Дайте определения понятиям: феррит, аустенит, цементит, перлит, ледебурит.
4. Что такое критическая точка?
5. Как обозначаются критические точки?
6. Что такое эвтектическое превращение?
7. Чем эвтектоидное превращение отличается от эвтектического?
8. Напишите и расшифруйте правило фаз.
9. Как строятся кривые охлаждения?

# Лабораторная работа 3

## ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

### УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ (закалка и отпуск углеродистой стали)

Цель работы: ознакомление с основными видами термической обработки сталей, определение зависимости твердости сталей от вида и параметров режима термической обработки и содержания углерода.

## Содержание работы

Студент проводит термическую обработку нескольких образцов углеродистой стали и определяет твердость стали в отожженном, закаленном и отпущенном состояниях.

## Техника безопасности

1. Работы проводить только с разрешения преподавателя.
  2. Для укладки и выемки образцов из печи использовать специальные щипцы.
  3. Не открывать дверцы печи в процессе нагрева образца.

После окончания работы выключить печь и убрать рабочее место.

## *Порядок выполнения работы*

1. Провести замер твердости у исходных отожженных образцов двух марок сталей на приборе Роквелла по шкале С. За величину твердости исследуемой стали принимается средняя арифметическая трех замеров на каждом образце. Твердость измеряется только на торце цилиндрического образца. Перед измерением твердости с поверхности удалить окалину абразивным кругом. На стол установить испытуемое изделие и вращением маховика поднимать его к наконечнику до тех пор, пока малая стрелка индикатора не станет против красной точки, а большая с погрешностью  $\pm 5$  делений – на нуль шкалы индикатора. Если большая стрелка отклонилась больше чем на 5 делений относительно нулевого штриха шкалы, необходимо опустить стол и начать испытание на новом месте. Плавным нажатием включить привод механизма нагружения. После окончания цикла нагружения произвести отсчет твердости по шкале индикатора. Вращением маховика против часовой стрелки испытуемое изделие отвести от наконечника и снять со стола.

2. Выбрать по диаграмме состояния системы железо-цементит температуру нагрева стали под закалку (рис. 8).

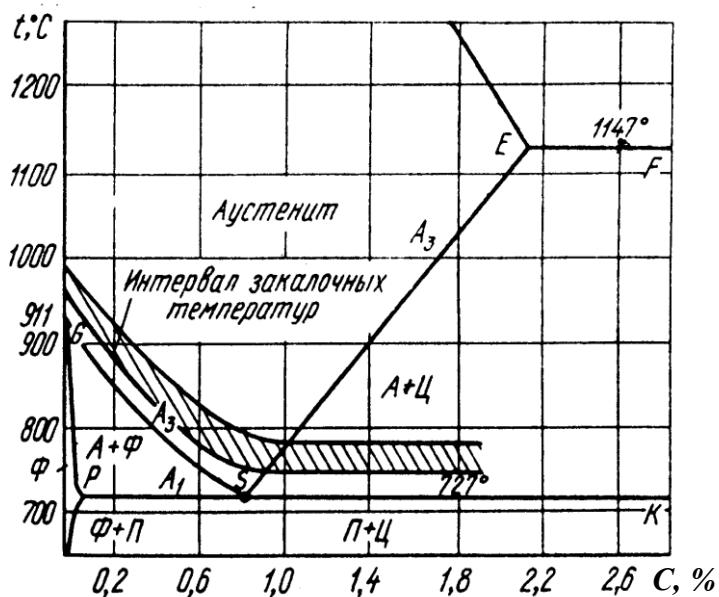


Рис. 8. Интервал закалочных температур углеродистой стали

3. Назначить продолжительность нагрева по табл. 4.
  4. Провести операцию закалки. Для этого в электропечь, нагретую до выбранной температуры, заложить образцы и выдержать их там в течение рассчитанного времени. Температуру контролировать с помощью термопары.

Таблица 4  
Продолжительность нагрева стали в зависимости от температуры, формы и размеров детали

Температура нагрева, °C	Форма изделия		
	круг	квадрат	пластина

	Продолжительность нагрева, мин			
	на 1 мм диаметра	на 1 мм толщины		
600	2,0	3,0	4	
700	1,5	2,2	3	
800	1,0	1,5	2	
900	0,8	1,2	1,6	
1000	0,4	0,6	0,8	

5. Вынуть образцы из печи щипцами и быстро погрузить в емкость с жидкостью, выдержать их там до полного охлаждения. Измерить твердость закаленных образцов и внести результаты в таблицу следующей формы:

Вид термической обработки	Режим термической обработки			Марка стали	Номер образца	Номер замера	Твердость HRC
	$t, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{мин}$	Охлаждающая среда				

6. Провести отпуск стали, поместив образцы в печи, предварительно нагретые до 200, 400 и 600  $^\circ\text{C}$ , и выдержав их там в течение 30 мин. Охладить образцы на воздухе.

7. Определить твердость образцов после отпуска. Результаты испытаний занести в ту же таблицу.

8. Построить график зависимости твердости от параметров режимов термической обработки для сталей с различным содержанием углерода.

9. Рассмотреть микроструктуры сталей после термической обработки.

### Необходимое оборудование и материалы

- Образцы среднеуглеродистой и высокоуглеродистой стали. Марка стали указывается преподавателем.
- Муфельные электропечи для отжига, закалки и отпуска образцов.
- Емкости с охлаждающими жидкостями.
- Щипцы.
- Твердомер типа ТК-2.
- Портативный твердомер ТН 170
- Микрошлифы термообработанных сталей.
- Металлографический микроскоп.

### Содержание отчета

- План выполнения работы.
- Таблицы с результатами замера твердости образцов.
- Графики зависимости твердости от температуры отпуска для двух различных сталей.
- Зарисовка микроструктур закаленных и отпущенных сталей с указанием структурных составляющих.
- Вывод о влиянии на твердость закаленной стали содержания углерода и температуры отпуска.

### Контрольные вопросы

- Основные виды термической обработки.
  - Основные параметры, характеризующие различные виды термической обработки сталей.
- Какие охлаждающие среды применяются при различных видах термической обработки?
- Что такое перлит, сорбит, троостит, бейнит, мартенсит?
  - Что называется критической скоростью закалки?
  - Что такое отпуск? Какие виды отпуска вы знаете?
  - Как проводится отжиг сталей?
  - Что называется закаливаемостью стали?
  - Как определить температуру нагрева стали под закалку?

## Лабораторная работа 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОКАЛИВАЕМОСТИ СТАЛИ

Цель работы: освоение метода торцовой закалки, применяемого для определения прокаливаемости сталей.

#### Содержание работы

Студент закаливает образец в специальной установке, измеряет твердость по длине образца, строит кривую прокаливаемости и определяет величину критического диаметра.

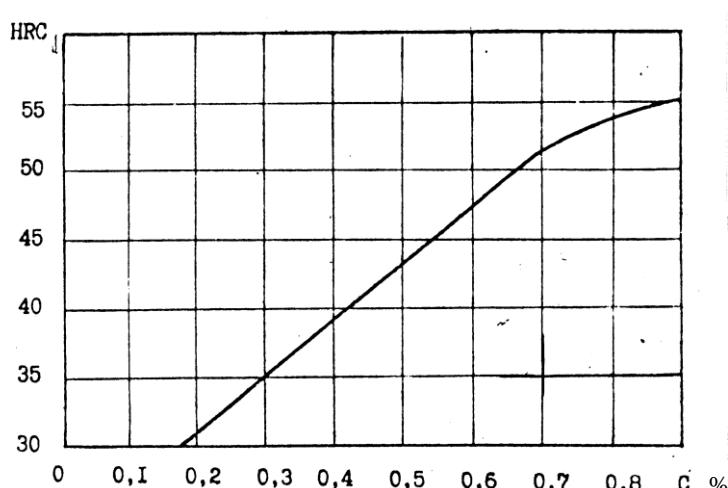
##### Техника безопасности при выполнении работы

1. Работу проводить в защитном фартуке и очках.
2. Для укладки и выемки образцов из печи применять специальные щипцы.
3. При охлаждении образца находиться на расстоянии не менее 1 м от установки.
4. После окончания работы выключить печь и убрать рабочее место.

#### Теоретические сведения

Прокаливаемостью называется способность стали закаливаться на определенную глубину. За глубину закалки конструкционной стали обычно принимают расстояние от поверхности образца до слоя с полумартенситной структурой (50 % мартенсита и 50 % троостита). Твердость полумартенситной стали зависит от содержания углерода (рис. 9) и мало зависит от содержания легирующих элементов.

Прокаливаемость является одним из основных критериев при выборе марки стали для изготовления той или иной детали. Прокаливаемость сталей зависит от химического состава, величины зерна, скорости охлаждения при закалке, температуры нагрева и других факторов. Существует несколько методов определения прокаливаемости. Наиболее простым и удобным является метод торцовой закалки. Он дает вполне надежные результаты с высокой воспроизводимостью и может применяться для всех сталей, кроме закаливающихся на воздухе. Метод торцовой закалки (по Джомини) приведен в ГОСТ 5657-81.



Государственным стандартом установлены форма и образца, температура и время нагрева под закалку, охлаждающая среда и продолжительность охлаждения, параметры испытательной установки, правила измерения твердости.

Эскиз стандартного образца с фланцем для определения прокаливаемости приведен на рис. 10. Вся поверхность образца и особенно торца, охлаждаемого водой, должна быть чисто обработана, а образец предварительно должен быть подвергнут нормализации. Температура нагрева для закалки выбирается в зависимости от химического состава стали, например, для углеродистой стали с

Рис. 9. Зависимость твердости полумартенситной зоны от содержания углерода

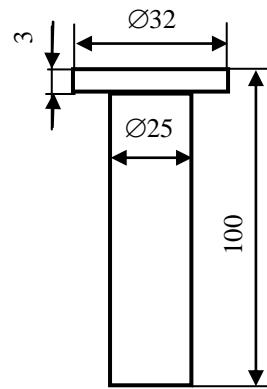


Рис. 10 Образец основные

массовой долей углерода 0,4 % она равна 820 °С. Время выдержки образца в печи 30 мин. После выдержки образцы охлаждают в специальной установке (рис. 11), причем время от извлечения образца из печи до начала охлаждения не должно превышать 5 с.

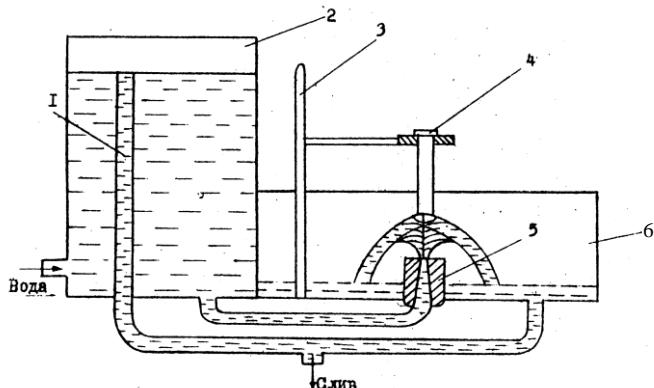


Рис. 11. Схема установки для торцовой закалки

Вода из водопроводного крана подается в напорный бачок 2, в котором постоянный уровень воды поддерживается с помощью уравнительной трубы 1. Стандартный образец 4 устанавливается в кронштейне 3. Вода, выходящая под постоянным напором из сопла 5, омывает торец образца и сливается в канализацию из сливной коробки 6. Основные параметры установки: диаметр сопла 12,5 мм, расстояние от сопла до торца образца тоже 12,5 мм, высота свободной струи воды (без образца) 65-70 мм. Струя воды, имеющей температуру 10-25 °С, должна попадать в центр торца образца. Образец должен находиться в установке до полного охлаждения, на что требуется 10-15 мин. Скорость охлаждения образца в разных точках будет различной. У закаливаемого торца она соответствует охлаждению в воде (1000 °С/с), а на другом конце – скорости охлаждения на воздухе (3-4 °С/с), остальные участки охлаждаются с промежуточной скоростью.

После закалки образец подвергается испытанию на твердость. Для этого по длине образца с двух противоположных сторон сошлифовывают на глубину 0,25-0,5 мм две лыски, чтобы получить плоские площадки для измерения твердости вдоль образца. Во время шлифования во избежание отпуска образец не должен нагреваться. Измерение твердости по Роквеллу производится от закаленного торца вдоль средней линии обеих лысок через каждые 1,5 мм для первых десяти точек, а затем через 3 мм. Измерения прекращают через 3-4 точки после достижения твердости полумартенситной зоны. Для каждой пары точек, находящихся на одинаковом расстоянии от торца, рассчитывают среднее значение, и результаты заносят в нижеприведенную таблицу.

Номер измерения	Расстояние от закаленного торца, мм	Твердость, HRC		
		1-я лыска	2-я лыска	Среднее значение
1	1,5			
2	3			
3	4,5			
...	...			

По полученным данным распределения твердости по длине образца строят кривую в координатах твердость – расстояние от закаленного торца. Для построения графика используют среднее арифметическое значение твердости. Кривая на графике должна быть плавной, проходящей максимально близко ко всем экспериментальным точкам. Исключением являются только точки, лежащие выше предыдущих, что является скорее всего ошибкой измерения.

Для облегчения построения графика и правильного проведения кривой через экспериментальные точки можно воспользоваться программой INTERPOL на персональном компьютере. После загрузки программы по ее запросам вводится число экспериментальных точек и значения координат этих точек. Затем выбирается интерполирующая формула из 19 предложенных. В данной работе следует выбрать полином 2-5 степени. Коэффициент корреляции обычно (но не всегда) увеличивается с повышением степени полинома и в идеале равен 1. Надо проверить полиномы с разными степенями и выбрать тот, который имеет наибольший коэффициент корреляции. Другие формулы могут дать удовлетворительную корреляцию лишь случайно.

Полученный график называется кривой прокаливаемости. По нему можно определить показатель (индекс) прокаливаемости по Джомини. Один из пяти вариантов показателя представляет

собой твердость HRC на заданном расстоянии  $l$  от охлаждаемого торца:  $\Pi \frac{HRC}{l}$ . Например,  $\Pi \frac{60}{10}$  означает, что образец имеет твердость 60 HRC на расстоянии 10 мм от торца.

По специальной номограмме, предложенной М. Е. Блантером, можно определить критический диаметр (максимальный диаметр образца, при котором в данном охладителе в центре образца получается мартенситная структура) в зависимости от формы тела (шар, цилиндр, брусков с разными соотношениями  $L/D$  или  $L/a$ ) и охлаждающей среды (воздух, минеральное масло, вода при разной температуре, водный раствор щелочи или соли, “идеальная” охлаждающая жидкость). Все оси номограммы строятся в логарифмических координатах

На рис. 12 приведен упрощенный вариант номограммы Блантера для определения критического диаметра при закалке цилиндра с соотношением  $L/D$  равным 4 для трех различных реальных охлаждающих сред (вода при  $20^{\circ}\text{C}$ , минеральное масло и воздух). “Идеальное охлаждение” происходит в гипотетической охлаждающей жидкости, отнимающей тепло с бесконечно большой скоростью.

Правила пользования номограммой рассмотрим на следующем примере. Примем, что в опыте по торцовой закалке мы получили расстояние от торца образца до полумартенситной зоны равным 20 мм. Отложим эту величину на шкале, помещенной в верхней части диаграммы. От найденной точки опускаем перпендикуляр до пересечения с наклонной линией, обозначенной как “идеальное охлаждение”. От точки пересечения проводим влево горизонтальную линию до пересечения с линией реальной охлаждающей среды (например, минеральное масло). От последней точки пересечения опускаем перпендикуляр до шкалы “критический диаметр”, и получаем значение 52 мм. Попутно можем определить, что идеальный критический диаметр равен 84 мм.

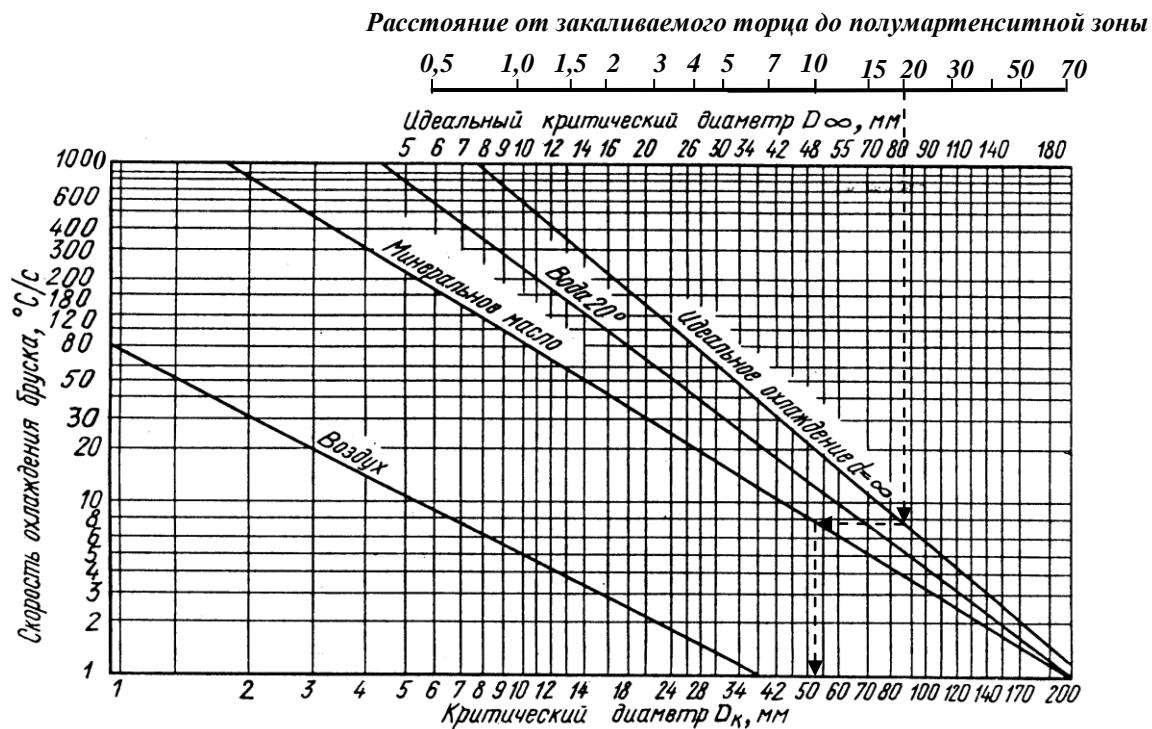


Рис. 12. Номограмма для определения прокаливаемости

### *Методика выполнения работы*

1. Поместить стандартный образец в печь и прогреть его.
2. Извлечь образец из печи и быстро перенести в установку для торцовой закалки.
3. Пустить воду и полностью охладить образец.
4. Сошлифовать по длине образца с диаметрально противоположных сторон две лыски.
5. Измерить твердость образца вдоль обеих лысок и заполнить таблицу.
6. Построить кривую прокаливаемости.
7. Найти с помощью номограммы Блантера критические диаметры для условий заданных преподавателем.

### **Необходимое оборудование и материалы**

1. Муфельная печь для нагрева образца.
2. Установка для проведения торцовой закалки.
3. Твердомер Роквелла. типа ТК-2.
4. Портативный твердомер ТН 170
5. Закаливаемый образец.
6. Шлифовальный круг.
7. Номограмма Блантера.

### **Содержание отчета**

1. Краткое описание проведенной работы.
2. Эскиз установки для испытания стали на прокаливаемость методом торцовой закалки.
3. Таблица замеров твердости образца.
4. График распределения твердости по длине образца с указанием числа прокаливаемости.
5. Критические диаметры тел различной формы и размеров при охлаждении в различных средах.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое прокаливаемость стали?
2. Какова структура закаленного слоя?
3. Назовите главные факторы, влияющие на прокаливаемость стали.
4. Что называется критическим диаметром закалки?
5. В какой закалочной среде прокаливаемость имеет наибольшую величину?
6. Как влияет перегрев аустенита на прокаливаемость?
7. Можно ли в целях увеличения прокаливаемости рекомендовать высокие температуры нагрева под закалку?

## **Лабораторная работа 5**

### **Магнитная дефектоскопия**

**Цель занятия:** Ознакомиться с контролем деталей методом магнитной дефектоскопии, применяемыми способами намагничивания, принципом работы магнитного дефектоскопа, магнитными порошками и суспензиями и методикой магнитной дефектоскопии.

**Материально-техническое обеспечение:** 1) Самохощкий А.И. Кунявский М.Н. «Лабораторные работы по металловедению и термической обработке металлов»

**Ход работы, задание:**

1. Изучить устройство магнитного дефектоскопа и сущность магнитного порошкового контроля ([4] стр.27-30).
2. Ознакомиться с применяемыми способами намагничивания.
3. Магнитные порошки и суспензии применяемые при магнитно порошковом методе контроля.
4. Характеристика выявляемых дефектов.

Подготовить в отчете ответы на вопросы:

1. На каком физическом явлении основаны методы магнитной дефектоскопии?
2. Укажите состав и назначение дефектоскопических материалов (магнитных порошков и суспензий).
3. Назовите основные технологические операции магнитно порошкового метода контроля.
4. Перечислите оборудование для магнитной дефектоскопии.

**Оформление работы:**

Отчет оформляется в тетради для теоретических занятий в соответствии с пунктами задания.

## **Лабораторная работа 6**

### **Ультразвуковая дефектоскопия**

**Цель занятия:** Ознакомиться с контролем деталей методом ультразвуковой дефектоскопии, принципом работы ультразвукового дефектоскопа и методикой ультразвуковой дефектоскопии.

**Материально-техническое обеспечение:** 1) Самохощкий А.И. Кунявский М.Н. «Лабораторные работы по металловедению и термической обработке металлов»

**Ход работы, задание:**

1. Изучить устройство ультразвукового дефектоскопа и сущность ультразвукового контроля ([4] стр.31-37).
2. Ознакомиться с принципом работы ультразвукового дефектоскопа и методикой ультразвуковой дефектоскопии.
3. Характеристика выявляемых дефектов.

Подготовить в отчете ответы на вопросы:

1. На каком физическом явлении основаны методы ультразвуковой дефектоскопии.
2. Укажите устройство и назначение ультразвукового дефектоскопа.

3. Назовите основные технологические операции ультразвукового метода дефектоскопии.

4. Перечислите оборудование для ультразвуковой дефектоскопии.

### **Оформление работы:**

Отчет оформляется в тетради для теоретических занятий в соответствии с пунктами задания.

## **Лабораторная работа 7** **МАКРОСКОПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛОВ**

Цель работы: ознакомление с макроскопическим анализом, изучение характерных макроструктур.

### **Содержание работы**

Студенту выдаются готовые протравленные макрошлифы. Он изучает их, определяет методы травления, зарисовывает микроструктуры с пояснениями.

### **Теоретические сведения**

Макроструктурой называется строение металла, видимое без увеличения или при небольшом увеличении до 10-30 раз с помощью лупы.

Макроструктура исследуется непосредственно на поверхности изделия, на изломе или на специально подготовленном образце (темплете), который называется макрошлифом. Макрошлиф получают после шлифования и последующего травления поверхности специальными реактивами.

Макроанализ применяется для выявления дендритного строения литьих деталей, газовых пузирей, пустот, трещин, шлаковых включений, структурной неоднородности, качества сварных соединений, ликвации серы и фосфора, расположения волокон в поковках, штамповках и т.д.

#### *Порядок приготовления макрошлифов*

1. Вырезка образца в определенном месте детали в зависимости от цели проводимых исследований, обработка исследуемой поверхности вручную или на металорежущем станке.

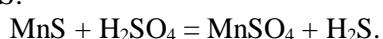
2. Последовательное шлифование на шлифовальных бумагах с постепенно уменьшающимся размером зерен абразива.

3. Промывка, обезжикивание спиртом, травление, промывка и просушка.

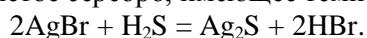
#### *Методы травления.*

*Выявление ликвации серы.* Для выявления в стали ликвации серы применяют метод Баумана. Макрошлиф протирают ватой, смоченной в спирте. На поверхность макрошлифа накладывают лист фотобумаги, вымоченной в течение 5-10 мин в водном растворе с массовой долей серной кислоты 5 %, проглаживают резиновым валиком для удаления излишков раствора и пузирьков газа, выдерживают 2-3 мин и осторожно снимают.

Отпечаток промывают в воде, фиксируют в растворе с массовой долей гипосульфита 25 %, снова промывают и высушивают. Коричневые пятна на фотобумаге соответствуют участкам поверхности шлифа, обогащенным серой. Фотобумага окрашивается в результате взаимодействия серной кислоты и MnS:



Сероводород действует на бромистое серебро эмульсионного слоя и при этом образуется сернистое серебро, имеющее темно-коричневый цвет:



*Выявление ликвации фосфора.* Поверхность образца протирают ватой, смоченной спиртом; образец погружают на 1-2 мин в раствор состава: 85 г хлористой меди, 53 г хлористого аммония в 1000 см<sup>3</sup> воды. В результате обменной реакции железа с раствором на поверхности образца осаждается слой

меди. Образец вынимают из реактива, протирают ватой под струей воды для удаления слоя меди, и просушивают.

Более темные участки на поверхности макрошлифа обогащены фосфором. На светлых участках содержание фосфора меньше.

*Выявление строения литой стали.* Дендритное строение литой стали выявляют травлением в водном растворе с массовой долей персульфата аммония 15 %, предварительно подогретом до 80-90 °С. Образец погружают в горячий раствор на 10-15 мин, затем промывают водой и просушивают.

*Выявление волокнистого строения стали.* Для выявления волокнистости применяют реактив и методику для выявления ликвации фосфора, описанные выше.

*Выявление структуры сварного шва на углеродистых сталях.* Для выявления структуры сварного шва на углеродистых сталях применяют спиртовой раствор с массовой долей азотной кислоты 4 %. Макрошлиф травят, протирая ватным тампоном, смоченным в реактиве, или погружая в реактив с последующей промывкой в воде и сушкой. Продолжительность травления до тридцати минут.

*Выявление ликвации углерода или глубины закаленного слоя.* Для выявления ликвации углерода или глубины закаленного слоя применяют реактив Гейне, содержащий 35 г CuCl<sub>2</sub> и 53 г NH<sub>4</sub>Cl в 1000 см<sup>3</sup> воды. Образец погружают в реактив. В результате обменной реакции поверхность покрывается слоем меди. На участках обогащенных углеродом, закаленных или имеющих дефекты (поры, раковины, трещины и т.п.), медь выделяется менее интенсивно и не защищает поверхность от травления хлористым аммонием. Эти участки окрашиваются в темный цвет. Таким реактивом можно выявлять также структуру сварного шва и зоны термического воздействия.

*Выявление дефектов, нарушающих сплошность металла.* Для выявления дефектов на изделиях из углеродистых и низколегированных сталей нужен реактив, состоящий из 4-10 см<sup>3</sup> азотной кислоты и 90-96 см<sup>3</sup> воды. Травитель применяют в холодном состоянии. Продолжительность травления до 30 мин. Макрошлиф погружают в раствор или протирают его поверхность ватным тампоном, смоченным в реактиве, промывают и сушат. Для более контрастного выявления структуры полезна тонкая шлифовка или полировка.

#### *Методика выполнения работы*

1. Получить у преподавателя комплект готовых проправленных макрошлифов.
2. Исследовать и зарисовать макроструктуру деталей:
  - а) после сварки трением;
  - б) после электродуговой сварки;
  - в) после наплавки металла на основном металле;
  - г) после цементации.
3. Привести режим травления каждого макрошлифа.
4. Зарисовать характерные изломы:
  - а) усталостный;
  - б) хрупкий с указанием структуры излома.

#### **Содержание отчета**

1. Описание методики выявления структуры макрошлифа.
2. Зарисовка и характеристика макроструктуры.

#### **Контрольные вопросы**

2. Что называется макроструктурой?
3. Что представляет собой макрошлиф?
3. Что можно выявить на отполированном, но не проправленном макрошлифе?
4. С какой целью макрошлиф подвергают травлению?
5. Может ли макрошлиф помочь определить причину брака, допущенного при изготовлении детали?
6. Что дает изучение макрошлифа?
7. Можно ли по виду макроструктуры определить, какой обработке подвергся исследуемый образец?

8. Можно ли исследовать макроструктуру массивной детали без ее разрушения?
9. Основные этапы подготовки макрошлифа?
10. Что можно определить по виду излома?

## **Лабораторная работа 8** **МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛОВ**

Цель работы: ознакомление с микроскопическим анализом, овладение приемами работы на металлографическом микроскопе.

### **Содержание работы**

Студент изучает устройство микроскопа, его оптическую схему, правила обращения с микрошлифами и работы на металлографическом микроскопе. Проводит рабочую настройку микроскопа, зарисовывает увиденную микроструктуру, определяет увеличение микроскопа.

### **Теоретические сведения**

Микроанализ – это исследование металлов и сплавов при помощи оптических микроскопов с увеличением от 50 до 2000 раз. Строение металлов, выявленное с помощью микроскопа, носит название микроструктуры. Изучение микроструктуры позволяет обнаружить пороки строения, изменение внутреннего строения металла и сплава при механическом, термическом и других видах воздействия. Для выявления микроструктуры металлов готовят специальные образцы, называемые микрошлифами.

#### *Порядок приготовления микрошлифов*

1. Вырезка образцов вручную или на металлорежущем станке из наиболее важного для исследования участка детали. Оптимальные размеры образцов – цилиндр диаметром 10-12 мм и высотой 10-15 мм или куб со стороной 10-15 мм.

2. Получение плоской поверхности при помощи напильника или обработки на абразивном круге.

3. Последовательная обработка на шлифовальных бумагах с постепенно уменьшающимся размером зерен абразива, положенных на твердую плоскую поверхность. При переходе с одного номера бумаги на другой шлиф поворачивают на 90° и шлифуют до полного удаления рисок, полученных в процессе предыдущей обработки. Наряду с ручным шлифованием существует и механическое – на специальных шлифовальных станках. При каждом переходе к следующему номеру бумаги следует тщательная промывка шлифа водой для удаления оставшихся на поверхности абразивных зерен.

4. Полирование на быстровращающихся дисках, обтянутых замшей, фетром или мягким сукном, или вручную на мягкой ткани с применением шлифующих смесей (пасты ГОИ, порошки оксидов, карбидов, искусственных или естественных алмазов). Полирование считается законченным, если при рассмотрении поверхности шлифа в микроскопе риски не обнаруживаются.

5. Промывка водой, обезжикивание спиртом, просушка фильтровальной бумагой.

6. Травление полированной поверхности специальным реагентом для выявления микроструктуры. Реактивы выбирают в зависимости от состава исследуемого сплава, его структурного состояния и цели исследования. Так, например, для травления углеродистой стали применяется спиртовой раствор с массовой долей азотной кислоты 4 %; для алюминиевых сплавов – водный раствор с массовой долей фтористоводородной кислоты 0,5 %.

Различные структурные составляющие, подвергшиеся воздействию реагента в неодинаковой степени, по-разному отражают свет. Структура, травящаяся сильнее, кажется под микроскопом более темной, так как рассеивает свет сильнее, чем слабо травящаяся. Границы зерен чистых металлов и твердых растворов выглядят под микроскопом в виде тонкой сетки, поскольку на них сосредоточены многочисленные дефекты кристаллической решетки и здесь атомы металла легко переходят в раствор.

7. Тщательная и возможно быстрая промывка шлифа водой и спиртом для удаления остатков реактива и сушка.

#### *Правила обращения с микрошлифами*

Для предотвращения преждевременной порчи микрошлифов необходимо соблюдать следующие правила.

1. Шлифы должны храниться комплектами в коробочках на слое ваты. Запрещается нарушать комплектность и перекладывать шлифы из одной коробочки в другую. Микрошлиф можно брать из коробочки только за боковую поверхность и ставить только на предметный столик микроскопа.

2. Во избежание загрязнения и повреждения изучаемой поверхности микрошлифов нельзя касаться ее пальцами, тереть, передвигать по поверхности предметного столика и т.д.
3. При повреждении шлифа студент обязан во внеурочное время приготовить его заново.
4. Перед началом работы студент получает у преподавателя комплект шлифов и по окончании работы сдает его преподавателю.

Для изучения структуры металлов и сплавов применяется металлографический микроскоп модели МИМ-7 (рис. 1). На основании 1 установлен корпус 2, в котором находится фотокамера 3 с матовым стеклом 4. Предметный столик 7, управляемый рукоятками 8, предназначен для установки на нем исследуемого микрошлифа. Рукоятка 9 служит для вертикального перемещения стола при грубой наводке на резкость, а микрометрический винт 5 – для точной наводки. В тубусе 6 устанавливается сменный окуляр. Внутри корпуса осветителя 10 находится низковольтная лампа накаливания. Рукоятка 11 служит для переключения светофильтров.

Оптическая система микроскопа состоит из объектива, окуляра и ряда вспомогательных оптических элементов (рис. 2). Свет от кинопроекционной лампы 1 модели К30 ( $V=17$  В,  $W=170$  Вт) проходит через коллектор 2, попадает на зеркало 3 и через светофильтр 4, апертурную диафрагму 5, линзу 8, полевую диафрагму 18, призму 7 и линзу 6 поступает на стеклянную пластинку 9, отражающую около половины светового потока, а затем через объектив 10 – на шлиф 11. Отразившись от шлифа, лучи вновь попадают в объектив, проходят через пластинку 9, ахроматическую линзу 12 и, отразившись от зеркала 14, поступают в окуляр 13.

При фотографировании зеркало 14 выдвигается вместе с тубусом визуального наблюдения, и лучи проходят через один из трех фотоокуляров 15, которые укреплены на поворачивающемся диске. Отражаясь от зеркала 16, лучи попадают на матовое стекло или фотопластинку 17. Для фотографирования используют фотозатвор 19.

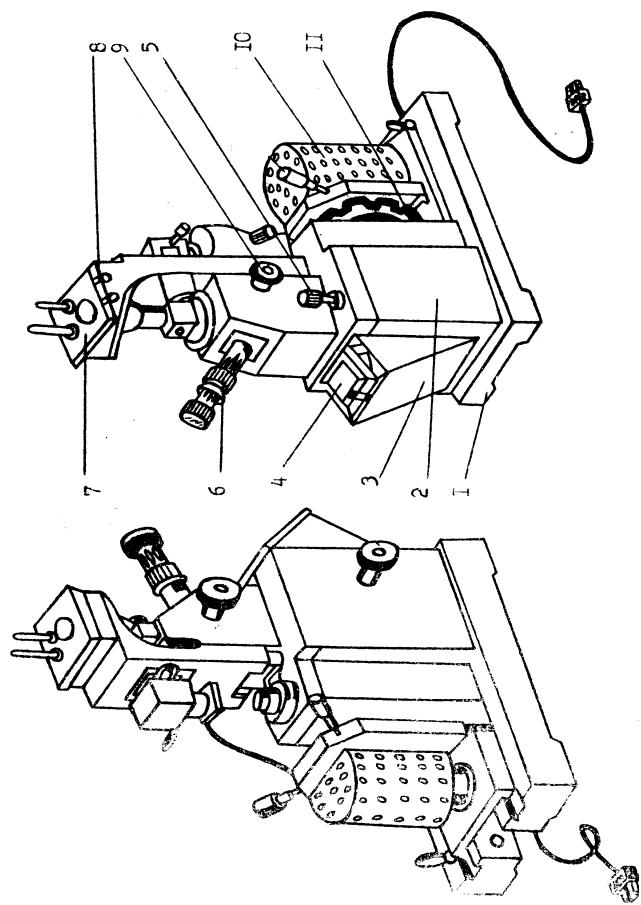


Рис. 1. Общий вид вертикального микроскопа МИМ-7

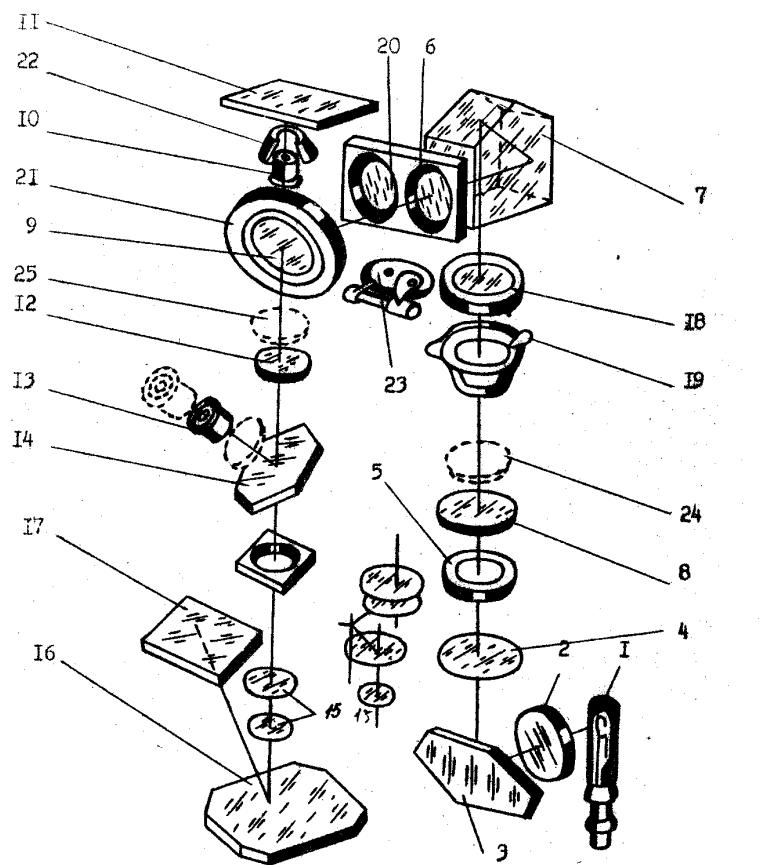


Рис. 2. Оптическая схема микроскопа МИМ-7

Если наблюдения проводят в темном поле, то вместо линзы 6 в световой поток включают линзу 20 и непрозрачный диск 23. В этом случае свет попадает только на кольцевое зеркало 21 и, отразившись от него, концентрируется параболическим зеркалом 22, расположенным вокруг объектива, на поверхности шлифа.

Для исследования в поляризованном свете на оправку линзы 8 помещают поляризатор 24, а на оправку линзы 12 – анализатор 25.

Общее увеличение микроскопа определяется комбинацией сменных объективов и окуляров, установленных на микроскопе (табл. 1).

Таблица 1

Увеличения микроскопа МИМ-7

Фокусное расстояние объектива $F$ , мм	Увеличение окуляра			
	$7^x$	$10^x$	$15^x$	$20^x$
23,2	60	90	130	170
13,8	100	140	200	300
8,16	170	240	360	500
6,16	250	320	500	650
2,77	500	720	1080	1440

#### Правила обращения с микроскопом

1. Микроскоп является точным прибором, требующим аккуратного и осторожного обращения.
2. Работая на микроскопе нельзя делать быстрых и резких движений при наводке объектива на фокус, при установке и перемене окуляров.
3. Если вращение макро- и микровинтов затруднено, то нельзя применять силу и стремиться во что бы то ни стало повернуть винт, так как это может повлечь за собой смятие резьбы, т.е. порчу микроскопа.
4. Нельзя трогать ответственные части микроскопа, кроме макро- и микрометрических винтов, винтов предметного столика и рукоятки светофильтров, так как микроскоп отрегулирован, и смещение частей приводит к трудновыполнимой работе по новой регулировке.
5. Совершенно недопустимо отвинчивать винты, разъединять детали микроскопа и т.п., так как это ведет к его порче.
6. Включение микроскопа производится посредством трансформатора, рукоятка которого поворачивается на 2-3 щелчка (напряжение на осветительной лампе не более 10-12 В).

#### Необходимое оборудование и материалы

1. Металлографический микроскоп.
2. Микровизор металлографический  $\mu$ Vizo МЕТ-221
3. Микрошлиф.

#### Содержание отчета

1. Оптическая схема микроскопа с пояснениями.
2. Таблица увеличений микроскопа.
3. Зарисовка структуры микрошлифа с указанием увеличения.

#### Контрольные вопросы

1. Что называется микроструктурой?
2. Что представляет собой микрошлиф?
3. Что можно выявить на нетравленом отполированном шлифе?
4. С какой целью микрошлиф подвергают травлению?
5. Как подобрать травитель для микрошлифа?
6. Каковы признаки перетравливания шлифа?
7. Каковы признаки недотравливания шлифа?

8. Какие искажения структуры возможны при изготовлении микрошлифов?
9. В чем источник несоответствия между наблюдаемой картиной микроструктуры и истинной микроструктурой?

## **Лабораторная работа 9** **ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУР УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ**

Цель работы: изучение микроструктур углеродистых сталей в равновесном состоянии в зависимости от состава сплава, определение состава и марки стали по структуре.

### **Содержание работы**

Студенту выдается комплект микрошлифов углеродистых сталей с различным содержанием углерода. Он исследует под микроскопом шлифы, определяет по структуре тип стали (доэвтектоидная, эвтектоидная, заэвтектоидная) и процентное содержание углерода, устанавливает марку стали, схематично зарисовывает микроструктуры сталей с указанием структурных составляющих.

### **Теоретические сведения**

Железоуглеродистые сплавы, содержащие менее 0,006 % углерода, являются однофазными и имеют структуру чистого феррита. Примером таких сплавов может служить электролитическое железо.

Сплавы, содержащие от 0,006 до 0,02 % углерода – двухфазные, их структура состоит из феррита и третичного цементита. Они носят название технического железа (рис. 6, а).

Железоуглеродистые сплавы, содержащие от 0,02 до 2,14 % углерода называются углеродистыми сталями. По структуре в равновесном состоянии они делятся на доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные. Доэвтектоидные стали содержат от 0,02 % до 0,8 % углерода, их структура состоит из феррита и перлита (рис. 6, б). Количество перлита в стали изменяется пропорционально содержанию углерода.

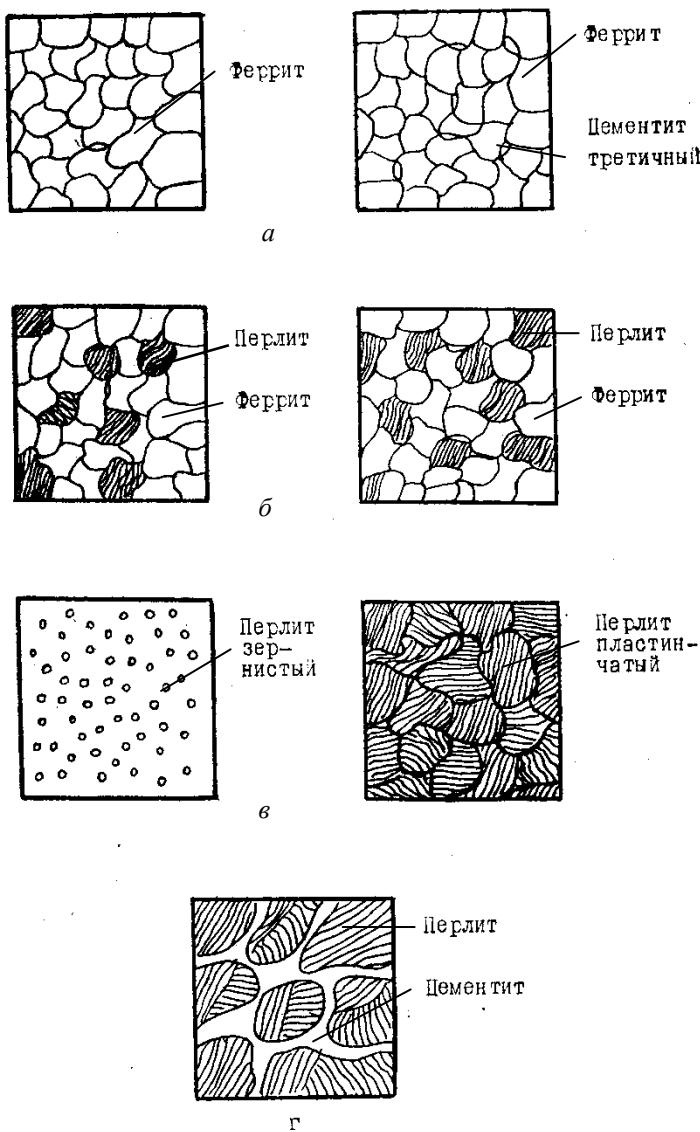


Рис. 6. Схемы зарисовок микроструктур технического железа и сталей

По структуре доэвтектоидных сталей с достаточной точностью можно определить содержание углерода в стали. Например, в доэвтектоидной стали содержится 20 % перлита и, следовательно, 80 % феррита (определяют на глаз под микроскопом). При расчете принимают во внимание, что содержание углерода в перлите составляет 0,8 %, а в феррите (совместно с третичным цементитом) – 0,02 % углерода:

100 % перлита содержат 0,8 % углерода,  
20 % перлита содержат  $X_1$  % углерода,

$$X_1 = \frac{20 \cdot 0,8}{100} = 0,16 \% \text{ C};$$

100 % феррита содержат 0,02 % углерода,  
80 % феррита содержат  $X_2$  % углерода,

$$X_2 = \frac{80 \cdot 0,02}{100} = 0,016 \% \text{ C}.$$

Всего углерода в стали будет:

$$X = X_1 + X_2 = 0,16 + 0,016 = 0,176 \text{ \%}.$$

Эвтектоидная сталь содержит 0,8 % углерода. Структура этой стали состоит только из перлита (рис. 6, *c*).

Заэвтектоидные стали содержат более 0,8 до 2,14 % С. Структура этих сталей состоит из перлита и вторичного цементита (рис. 6, 2). При медленном охлаждении вторичный цементит кристаллизуется по границам зерен перлита, образуя твердую и хрупкую оболочку, имеющую под микроскопом вид сетки.

Цементит, входящий в состав перлита, обычно выделяется в виде пластинок. Специальной термической обработкой получают так называемый зернистый перлит, в котором цементит имеет форму мелких зерен округлой формы. Структура зернистого перлита является исходной для механической и термической обработки инструментальных сталей.

Содержание углерода в заэвтектоидной стали рассчитывают следующим образом. Пусть структура содержит 95 % перлита 5 % вторичного цементита, тогда содержание углерода в стали вычисляют так:

100 % перлита содержат 0,8 % С,

95 % перлита содержат  $X_1$  % С,

$$X_1 = \frac{95 \cdot 0,8}{100} = 0,76 \text{ \% C};$$

100 % цементита содержат 6,67 % С,

5 % цементита содержат  $X_2$  % С,

$$X_2 = \frac{5 \cdot 6,67}{100} = 0,33 \text{ \% C}.$$

Содержание углерода в стали находим так:

$$X = X_1 + X_2 = 0,76 + 0,33 = 1,09 \text{ \%}.$$

Углеродистая конструкционная сталь обыкновенного качества изготавливается следующих марок: Ст0, Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, Ст5, Ст6 (ГОСТ 380-94). Обозначение марок стали буквенно-цифровое. Буквы Ст означают сталь, цифры от 0 до 6 – номер марки в зависимости от химического состава и механических свойств.

По степени раскисления различают кипящие, спокойные и полуспокойные стали. Для обозначения степени раскисления после номера марки стали ставят индексы: кп – кипящая, пс – полуспокойная, сп – спокойная, например: Ст3кп, Ст4сп. Индекс сп может быть опущен. В обозначение сталей с повышенным содержанием марганца после цифры добавляется также буква Г. Например, Ст3Гсп, Ст5Г пс и др.

В обозначении марки углеродистой конструкционной качественной стали 05, 08, 10, 15, 20, 25, ..., 75, 80, 85 цифры указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента (ГОСТ 1050-88). При этом для сталей с содержанием углерода < 0,2 %, не подвергнутых полному раскислению, в обозначение добавляются буквы кп (для кипящей стали) и пс (для полуспокойной). Для спокойных сталей буквы в конце их наименования не добавляются, например, 08кп, 10 пс, 15, 18кп, 20 и т.д.

Качественные стали с повышенными свойствами, используемые для производства котлов и сосудов высокого давления, обозначают по ГОСТ 5520-79 добавлением буквы К в конце наименования стали: 15К, 18К, 22К и др.

Обозначение марок углеродистых инструментальных сталей буквенно-цифровое: У7, У8, У9, У10, У11, У12, У13, У13А. Буква У означает углеродистую инструментальную сталь, а цифра – среднюю массовую долю углерода в десятых долях процента (ГОСТ 1435-99). В конце маркировки высококачественных сталей, содержащих пониженное количество вредных примесей, ставится буква А.

В обозначении марок автоматных сталей (ГОСТ 1414-75) – А12, А20, А30, А40Г, буква А является признаком автоматной стали, цифры соответствуют среднему содержанию углерода в сотых долях процента, буква Г указывает на повышенное содержание марганца.

### Необходимое оборудование и материалы

1. Металлографический микроскоп.
2. Микровизор металлографический  $\mu$ Vizo МЕТ-221
3. Набор шлифов углеродистых сталей.
4. Стенд фотографий микроструктур углеродистых сталей в равновесном состоянии.
5. Диаграмма состояния железо-цементит.
6. Схема зарисовки микроструктур углеродистых сталей.

## **Содержание отчета**

1. Зарисовка микроструктур стали с указанием структурных составляющих и увеличения, при котором изучалась структура.
2. Для каждого просмотренного шлифа приводятся:
  - а) тип стали (доэвтектоидная, эвтектоидная, заэвтектоидная), количество перлита;
  - б) расчет содержания углерода;
  - в) марка стали;
  - г) механические свойства и область применения стали.

## **Контрольные вопросы**

1. Какие железо-углеродистые сплавы называются сталью?
2. Сколько углерода содержится в доэвтектоидной, эвтектоидной и заэвтектоидной стальях?
3. Каковы структуры этих сталей?
4. Какова зависимость механических свойств сталей от содержания углерода?
5. Классификация углеродистых сталей по назначению.
6. Каковы принципы маркировки углеродистых сталей?
7. Что входит в состав углеродистых сталей помимо железа и углерода?

## **Лабораторная работа 10** **ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУР** **ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ**

Цель работы: изучение взаимосвязи состава и микроструктуры конструкционных и инструментальных легированных сталей.

### **Содержание работы**

Студенты рассматривают микрошлифы легированных сталей, расшифровывают их химический состав по известной марке, и сравнивают наблюдаемую микроструктуру с ожидаемой структурой по химическому составу.

### **Теоретические сведения**

Легированной сталью называется такая сталь, в которую при выплавке вводят элементы, изменяющие ее строение и свойства. Эти элементы называются легирующими. В углеродистой стали, кроме углерода, всегда содержится небольшое количество примесей:

$Mn \leq 0,5\%$ ;  $Si \leq 0,4\%$ ;  $P \leq 0,04\%$ ;  $S \leq 0,04\%$ .

Перечисленные примеси в указанных количествах практически не влияют на механические свойства углеродистой стали. Введение в сталь более 1 % любого из перечисленных элементов существенно сказывается на механических свойствах, и такие стали будут уже легированными. К легирующим относятся следующие элементы:  $Mn$ ,  $Si$ ,  $Cr$ ,  $Ni$ ,  $Mo$ ,  $Ti$ ,  $W$ ,  $Nb$ ,  $Al$ ,  $Ta$  и др. Следовательно, легированная сталь – это многокомпонентный сплав "железо-углерод-легирующий элемент".

#### *Маркировка и классификация легированных сталей*

Для обозначения состава легированной стали согласно государственному стандарту принято буквенно-цифровое обозначение. Буквы показывают наличие того или иного элемента. Так, например, Г обозначает марганец, С – кремний, Х – хром, Н – никель, В – вольфрам, Р – бор, Д – медь, Ю – алюминий, Т – титан, Ф – ванадий, К – кобальт. Цифры, стоящие в начале марки, показывают: для конструкционных сталей – содержание углерода в сотых долях процента, для инструментальных – в десятых долях процента. Цифры, следующие за буквами, указывают содержание соответствующего легирующего элемента, если его больше 1,5 %. Буква А в конце марки показывает, что сталь высококачественная, т.е. серы и фосфора в ней не более чем 0,03 % каждого; чистая по неметаллическим включениям; имеющая определенный номер зерна, определенную прокаливаемость и т.д.

Например, сталь 30ХГСА – высококачественная, имеет следующий состав:  $C = 0,3\%$ ,  $Cr = 1,0\%$ ,  $Mn = 1,0\%$ ,  $Si = 1,0\%$ ; сталь 9ХС – инструментальная, качественная, имеет следующий состав:  $C = 0,9\%$ ,  $Cr = 0,95-1,25\%$ ,  $Si = 1,2 - 1,6\%$ .

По назначению легированные стали делятся на следующие классы:

а) машиностроительные или конструкционные стали, идущие на изготовление деталей машин. Они разделяются, в свою очередь, на цементуемые, улучшаемые и пружинные;

б) инструментальные стали, идущие на изготовление различного инструмента: штампового, режущего, мерительного и др. Они делятся на углеродистые, легированные, быстрорежущие и твердые сплавы;

в) стали особого назначения. Они делятся на жаростойкие, нержавеющие, кислотостойкие, с особым коэффициентом расширения, магнитные, немагнитные и др.

По структуре легированные стали классифицируются в равновесном (отожженном) и в нормализованном состояниях.

Исходя из положения критических точек на диаграмме состояния и структуры легированные стали, также как углеродистые стали, могут быть разделены на следующие три класса:

- 1) доэвтектоидные – структура: феррит и перлит;
- 2) заэвтектоидные – структура: перлит и вторичные карбиды;
- 3) ледебуритные – структура: перлит, вторичные карбиды и ледебурит.

Так как легирующие элементы смещают на диаграмме состояния критические точки Р и S влево, то в легированной стали перлит и ледебурит появляются при меньшем содержании углерода, чем в железоуглеродистых сплавах. Так, например, углеродистая сталь, содержащая 0,4 % углерода, будет

доэвтектоидной; а легированная сталь при том же содержании углерода и 6,0 % вольфрама – заэвтектоидной, если же вольфрама будет 13 %, то сталь станет ледебуритной.

В зависимости от содержания в стали легирующих элементов, расширяющих  $\alpha$ -область, на структурной диаграмме различают следующие 5 классов сталей:

- 1) доэвтектоидный,
- 2) заэвтектоидный,
- 3) ледебуритный,
- 4) полуферритный,
- 5) ферритный.

#### *Классификация сталей по структуре в нормализованном состоянии*

В основу этой классификации положены диаграммы изотермического распада аустенита. В зависимости от того, какую структуру приобретают образцы диаметром 25 мм после нормализации (охлаждения на воздухе), различают три основных класса сталей: *а* – перлитный, *б* – мартенситный и *в* – аустенитный (рис. 33).

К сталям перлитного класса относятся доэвтектоидные и заэвтектоидные стали с содержанием легирующих элементов до 5 %. В этих сталях аустенит при охлаждении на воздухе превращается в феррито-цементитную смесь с образованием перлита, сорбита или троостита. По назначению эти стали могут быть конструкционными или инструментальными.

Стали мартенситного класса могут иметь то же количество углерода, что и стали перлитного класса, но должны обязательно содержать повышенное количество (13-15 %) легирующих элементов. При охлаждении на воздухе аустенит этих сталей претерпевает бездиффузионное мартенситное превращение.

Стали аустенитного класса содержат большое количество легирующих элементов (15-30 %), обычно хрома или марганца. В этих сталях аустенит сохраняется даже при охлаждении на воздухе. Такие стали имеют особые физические свойства: кислотостойкость, жаростойкость, коррозионную стойкость, специальные магнитные свойства и т.д.

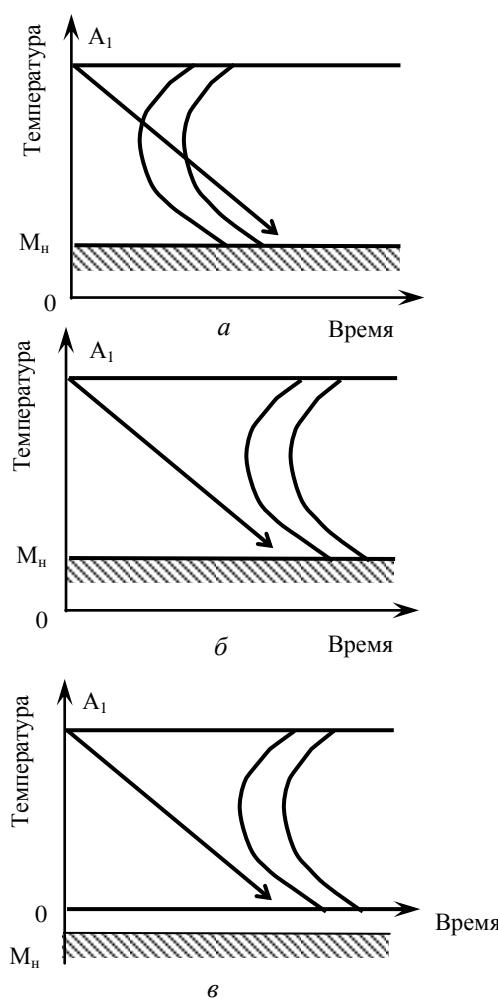


Рис. 33. Диаграммы изотермического распада аустенита

### *Конструкционные стали*

Эти стали предназначены для изготовления коленчатых валов, шатунов, осей, пальцев, втулок, зубчатых колес, валов, коробок передач и для многих других деталей, испытывающих в работе статические и динамические нагрузки. К ним предъявляются следующие основные требования:

1. Высокие механические свойства, т.е. стали должны сочетать высокую статическую прочность ( $\sigma_B = 800 \div 130$  МПа,  $\sigma_{0.2} = 400 \div 1000$  МПа) с хорошей пластичностью ( $\psi \geq 50\%$  и  $\delta = 13 \div 17\%$ ) и ударной вязкостью ( $a_K = 10 \div 14$  кДж/м<sup>2</sup>).

2. Высокий предел усталости  $\sigma_{-1} = 500 \div 550$  МПа для образцов диаметром 10 мм.

3. Высокое сопротивление износу.

Малая чувствительность к надрезу.

4. Хорошая прокаливаемость.

5. Хорошие технологические свойства (хорошая обрабатываемость резанием, ковкость, отсутствие дефектов при термической обработке и т.д.).

В конструкционных сталях этого назначения содержание углерода колеблется от 0,1 до 0,55 %, содержание легирующих элементов в сумме не должно превышать 6 %, так как при большом содержании углерода и легирующих элементов в стали наблюдается резкое падение вязкости и пластичности.

Необходимо помнить, что конструкционные легированные стали обладают лучшим комплексом механических свойств по сравнению с углеродистой сталью только при соответствующей термической обработке. Поэтому для деталей, которые не требуют упрочняющей термической обработки (закалки с последующим отпуском), легированные стали применять не рекомендуется, так как это не экономично.

Конструкционные легированные стали могут подвергаться различным видам термической обработки и делятся на цементуемые (С = 0,1-0,3 %) и улучшаемые (С = 0,3-0,55 %).

**Цементуемые стали.** Для высоконагруженных и крупных деталей применяются качественные и высококачественные стали следующих марок: 15Х, 15ХФ, 18ХГТ, 12ХН3А, 12Х2Н4А, 20Х2Н4 и др. Эти стали имеют большую прокаливаемость, обладают более высокой прочностью и вязкостью, чем углеродистые стали. Новые марки стали, применяемые для цементации: 15ХНТА, 18ХГТЦ, 20ХГР, 25Х2Н2ТА, 30ХГТ, 30ХГТЦ и др.

**Улучшаемые стали.** Для ответственных деталей сечением до 30 мм<sup>2</sup> применяются стали марок: 40ХА, 40ХГОА, 30ХГСА и др., сечением до 50 мм<sup>2</sup> и выше – высоколегированные стали марок: 37ХН3А, 40ХНМА, 40ХНВА и др.

### *Инструментальные стали для режущего инструмента*

Режущие инструменты (резцы, фрезы, сверла и др.) могут быть изготовлены из углеродистых, легированных, быстрорежущих сталей, а также твердых сплавов.

Основные требования, предъявляемые к сталям для режущего инструмента:

1. Высокая прочность и износостойчивость при достаточно высокой вязкости.

2. Высокая красностойкость (для инструмента работающего с большими скоростями резания).

Под красностойкостью понимают способность стали сохранять достаточно длительное время высокую твердость (структурную мартенсит) и режущие свойства при нагреве до высоких температур.

3. Малая деформация при закалке (особенно важна при изготовлении инструмента сложной конфигурации).

4. Хорошие технологические свойства (хорошая обрабатываемость резанием в отожженном состоянии, отсутствие склонности к обезуглероживанию при нагреве и т.д.).

Обычная легированная сталь для режущих инструментов содержит от 0,7 до 1,5 % углерода и в сумме от 1 до 3 % легирующих элементов (Cr, Mn, W, V, Si). Термическая обработка этих сталей состоит из закалки с температуры выше точки А<sub>1</sub> и последующего низкого отпуска 150–200 °С. По своим режущим свойствам легированные стали мало отличаются от углеродистых сталей с таким же содержанием углерода. Но они имеют лучшие технологические свойства: большую прокаливаемость (до 30 мм), а поэтому закаливаются в масле; обладают меньшей деформацией при закалке и т.д.

### *Методика выполнения работы*

1. Исследовать микроструктуру нескольких марок легированных сталей.

2. Определить химический состав стали по марке.

3. Исходя из химического состава приблизенно определить класс стали по структуре.

## **Необходимое оборудование и материалы**

1. Металлографический микроскоп.
2. Микровизор металлографический  $\mu$ Vizo MET-221
3. Набор шлифов легированных сталей.
4. Стенд фотографий микроструктур легированных сталей в равновесном состоянии.
5. Диаграмма состояния железо-цементит.
6. Схема зарисовки микроструктур легированных сталей.

## **Содержание отчета**

1. Описание влияния легирующих элементов на термическую обработку стали.
2. Зарисовки микроструктур легированных сталей. Под каждым рисунком указать марку, химический состав, режим термической обработки, микроструктуру, механические, физические и химические свойства, область применения.
3. Указать класс стали по структуре в отожженном и нормализованном состояниях.
4. График режима термообработки быстрорежущей стали Р18. Описать процессы, которые происходят в этой стали при нагреве, указать, какую роль играют первичные карбиды, а также почему эту сталь необходимо нагревать под закалку до высоких температур.

## **Контрольные вопросы**

1. Что называется легированной сталью?
2. Какие легирующие элементы применяются наиболее часто?
3. Принципы маркировки легированных сталей.
4. Классификация легированных сталей по назначению.
5. Классификация легированных сталей по структуре.
6. Что Вы знаете о конструкционных и инструментальных легированных сталях?

## Лабораторная работа 11

### ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Цель работы: изучение диаграмм фазового равновесия и фазовых превращений в бинарных сплавах алюминия с другими элементами.

#### Содержание работы

Студент изучает диаграммы состояния важнейших алюминиевых сплавов и все фазовые превращения, наблюдаемые в них, зарисовывает структуру сплавов. Для сплава заданного состава описывает все фазовые превращения, происходящие в нем при нагреве или охлаждении, и определяет химический состав всех фаз.

#### Теоретические сведения

Алюминий является важнейшим металлом, широко применяемым для изготовления разнообразных алюминиевых сплавов.

Цвет алюминия серебристо-белый со своеобразным тусклым оттенком. Кристаллизуется алюминий в пространственной решетке гранецентрированного куба, аллотропических превращений у него не обнаружено.

Алюминий имеет малую плотность ( $2,7 \text{ г/см}^3$ ), высокую электропроводность (составляющую около 60 % электропроводности чистой меди) и значительную теплопроводность.

В результате окисления алюминия кислородом воздуха на его поверхности образуется защитная оксидная пленка. Наличием этой пленки объясняется высокая коррозионная стойкость алюминия и многих алюминиевых сплавов.

Алюминий достаточно стоек в обычных атмосферных условиях и против действия концентрированной (90-98 %) азотной кислоты, однако он легко разрушается при действии большинства других минеральных кислот (серная, соляная), а также щелочей. Он обладает высокой пластичностью как в холодном, так и горячем состоянии, хорошо сваривается газовой и контактной сваркой, но плохо обрабатывается резанием и отличается низкими литейными свойствами.

Для прокатанного и отожженного алюминия характерны следующие механические свойства:  $\sigma_e = 80-100 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 35-40 \%$ ,  $HB = 250-300 \text{ МПа}$ .

При нагартовке прочность алюминия повышается, а пластичность снижается. Соответственно степени деформации различают отожженный (АД-М), полунаагартованный (АД-П) и нагартованный (АД-Н) алюминий. Отжиг алюминия для снятия наклена проводится при  $350-410 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Чистый алюминий находит разнообразное применение. Из технического алюминия АД1 и АД, содержащего соответственно не менее 99,3 и 98,8 % Al, изготавливают полуфабрикаты – листы, трубы, профили, проволоку для заклепок. В электротехнике алюминий служит для замены более дорогой и тяжелой меди при изготовлении проводов, кабелей, конденсаторов, выпрямителей и т.п.

Важнейшими элементами, вводимыми в алюминиевые сплавы, являются медь, кремний, магний и цинк.

Алюминий с медью образует твердые растворы переменной концентрации. При температуре  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  растворимость меди в алюминии равна 0,3 %, а при температуре эвтектики  $548 \text{ }^{\circ}\text{C}$  она увеличивается до 5,6 %. Алюминий и медь в соотношении 46:54 образуют стойкое химическое соединение  $\text{CuAl}_2$ .

Рассмотрим состояние сплавов алюминия с медью в зависимости от их состава и температуры (рис. 16). Линия CDE на диаграмме представляет собой линию ликвидуса, а линия CNDF является линией солидуса. Горизонтальный участок линии солидуса NDF называется также эвтектической линией.

Линия MN показывает переменную по температуре растворимость меди в алюминии. Следовательно, линия MN является границей между ненасыщенными твердыми растворами и растворами насыщенными. Поэтому эту линию часто называют также линией предельной растворимости.

В области I любой сплав будет представлять собой однородный жидкий раствор алюминия с медью, т.е.  $\text{Al} \rightleftharpoons \text{Cu}$ .

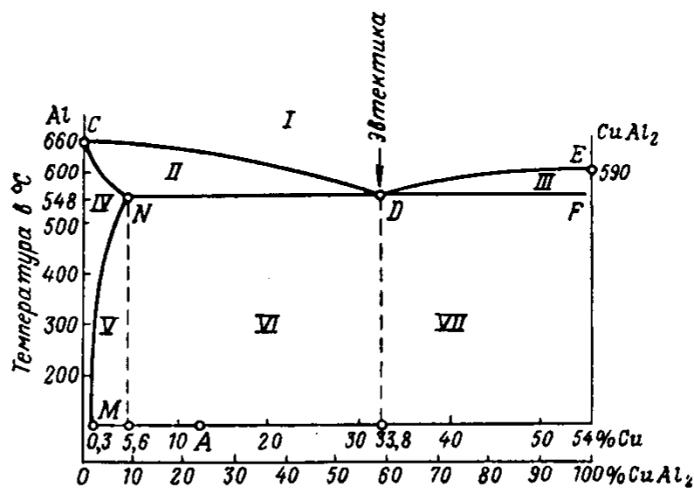


Рис. 16. Диаграмма состояния системы Al – CuAl<sub>2</sub>

В областях II и III сплавы будут находиться частично в жидком и частично в твердом состояниях. В области II твердой фазой будет твердый раствор меди в алюминии, а жидкой – жидкий раствор алюминия и меди, т.е. Al(Cu) + (Al ⇌ Cu), если твердый раствор ограниченной растворимости меди в алюминии условимся обозначать как Al(Cu).

В области III жидкой фазой будет являться также жидкий раствор алюминия и меди, а твердой – металлическое соединение CuAl<sub>2</sub>, т.е. CuAl<sub>2</sub><sub>I</sub> + (Al ⇌ Cu). Индекс «I» (первичный) показывает, что CuAl<sub>2</sub> образовалось при кристаллизации из жидкого состояния. В остальных областях полностью затвердевшие сплавы будут иметь следующее строение:

в области IV – однородный твердый раствор меди в алюминии, т.е. Al(Cu);

в области V – твердый раствор меди в алюминии и вторичный CuAl<sub>2</sub><sub>II</sub>;

в области VI – твердый раствор меди в алюминии, вторичный CuAl<sub>2</sub> и эвтектика, т.е Al(Cu) + CuAl<sub>2</sub><sub>II</sub> + [Al(Cu) + CuAl<sub>2</sub>];

в области VII – первичный CuAl<sub>2</sub> и эвтектика, т.е.

CuAl<sub>2</sub><sub>I</sub> + [Al(Cu) + CuAl<sub>2</sub>].

Эвтектика этих сплавов представляет собой особую механическую смесь чередующихся мельчайших кристаллов твердого раствора меди в алюминии и металлического соединения CuAl<sub>2</sub>, т.е. [Al(Cu) + CuAl<sub>2</sub>].

Все сплавы системы Al – CuAl<sub>2</sub> по структуре и концентрации можно разделить на четыре группы:

1-я группа содержит меди от 0 до 0,3 %;

2-я группа содержит меди от 0,3 до 5,6 %;

3-я группа содержит меди от 5,6 до 33,8 %;

4-я группа содержит меди от 33,8 до 54 %.

Рассмотрим строение сплавов системы Al – CuAl<sub>2</sub>. На рис. 17, а показана структура сплава первой группы, состоящая из зерен твердого раствора меди в алюминии. Структура сплава второй группы приведена на рис. 17, б: видны зерна твердого раствора меди в алюминии и кристаллы вторичного CuAl<sub>2</sub>. Структура доэвтектического сплава (твердый раствор меди в алюминии, кристаллы вторичного CuAl<sub>2</sub> и эвтектика) приведена на рис. 17, в. Структура эвтектического сплава – эвтектика, состоящая из мельчайших кристалликов твердого раствора меди в алюминии и CuAl<sub>2</sub> дана на рис. 17, г. На рис. 17, д приведена структура заэвтектического сплава, состоящая из первичных кристаллов CuAl<sub>2</sub> и эвтектики.

В сплавах, содержащих эвтектику, можно по структуре определить содержание меди. Однако в этом случае надо учитывать количество меди, находящееся в эвтектике и в твердом растворе. Например, в доэвтектическом сплаве, содержащем 30 % эвтектики и 70 % твердого раствора, количество меди в эвтектике

$$k_x = \frac{30 \cdot 33,8}{100} = 10,14 \%,$$

а в твердом растворе

$$k_y = \frac{70 \cdot 5,6}{100} = 3,92 \% .$$

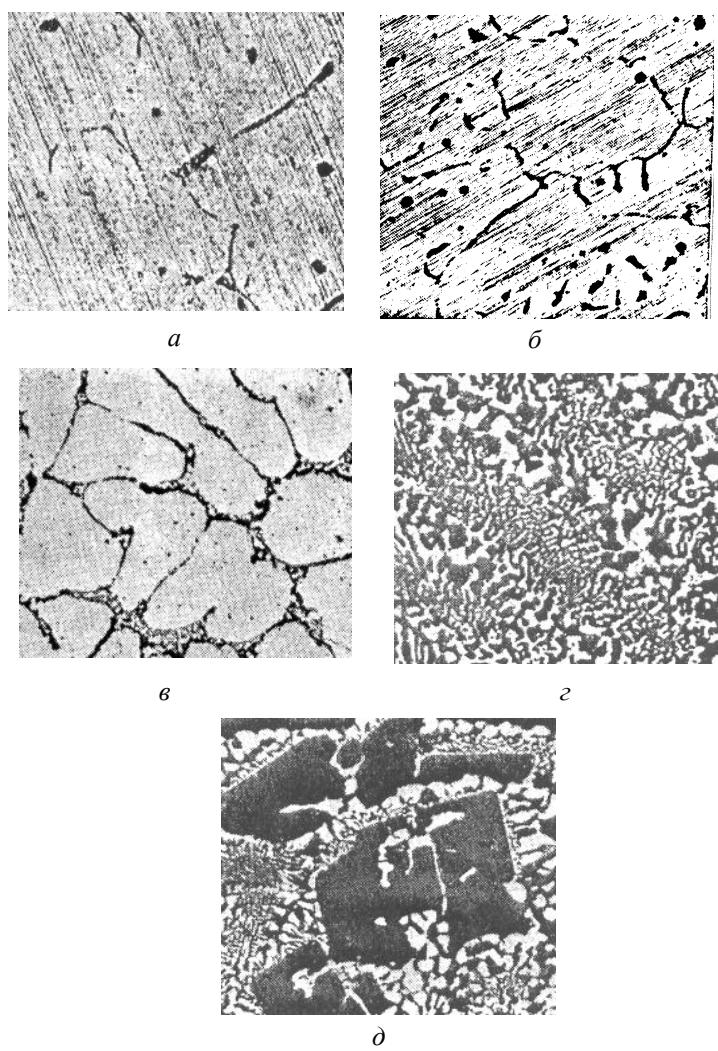


Рис.17. Микроструктуры сплавов алюминия с медью:  
 $a - 0,2\% \text{ Cu}$ ;  $b - 3\% \text{ Cu}$ ;  $c - 14\% \text{ Cu}$ ;  $d - 33,8\% \text{ Cu}$ ;  $e - 40\% \text{ Cu}$

Следовательно, исследуемый сплав содержит

$$k_x + k_y = 14,06 \% \text{ меди,}$$

что соответствует точке А, лежащей на оси абсцисс диаграммы состояния системы Al – CuAl<sub>2</sub> (рис. 16).

При определении состава заэвтектических сплавов рассчитывают количество меди, находящееся в эвтектике и в химическом соединении CuAl<sub>2</sub>. Сумма этих количеств будет соответствовать содержанию меди в заэвтектическом сплаве. Химическое соединение CuAl<sub>2</sub> отличается большой твердостью и хрупкостью.

В технике применяются преимущественно алюминиевые сплавы, содержащие 2-5 % меди, которые называются дуралюминиями. Они хорошо обрабатываются давлением и имеют высокие механические свойства после термической обработки и нагартовки. Дуралюмины применяют для изготовления деталей и элементов конструкций средней и повышенной прочности ( $\sigma_b = 420-520 \text{ МПа}$ ), требующих долговечности при переменных нагрузках, в строительных конструкциях. Из дуралюмина изготавливают обшивки, шпангоуты, стрингеры и лонжероны самолетов, силовые каркасы и кузова грузовых автомобилей и т.д.

Сплавы Al с Si называют силуминами. Они обладают хорошими литейными свойствами и содержат 4-13 % Si. Из диаграммы состояния этих сплавов (рис. 18) следует, что силумины представляют собой дозэвтектические или эвтектические сплавы, содержащие в структуре значительные количества эвтектики.

Однако при литье в обычных условиях эти сплавы приобретают неудовлетворительное строение, так как эвтектика получается грубопластинчатой, с крупными включениями хрупкого кремния, что сообщает сплавам низкие механические свойства.

На рис. 19, а представлена структура силумина марки АЛ2, содержащего 11-13 % Si. В соответствии с диаграммой состояния алюминий – кремний сплав такого состава имеет эвтектическое строение. Эвтектика состоит из  $\alpha$ -твёрдого раствора кремния в алюминии (светлый фон) и игольчатых крупных и хрупких кристаллов кремния. Игольчатые выделения частиц кремния создают внутренние острые надрезы в пластичном алюминии и приводят к преждевременному разрушению при нагружении.

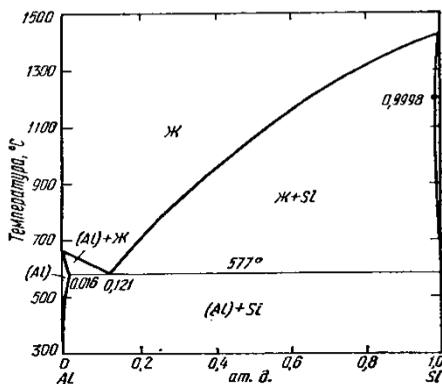
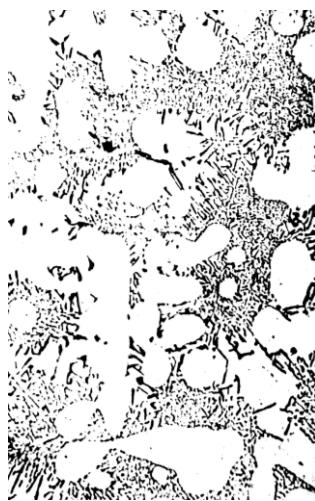


Рис. 18. Диаграмма состояния системы Al – Si



а



б

Рис.19. Силумин: *а* – до модифицирования, грубоигольчатая эвтектика (Al-Si) и первичные выделения кремния; *б* – после модифицирования, мелкодисперсная эвтектика (Al-Si) и дендриты твердого раствора кремния и других элементов в алюминии

Введение модификатора меняет характер кристаллизации. Происходит смещение линий диаграммы состояния так, что сплав с 11-13 % кремния становится доэвтектическим. В структуре появляются избыточные светлые зерна  $\alpha$ -твердого раствора (рис.19, *б*). Модификатор изменяет форму частиц кремния: вместо игольчатых выпадают мелкие равноосные, не создающие опасных концентраций напряжений при нагружении. В результате модифицирования предел прочности повышается с 130 до 160 МПа, а относительное удлинение с 2 до 4 %.

В сплавах, обрабатываемых давлением, содержание кремния менее 1 %. В алюминиевых сплавах, содержащих магний, кремний связывается с ним в устойчивое металлическое соединение  $Mg_2Si$ ; оно образует с алюминием диаграмму состояния эвтектического типа с ограниченными твердыми растворами (рис. 20).

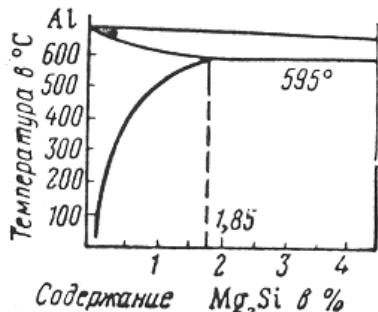


Рис. 20. Диаграмма состояния системы Al – Mg<sub>2</sub>Si

На диаграмме состояния системы Al – Mg<sub>2</sub>Si (рис. 20) изображены линии ограниченных твердых растворов Al-Mg<sub>2</sub>Si и эвтектическая линия при 595 °C. Критическая точка 1,85% Mg<sub>2</sub>Si при 595 °C.

Соединение Mg<sub>2</sub>Si отличается высокой твердостью, его переменная растворимость в алюминии позволяет достигать значительного упрочнения при термической обработке.

В электротехнике применяют алюминиевые сплавы типа альдрей, легированные магнием и кремнием. При старении закаленных сплавов Mg<sub>2</sub>Si выпадает из твердого раствора и упрочняет его. В результате такой обработки удается получить предел прочности до 350 МПа при относительном удлинении 10-15 %. Существенно, что электрическая проводимость такого сплава составляет 85 % электрической проводимости проводникового алюминия. Это обусловлено тем, что из твердого раствора при старении почти полностью удаляется Mg<sub>2</sub>Si и сплав состоит из чистого алюминия и упрочняющей фазы (Mg<sub>2</sub>Si).

Магний образует с алюминием твердые растворы, а также  $\beta$ -фазу на основе соединения Mg<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>. В большинстве алюминиевых сплавов вводится магния не более 3 %, но в некоторых литейных сплавах типа магналия содержание его доходит до 12 %.

Как видно из рис. 21, в сплавах алюминия с магнием образуется эвтектика. Растворимость магния в алюминии сильно меняется с изменением температуры. В качестве примера можно привести сплав АЛ8. В литом состоянии он имеет структуру, состоящую из зерен твердого раствора магния в алюминии и включений хрупкого соединения Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>. После литья проводится гомогенизация при температуре 430 °C в течение 15-20 часов, затем следует закалка в масле.

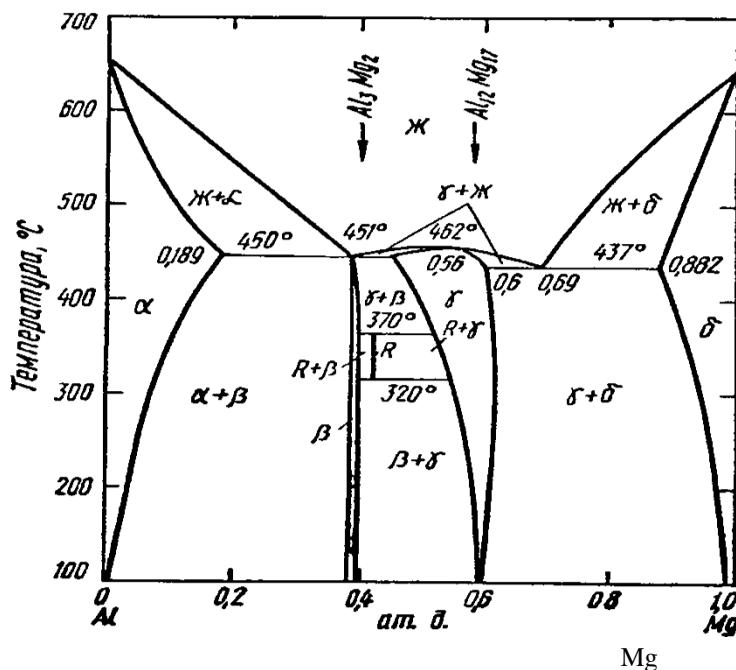


Рис. 21. Диаграмма состояния системы Al – Mg

В процессе гомогенизации включения  $Al_3Mg_2$  полностью переходят в твердый раствор. Закаленный сплав приобретает достаточную прочность ( $\sigma_b = 300$  МПа) и большую пластичность. Одновременно сплав приобретает высокую коррозионную стойкость. Старение для сплава AL8 является вредным: резко снижается пластичность и ухудшается коррозионная стойкость.

Цинк вводится в некоторые высокопрочные алюминиевые сплавы в количестве до 9 %. В двойных сплавах с алюминием при температуре выше 250 °C цинк (в этих пределах) находится в твердом растворе (рис. 22).

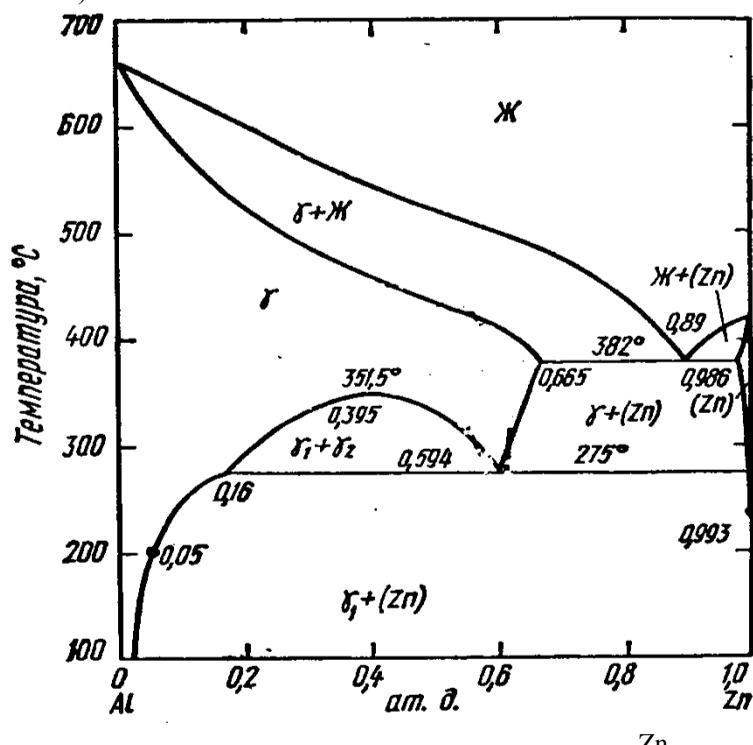


Рис. 22. Диаграмма состояния системы Al - Zn

Все высокопрочные сплавы имеют сложный химический состав. Так, сплав B95 содержит 6 % Zn, 2,3 % Mg, 1,7 % Cu, 0,4 % Mn и 0,15 % Cr. Цинк, магний и медь образуют с алюминием твердые растворы и металлические соединения  $MgZn_2$ ,  $Al_2CuMg$  - S-фаза,  $Mg_4Zn_3Al_3$  - Т-фаза. При нагревании эти металлические соединения растворяются в алюминии. Например при температуре 475 °C растворимость  $MgZn_2$  в алюминии повышается до 18 % (рис. 23). После закалки и искусственного старения сплав B95 имеет  $\sigma_b = 600$  МПа,  $\delta = 12$  %. Марганец и хром усиливают эффект старения и повышают коррозионную стойкость сплава.

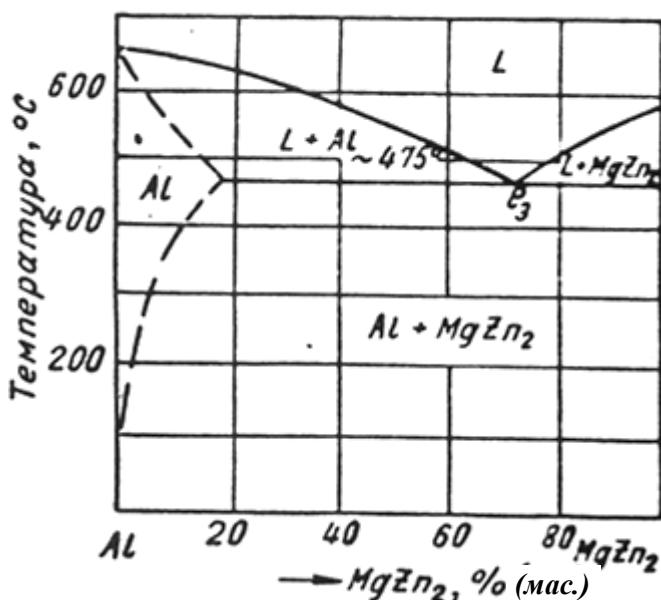


Рис. 23. Диаграмма состояния системы Al – MgZn<sub>2</sub>

### **Необходимое оборудование и материалы**

1. Металлографический микроскоп.
2. Микровизор металлографический  $\mu$ Vizo МЕТ-221
3. Набор шлифов алюминиевых сплавов.
4. Стенд с микроструктурами алюминиевых сплавов.

### **Содержание отчета**

1. Зарисовки микроструктур изученных сплавов с указанием фаз и структурных составляющих.
2. Копирование диаграммы фазового равновесия, указанной преподавателем.
3. Для сплава заданного состава описание всех фазовых превращений при нагреве или охлаждении и определение химического состава фаз.

### **Контрольные вопросы**

1. Почему коррозионная стойкость многих алюминиевых сплавов ниже коррозионной стойкости чистого алюминия?
2. Можно ли по микроструктуре сплава определить тип сплава – литейный или деформируемый?
3. Какова структура деформируемых алюминиевых сплавов, не упрочняемых термической обработкой?
4. Каким путем достигается упрочнение однофазных алюминиевых сплавов?
5. Какова упрочняющая термическая обработка двухфазных алюминиевых сплавов?
6. Что является целью закалки дуралюмина?
7. Каковы основные механические свойства дуралюмина?
8. Какие сплавы называются силуминами?
9. Какова удельная прочность алюминиевых сплавов?
10. Основные легирующие элементы в алюминиевых сплавах.

## Лабораторная работа 12

### МИКРОАНАЛИЗ ТИТАНОВЫХ И МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Цель работы: изучение микроструктуры магниевых(литейных и деформируемых ) и титановых( $\alpha$ ,  $\alpha+\beta$ ,  $\beta$ )сплавов.

#### Содержание работы

Студенты рассматривают микрошлифы магниевых и титановых сплавов сравнивают наблюдаемую микроструктуру с ожидаемой структурой по химическому составу.

#### Теоретические сведения

Магниевые сплавы содержат кроме магния также алюминий, цинк и марганец. Эти элементы обладают ограниченной растворимостью в магнии, поэтому при определенном химическом составе магниевые сплавы способны подвергаться термической обработке (закалке и старению). Магниевые сплавы, как и алюминиевые, разделяют на литейные (маркируются буквами МЛ) и деформируемые (маркируются буквами МА).

Например, литейный магниевый сплав МЛ5 (7,5-9,0% Al; 0,2-0,8% Zn; 0,15-0,5% Mn, остальное магний ) после литья имеет структуру состоящую из  $\alpha$  твердого раствора сложного состава (светлое поле на изображении микроструктуры) и включений  $Mg_4Al_3$

Структура этого сплава (МЛ5) после диффузационного отжига при 360<sup>0</sup>C и закалки от 410-415<sup>0</sup>C с охлаждением на воздухе состоит из зерен  $\alpha$ - твердого раствора, внутри и по границам, которых видны включения марганцовистой фазы и остатки нерастворившегося соединения  $Mg_4Al_3$ .

По химическому составу деформируемые магниевые сплавы близки к литейным. Например, сплав МА5 имеет состав: 7,8-9,2% Al; 0,2-0,8% Zn; 0,15-0,5% Mn; остальное- магний, и по структуре мало отличается от сплава МЛ5.

Современные титановые сплавы делят на три основные группы:  $\alpha$ -сплавы,  $\alpha+\beta$ -сплавы и  $\beta$ -сплавы.

Микроструктура  $\alpha$ -сплавов. К  $\alpha$ - сплавам относятся технический титан ВТ1 и сплавы на основе системы титан-алюминий (например, сплав ВТ5, содержащий 5% алюминия);  $\alpha$ - сплавы не упрочняются закалкой и старением, и поэтому их обычно подвергают отжигу.

Микроструктура  $\alpha$ - сплава после отжига- зерна  $\alpha$ - фазы.

Микроструктура  $\alpha+\beta$  – сплавов. Сплавы данной группы имеют наибольшее промышленное применение. Для получения в титановых сплавах  $\alpha+\beta$  –структуры их легируют в определенном количестве  $\alpha$ -стабилизаторами (алюминием) и  $\beta$ - стабилизаторами (хромом, марганцем, молибденом, ванадием, железом).

К этой группе сплавов относится большинство промышленных сплавов: ВТ3-1 (4,5-6,2% Al; 1,0-2,5 Cr; 1,0-2,8 Mo; 0,05-1,5% Fe); ВТ8 (5,8-6,5% Al; 2,8-3,8% Mo; 0,2-0,35% Si); ВТ14 (3,5-4,5% Al; 0,7-1,5% V; 2,5-3,5Mo) и др.

В отожженном состоянии микроструктура сплавов этой группы состоит из  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз. Они упрочняются термической обработкой. Закалка приводит к образованию игольчатой структуры мартэнситного типа –  $\alpha^1$ - фазы. При последующем старении образуется структура, состоящая из смеси  $\alpha^1$  и  $\alpha$ - фаз.

#### Необходимое оборудование и материалы

- 1.Металлографический микроскоп.
- 2.Микровизор металлографический  $\mu$ Vizo МЕТ-221
3. Микрошлифы магниевых и титановых сплавов.

#### Содержание отчета

- 1.Зарисовки микроструктур изученных сплавов с указанием фаз и структурных составляющих.
2. Результаты микроанализа оформить в виде протокола

№п/п	Наименование	Химический	Микроструктура	Свойства
------	--------------	------------	----------------	----------

	и марка сплава	состав сплава, %	Зарисовка	Наименование		

3. Написать отчет по работе

## Практическая работа 2

### **Ознакомление с химическими, физическими и механическими испытаниями металлов и неметаллов**

Цель работы: ознакомление с химическими, физическими и механическими методами испытания металлов и неметаллов

#### **Содержание работы**

В ходе экскурсии студенты знакомятся с оборудованием ЦЗЛ Иркутского авиационного завода, применяемым при различных методах испытаний металлов и неметаллов

#### **Необходимое оборудование и материалы**

Оборудование ЦЗЛ Иркутского авиационного завода.

#### **Содержание отчета**

Отчет оформляется в рабочей тетради по Материаловедению, с описанием испытаний, которые проводятся в лабораториях.

## Практическая работа 3

### **Ознакомление с не разрушающими и разрушающими методами контроля**

Цель работы: ознакомление с не разрушающими и разрушающими методами контроля

#### **Содержание работы**

В ходе экскурсии студенты знакомятся с оборудованием ЦЗЛ Иркутского авиационного завода, применяемым при не разрушающих и разрушающих методах контроля

#### **Необходимое оборудование и материалы**

Оборудование ЦЗЛ Иркутского авиационного завода: Магнитный дефектоскоп, ультразвуковой дефектоскоп, люминисцентный дефектоскоп

### **Содержание отчета**

Отчет оформляется в рабочей тетради по Материаловедению, с описанием методов, которые проводятся в лабораториях.

## **Практическая работа 4**

### **Ознакомление с металлургическим производством**

**Цель работы:** ознакомление с металлургическим производством

#### **Содержание работы**

В ходе экскурсии студенты знакомятся с оборудованием литейного цеха Иркутского авиационного завода

#### **Необходимое оборудование и материалы**

Оборудование литейного цеха Иркутского авиационного завода:

### **Содержание отчета**

Отчет оформляется в рабочей тетради по Материаловедению, с описанием работ, которые проводятся в литейном цехе ИАЗ.

## **Практическая работа 5**

### **Определение свойств углеродистых сталей по справочнику: «Марочник стали и сплавов»**

Цель работы: научиться работать со справочной литературой, расшифровывать марку стали и определять свойства углеродистых сталей

### **Содержание работы**

Студент получает марку углеродистой стали, кратко расшифровывает её, из «Марочника сталей и сплавов» выписывает:

Химический состав  
Механические свойства  
Технологические свойства

Отвечает на вопрос: Как расшифровывать марку углеродистой стали.

### **Необходимое оборудование и материалы**

Справочник: «Марочник стали и сплавов» под редакцией Зубченко А.С., Машиностроение, 2003г.

### **Содержание отчета**

Отчет оформляется в рабочей тетради по Материаловедению

## **Практическая работа 6**

### **Определение свойств легированных инструментальных сталей по справочнику: «Марочник стали и сплавов»**

Цель работы: научиться работать со справочной литературой, расшифровывать марки легированных инструментальных сталей и определять свойства легированных инструментальных сталей

### **Содержание работы**

Студент получает марку легированной инструментальной стали, кратко расшифровывает её, из «Марочника стали и сплавов» выписывает:

Химический состав  
Механические свойства  
Технологические свойства

Отвечает на вопрос: Как расшифровывать марку легированной инструментальной стали.

### **Необходимое оборудование и материалы**

Справочник: «Марочник стали и сплавов» под редакцией Зубченко А.С., Машиностроение, 2003г.

### **Содержание отчета**

Отчет оформляется в рабочей тетради по Материаловедению

## **Практическая работа 7**

### **Определение свойств жаростойких и жаропрочных сплавов по справочнику: «Марочник стали и сплавов»**

**Цель работы:** научиться работать со справочной литературой, расшифровывать марки жаростойких и жаропрочных сплавов и определять свойства жаростойких и жаропрочных сплавов

#### **Содержание работы**

Студент получает марку жаростойкого и жаропрочного сплава кратко расшифровывает их, из «Марочника стали и сплавов» выписывает:

Химический состав

Механические свойства

Технологические свойства

Отвечает на вопрос: Как расшифровывать марку жаростойкого и жаропрочного сплава

#### **Необходимое оборудование и материалы**

Справочник: «Марочник стали и сплавов» под редакцией Зубченко А.С., Машиностроение, 2003г.

### **Содержание отчета**

Отчет оформляется в рабочей тетради по Материаловедению

## **Практическая работа 8**

### **Определение свойств медных сплавов по справочнику: «Конструкционные материалы»**

**Цель работы:** научиться работать со справочной литературой, расшифровывать марки медных сплавов и определять свойства медных сплавов

#### **Содержание работы**

Студент получает марку медного сплава кратко расшифровывает его, из «Конструкционные материалы» выписывает:

Химический состав

Механические свойства

Технологические свойства

Отвечает на вопрос: Как расшифровывать марку медного сплава

**Необходимое оборудование и материалы**

Справочник: «Конструкционные материалы» под редакцией Арзамасова Б.Н.

**Содержание отчета**

Отчет оформляется в рабочей тетради по Материаловедению