

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**А. А. Андрушевич, А. Г. Анисович, В. В. Шабуня**

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.  
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением  
по аграрному техническому образованию в качестве  
учебно-методического пособия для студентов учреждений  
высшего образования по группе специальностей  
0812 «Агроинженерия»*

3-е издание, переработанное и дополненное

Минск  
БГАТУ  
2024

УДК 620.22(07)  
ББК 30.3я7  
А65

Рецензенты:  
кафедра «Материаловедение в машиностроении»  
Белорусского национального технического университета,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой *В. М. Константинов*;  
доктор технических наук, профессор, директор государственного  
научного учреждения «Институт прикладной физики  
НАН Беларуси» *М. Л. Хейфец*

**Андрушевич, А. А.**

А65      **Материаловедение и технология конструкционных материалов. Материаловедение. Лабораторный практикум : учебно-методическое пособие / А. А. Андрушевич, А. Г. Анисович, В. В. Шабуня. – 3-е изд., перераб. и доп. – Минск : БГАТУ, 2024. – 148 с.**  
ISBN 978-985-25-0273-3.

Представлены методические указания к лабораторным и управляемым самостоятельным работам, тестовые задания по разделу «Материаловедение» учебной дисциплины «Материаловедение и технология конструкционных материалов».

Предназначается для студентов и учащихся агротехнических специальностей, а также может быть использовано магистрантами, аспирантами и специалистами предприятий агропромышленного комплекса, работающими в области изготовления, ремонта и эксплуатации сельскохозяйственной техники.

УДК 620.22(07)  
ББК 30.3я7

ISBN 978-985-25-0273-3

© БГАТУ, 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Лабораторная работа № 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ.....	6
Лабораторная работа № 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ, ПЛАСТИЧНОСТИ И ВЯЗКОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.....	18
Лабораторная работа № 3. МИКРОСТРУКТУРНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ.....	31
Управляемая самостоятельная работа № 1. АНАЛИЗ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ «ЖЕЛЕЗО–ЦЕМЕНТИТ».....	40
Лабораторная работа № 4. ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ, СВОЙСТВ И ПРИМЕНЕНИЯ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ.....	54
Лабораторная работа № 5. ЗАКАЛКА И ОТПУСК СТАЛЕЙ.....	78
Управляемая самостоятельная работа № 2. ВЫБОР РЕЖИМОВ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ.....	93
ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ.....	107
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА ДЛЯ СТУДЕНТОВ.....	137
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	139

## ВВЕДЕНИЕ

Современное производство требует от специалистов, работающих в сельскохозяйственном машиностроении и различных отраслях АПК, знаний в области материаловедения, умения рационально использовать различные материалы и методы их обработки для достижения необходимых технологических и эксплуатационных свойств машин.

«Материаловедение и технология конструкционных материалов» относится к числу основополагающих дисциплин для специальностей инженерного профиля и входит в учебные планы, подготовленные в соответствии с образовательными стандартами Республики Беларусь для группы специальностей 0812 «Агроинженерия».

Предметом дисциплины является изучение строения и свойств материалов, физико-химических основ получения из них изделий различными способами и методов их упрочнения. Она состоит из трех основных разделов: «Материаловедение», «Обработка металлов резанием», «Горячая обработка металлов» и посвящена конструкционным материалам, в частности, металлам и сплавам, которые являются основными материалами для изготовления сельскохозяйственной и автотракторной техники.

**Материаловедение** – наука, изучающая строение и свойства материалов, устанавливающая связь между их составом, структурой и свойствами, имеет четко выраженный прикладной характер и развивается в основном экспериментальным путем.

Практикум по разделу «Материаловедение» состоит из лабораторных и управляемых самостоятельных работ, тестовых заданий, которые охватывают основные методы анализа структур и определения механических свойств металлов и сплавов, классификацию углеродистых и легированных сталей, чугунов, способы упрочняющей термической обработки сталей и чугунов. Перечень работ составлен на основании многолетнего опыта преподавания дисциплины «Материаловедение и технология конструкционных материалов», раздел «Материаловедение» на кафедре технологии металлов БГАТУ для студентов дневной и заочной форм обучения и полностью соответствует действующей учебной программе по данному курсу для групп специальностей 0812 «Агроинженерия».

Лабораторные работы имеют единую структуру: в начале изложена цель, затем кратко представлены в достаточном для подготовки к занятиям объеме теория, порядок экспериментального выполнения работы и используемые оборудование, приборы и материалы. В заключение перечислены требования к содержанию отчета и его оформлению, приведены контрольные вопросы для самостоятельной подготовки студентов к защите работ, а также список рекомендуемой научно-технической литературы. В зависимости от программы дисциплины и специальности количество выполняемых лабораторных и самостоятельных работ, методика их проведения могут быть изменены, а содержание работ сокращено или расширено.

Тестовые задания предназначены для активной самостоятельной подготовки студентов. Для каждой темы приведен перечень вопросов. Форма тестовых заданий предусматривает выбор одного правильного ответа из нескольких предложенных вариантов.

Отчеты по всем лабораторным работам оформляются в соответствии с приложением 1. Управляемые самостоятельные работы студентов выполняются в специально разработанной рабочей тетради.

Титульный лист к отчетам оформляется с указанием соответствующих надписей (приложение 2).

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ

### **Цель работы:**

- 1) изучить методы определения твердости металлов по Бринеллю и Роквеллу;
- 2) приобрести навыки измерения твердости методами Бринелля и Роквелла.

**Студент должен знать** сущность понятия твердости и методы ее определения по Бринеллю и Роквеллу.

**Студент должен уметь** готовить образцы материалов для испытания на твердость, выбирать условия испытания и измерять ее по методам Бринелля и Роквелла.

### **Общие сведения**

Одним из методов неразрушающего контроля механических свойств металлов является определение твердости.

**Твердость** – способность материала сопротивляться упругой и пластической деформации при внедрении в него более твердого тела (индентора).

В зависимости от скорости приложения нагрузки методы определения твердости так же, как и других механических свойств, подразделяются на *статические* и *динамические*. По способу приложения нагрузки существуют методы *вдавливания*, *царапания*, *отскока*.

Наиболее распространенными способами определения твердости являются статические методы вдавливания в испытуемый материал индентора – наконечника определенной формы и размеров:

- стального закаленного или твердосплавного шарика;
- алмазного или твердосплавного конуса;
- алмазной пирамиды.

При всех методах определения твердости необходимо правильно подготовить поверхность металла. В нем не должно быть окалины, выбоин, вмятин, грубых рисок. Свойства поверхностного слоя не должны изменяться вследствие наклепа или нагрева при шлифовании и полировке. Нагрузка прилагается перпендикулярно к испытуемой поверхности. Неплоские образцы крепятся на специальных опорных столиках, входящих в комплект приборов для измерения твердости.

В стандартных методах определения твердости при комнатной температуре время выдержки индентора под нагрузкой обычно составляет 10–30 с.

### Измерение твердости по методу Бринелля

В испытуемый материал под действием нагрузки  $P$  в течение определенного времени  $\tau$  вдавливается стальной закаленный или твердосплавный шарик диаметром  $D$  (1; 2,5; 5 и 10 мм) (ГОСТ 9012–59). В результате образуется отпечаток диаметром  $d$  (рис. 1.1).

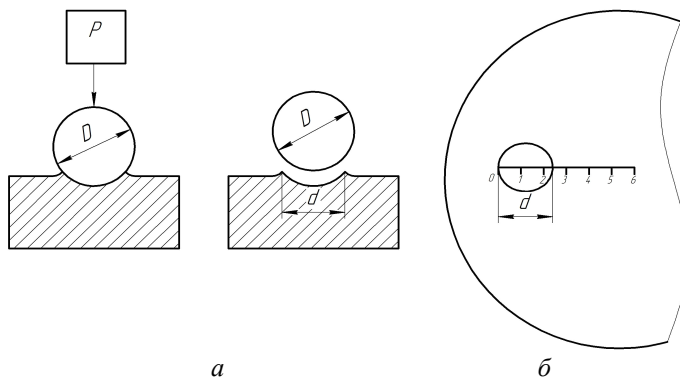


Рис. 1.1. Схема измерения твердости по Бринеллю

Число твердости по Бринеллю  $HB$  ( $HBW$ ) (МПа (кгс/мм<sup>2</sup>)) – это отношение нагрузки  $P$  к площади полученного сферического отпечатка  $F$  (мм<sup>2</sup>), которое определяется по формуле

$$HB (HBW) = \frac{P}{F}. \quad (1.1)$$

Площадь поверхности сферического отпечатка  $F$  рассчитывается по формуле

$$F = \frac{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}, \quad (1.2)$$

где  $D$  – диаметр шарика, мм;

$d$  – диаметр отпечатка, мм.

Тогда

$$HB = \frac{2 \cdot P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}. \quad (1.3)$$

При испытании металлов с твердостью до 450 *HB* используют стальной закаленный шарик с твердостью 8500 МПа, которую обозначают буквами «*HB*».

При измерении материалов с твердостью больше 450 *HB* используют шарик из твердого сплава с твердостью 15 000 МПа и обозначают буквами «*HBW*».

Осуществив вдавливание шарика диаметром  $D$  при нагрузке  $P$  и времени  $t$ , получают отпечаток  $d$ , после измерения которого находят число твердости *HB* по стандартным таблицам (приложения 4, 5). Измерение твердости по Бринеллю проводят на полуавтоматическом рычажном прессе-твердомере типа ТШ-2 (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Твердомер ТШ-2 для определения твердости по Бринеллю

Перед испытаниями необходимо выбрать диаметр шарика  $D$  и соответствующую нагрузку  $P$ . Рекомендуемые диаметры шариков и соответствующие нагрузки для испытания различных металлических материалов приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Нагрузки ( $P$ ) и диаметры шариков ( $D$ ), рекомендуемые для измерения твердости по Бринеллю

Материал	Твердость по Бринеллю, $HV$	Толщина испытуемого образца, мм	Соотношение между нагрузкой и диаметром шарика	Диаметр шарика, мм	Нагрузка, кгс ( $\times 9,81 = N$ )	Выдержка под нагрузкой, с
Стали, чугуны, высокопрочные сплавы	130–450	От 6 до 3 От 4 до 2 Менее 2	$P = 30D^2$	10,0 5,0 2,5	3000 750 187,5	10
Титан и его сплавы	<140	Более 6 От 6 до 3 Менее 3	$P = 10D^2$	10,0 5,0 2,5	1000 250 62,5	10
Медь и сплавы на ее основе	35–130	От 9 до 3 От 6 до 3 Менее 3	$P = 10D^2$	10,0 5,0 2,5	1000 250 62,5	30
Алюминий, магний, цинк и сплавы на их основе	20–80	От 9 до 3 От 6 до 3 Менее 3	$P = 5D^2$	10,0 5,0 2,5	500 125 31,25	30
Подшипниковые сплавы	8–50	Более 6 От 6 до 3 Менее 3	$P = 2,5D^2$	10,0 5,0 2,5	250 62,5 15,6	60
Свинец, олово и их сплавы	До 20	Более 6 От 6 до 3 Менее 3	$P = 1,25D^2$	10,0 5,0 2,5	125 31,25 7,8	60

Основной недостаток метода Бринелля – отсутствие геометрического подобия отпечатков.

Для многих металлов и сплавов (вследствие общей физической сущности) имеется линейная зависимость между твердостью  $HB$  и пределом прочности на растяжение  $\sigma_B$  (МПа (кгс/мм<sup>2</sup>)):

$$\sigma_B = \chi \cdot HB, \quad (1.4)$$

где  $\chi$  – коэффициент, имеющий значения, приведенные в табл. 1.2.

Для малопластичных металлов и сплавов с высокой твердостью зависимость между  $\sigma_B$  и  $HB$  отсутствует.

Таблица 1.2

Коэффициент перевода числа твердости  $HB$  в предел прочности  $\sigma_B$

Материал	Коэффициент $\chi$
Стали с твердостью до 450 $HB$	0,35
Литейные алюминиевые сплавы	0,25
Деформируемые алюминиевые сплавы	0,38
Латуни и бронзы	0,45

### Измерение твердости по методу Роквелла

Сущность этого метода заключается в том, что в испытуемый материал вдавливаются алмазный конус либо стальной закаленный шарик диаметром  $d = 1,588$  мм (1/16 дюйма) или  $d = 3,175$  мм (1/8 дюйма) (ГОСТ 9013–59).

Вдавливание индентора в материал проводится под действием двух последовательно прилагаемых нагрузок (рис. 1.3):

- предварительной  $P_0$ ;
- общей  $P = P_0 + P_1$ , где  $P_1$  – основная нагрузка.

Предварительная нагрузка  $P_0 = 10$  кгс (98,1 Н) не снимается до конца испытания. Эта нагрузка повышает точность испытаний.

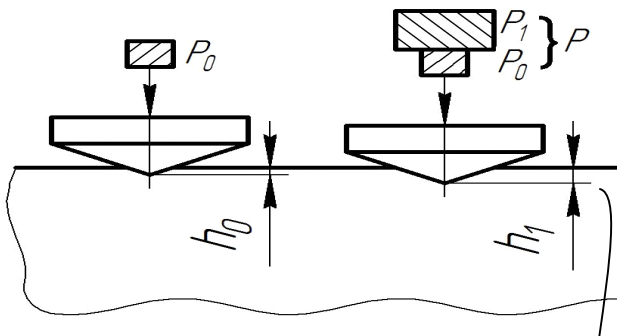


Рис. 1.3. Схема измерений твердости по Роквеллу

Под нагрузкой  $P_0$  индентор внедряется в материал на глубину  $h_0$ , при общей нагрузке  $P = P_0 + P_1$  индентор внедряется на глубину  $h_1$ .

Разность глубин внедрения от общей и предварительной нагрузок  $h = h_1 - h_0$  и определяет твердость по Роквеллу. При этом величина  $h$  пропорциональна числу твердости по Роквеллу. Чем больше разность глубин вдавливания  $h$ , тем меньше число твердости  $HR$  по Роквеллу.

Применение различных инденторов и усилий вдавливания дает возможность определять твердость по Роквеллу по 9 «шкалам», однако на практике для металлических материалов наиболее широко применяются только три:

- шкалы  $A$ ,  $C$  – при использовании в качестве индентора алмазного конуса. Твердость обозначается  $HRA$ ,  $HRC$ ;

- шкала  $B$  – при использовании в качестве индентора стального закаленного шарика. Твердость обозначается  $HRB$ .

Шкала  $A$  используется для измерения твердости материалов с очень высокой твердостью (твердые сплавы).

Шкала  $C$  применяется для измерения твердости металлов с достаточно высокой твердостью (стали после закалки и отпуска).

Шкала  $B$  используется для измерения твердости материалов с низкой твердостью (стали и чугуны в отожженном или нормализованном состоянии).

Единица твердости по Роквеллу – безразмерная величина представляющая собой отвлеченное число. Число твердости вычисляют по формулам:

$$HRC \vee (HRA) = 100 - e; \quad (1.5)$$

$$HRB = 130 - e, \quad (1.6)$$

где  $e = \frac{h - h_0}{0,002}$  (0,002 мм – цена деления индикатора прибора).

Инденторы, значения нагрузок  $P_0$ ,  $P_1$ ,  $P$  и диапазон измерений твердости для разных шкал представлены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Инденторы и нагрузки ( $P$ ), рекомендуемые для измерения твердости по Роквеллу

Шкала	Обозначение числа твердости, $HR$	Индентор	Нагрузки			Диапазон измерений твердости
			$P_0$	$P_1$	$P$	
			кгс ( $\times 9,81$ Н)			
<i>A</i>	<i>HRA</i>	Конус	10	50	60	20–88
<i>C</i>	<i>HRC</i>	Конус	10	140	150	20–77
<i>D</i>	<i>HRD</i>	Конус	10	90	100	40–77
<i>B</i>	<i>HRB</i>	Шарик $d = 1,588$ мм	10	90	100	20–100
<i>E</i>	<i>HRE</i>	Шарик $d = 3,175$ мм	10	90	100	70–100
<i>F</i>	<i>HRF</i>	Шарик $d = 1,588$ мм	10	50	60	60–100
<i>G</i>	<i>HRG</i>	Шарик $d = 1,588$ мм	10	140	150	30–94
<i>H</i>	<i>HRH</i>	Шарик $d = 3,175$ мм	10	50	60	80–100
<i>K</i>	<i>HRK</i>	Шарик $d = 3,175$ мм	10	140	150	10–40

На рис. 1.4, *a* представлен прибор для измерения твердости металлов по методу Роквелла типа ТК-2. Шкала прибора имеет диапазон 100 делений. Перемещение стрелки на одно деление соответствует 0,002 мм.



Рис. 1.4. Приборы для измерения твердости по Роквеллу:  
 а – модель ТК-2; б – модель TP 5014-01M

Современный прибор TP 5014-01M с электронной системой фиксации показаний для определения твердости по методу Роквелла различных конструкционных материалов показан на рис. 1.4, б.

В настоящее время значения твердости материалов методами Бринелля и Роквелла можно определять также на одном приборе. Универсальный твердомер УПТ-1 позволяет измерять твердость всеми рассмотренными методами. Переход от одного к другому требует лишь смены индентора и массы грузов.

### Оборудование

1. Образцы из углеродистой стали диаметром 30–60 мм, толщиной 20–50 мм.
2. Твердомер ТШ-2 для измерения твердости по методу Бринелля.
3. Отсчетный микроскоп МПБ-2.
4. Твердомер ТК-2 для измерения твердости по методу Роквелла.

## Порядок проведения испытаний

### Определение твердости по методу Бринелля на приборе ТШ-2

1. Выбрать условия испытания  $D/P/\tau$  по табл. 1.1 и настроить прибор.
2. Установить образец на столик и вращением маховика подвесить образец к шарикку до упора.
3. Включить электродвигатель для автоматического внедрения индентора в испытуемый материал с последующей выдержкой под нагрузкой, снятием нагрузки и автоматического отключения прибора.
4. Опустить столик, снять образец.
5. С помощью отсчетного микроскопа МПБ-2 измерить диаметр отпечатка  $d$  в двух взаимно перпендикулярных направлениях, определив среднее значение.
6. Определить число твердости по Бринеллю, используя специальную таблицу (приложение 4), где приведены рассчитанные значения  $HB$  для различных диаметров отпечатков, или рассчитав по формуле (1.3).

#### *Примеры обозначения твердости:*

170  $HB$  – значение твердости по Бринеллю в кгс/мм<sup>2</sup>, использовался стальной шарик диаметром  $D = 10$  мм, при нагрузке 3000 кгс (29430 Н) и выдержке 10 с;

600  $HBW$  – значение твердости по Бринеллю в кгс/мм<sup>2</sup> при тех же условиях испытания, использовался шарик из твердого сплава;

285  $HB$  5/750/30 – значение твердости по Бринеллю в кгс/мм<sup>2</sup> при иных условиях испытания, которые указываются после числа твердости. Использовался шарик диаметром  $D = 5$  мм, нагрузка – 750 кгс (7357,5 Н), продолжительность выдержки – 30 с.

### Определение твердости по методу Роквелла на приборе ТК-2

1. Выбрать условия испытания – индентор, основная нагрузка, шкала по табл. 1.3.
2. Установить образец на столик.
3. Вращением маховика подвести образец к индентору, при этом начинается вращение большой и малой стрелок на циферблате прибора. Вращение осуществлять до тех пор, пока малая стрелка не совместится с красной точкой. При этом осуществляется внедрение индентора с предварительным усилием  $P_0 = 10$  кгс (98,1 Н).

4. Большую стрелку совмещают с «0» черной шкалы (*C, A*) независимо от индентора. Это осуществляется поворотом зубчатого барабанчика, находящегося выше педали.

5. Включить прибор кнопкой или выключателем.

6. Приложить общее усилие нажатием на педаль. После нажатия педали большая стрелка начинает вращаться. После остановки большая стрелка показывает число твердости.

7. Зафиксировать положение стрелки прибора по одной из шкал. При использовании конуса число твердости считывается по «черной» шкале, для шарика – по «красной» шкале.

8. Отвести образец от индентора, отключить прибор от сети.

**Примеры обозначения твердости:**

33 *HRC* – твердость по Роквеллу 33 единицы по шкале *C*;

98 *HRB* – твердость по Роквеллу 98 единиц по шкале *B*;

75 *HRA* – твердость по Роквеллу 75 единиц по шкале *A*;

45 *HRC<sub>3</sub>* – твердость по Роквеллу 45 единиц по шкале *CB*, измеренная по эталонной плитке.

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткое описание определения твердости по методу Бринелля, схема определения твердости данным методом.
3. Краткое описание определения твердости по методу Роквелла, схема определения твердости данным методом.
4. Протоколы испытаний по прилагаемым формам (табл. 1.4 и 1.5).
5. Выводы.
6. Список использованной литературы.

Таблица 1.4

Протокол определения твердости по Бринеллю

Но- мер ис- пыт.	Условия испытания <i>D/P/t</i>	Диаметр отпечатка, мм			Твердость по Бринел- лю <i>HB<sub>1</sub></i> , кгс/мм <sup>2</sup> (МПа)	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа
		Вдоль	Попе- рек	Среднее арифметиче- ское		
1						
2						
3						

## Протокол определения твердости по Роквеллу

Но- мер ис- пыт.	Условия испытания		Шкала	Число твердости по Роквеллу <i>HRC (A..B)</i>	Перевод в число твердости по Бринеллю <i>HB</i> , кгс/мм <sup>2</sup> (МПа)
	Инден- тор	Нагрузка <i>P</i> , кгс (Н)			
1					
2					
3					

**Контрольные вопросы**

1. Что такое твердость металлов?
2. Какие существуют методы измерения твердости металлов?
3. В чем сущность измерения твердости металлов по методу Бринелля?
4. В чем сущность измерения твердости металлов по методу Роквелла?
5. Как обозначается твердость, измеренная по методу Бринелля, и как она рассчитывается?
6. Что является условиями испытания при измерении твердости по методу Бринелля?
7. Шарики каких диаметров применяются при измерении твердости по методу Бринелля?
8. Как выбирается усилие при испытании твердости по методу Бринелля?
9. Какая существует зависимость между твердостью по Бринеллю и пределом прочности?
10. Как обозначаются твердость и единицы измерения по методу Роквелла?
12. Какие инденторы используются при измерении твердости методом Роквелла?
13. Какие шкалы существуют при измерении твердости по Роквеллу?

14. Какое усилие применяется при измерении твердости по Роквеллу?

15. Какой недостаток измерения твердости по Бринеллю?

16. Какие требования к поверхности металла предъявляются при измерении твердости методами Бринелля и Роквелла?

17. Какая последовательность измерения твердости по методу Бринелля?

18. Какая последовательность измерения твердости по методу Роквелла?

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ, ПЛАСТИЧНОСТИ И ВЯЗКОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

### *Цель работы:*

- 1) ознакомить студентов с основными механическими свойствами металлических материалов;
- 2) изучить методы определения прочности, пластичности и вязкости металлов и сплавов;
- 3) приобрести навыки определения прочности, пластичности и вязкости металлов и сплавов.

**Студент должен знать:** физическую сущность понятий прочности, пластичности и вязкости металлов и сплавов; методы и оборудование для их определения, приемы безопасной работы и единицы измерения значений механических свойств.

**Студент должен уметь:** выбирать условия испытаний, провести определение прочности, пластичности и ударной вязкости на образцах для испытаний из углеродистых сталей, произвести расчет значений прочности, пластичности и ударной вязкости в единицах системы СИ.

### Общие сведения

В процессе эксплуатации различных устройств, механизмов и других изделий их детали испытывают различного рода нагрузки, вызывающие те или иные напряжения. Для правильного конструирования, изготовления и эксплуатации сельскохозяйственных машин необходимо знание механических свойств материалов, из которых они изготавливаются. По этим свойствам, которые определяют поведение металлов и сплавов при эксплуатации (конструкционная прочность) и обработке (сопротивление деформированию и пластичность), выявляется пригодность использования металлических материалов для конкретных условий работы деталей.

Основными механическими свойствами являются прочность, пластичность, упругость, твердость, вязкость, хрупкость и др.

**Прочность** – свойство материала сопротивляться разрушению под действием внешних сил.

**Пластичность** – свойство материала под действием внешних нагрузок получать остаточную деформацию, т. е. способность изменять, не разрушаясь, свою форму и размеры и сохранять их после снятия нагрузки.

**Упругость** – свойство материала восстанавливать свою первоначальную форму и размеры после снятия нагрузок.

**Вязкость** – свойство материала поглощать в заметных количествах, не разрушаясь, механическую энергию в необратимой форме.

**Хрупкость** – свойство материала разрушаться без заметного поглощения механической энергии в необратимой форме.

В зависимости от условий работы и характера нагрузки на испытываемую деталь для оценки механических свойств могут применяться различные способы испытаний. Существуют статические, динамические и циклические способы испытаний материалов.

**Статические испытания** на растяжение, сжатие, изгиб, кручение проводят путем плавного и постепенно возрастающего нагружения образцов до их разрушения.

**Динамические испытания** на ударную вязкость заключаются в приложении к образцу ударных нагрузок при значительных скоростях за очень короткий промежуток времени.

**Циклические испытания** на усталость характеризуются многократными изменениями прикладываемых нагрузок по направлению и величине.

Наиболее часто применяют статические и динамические методы испытаний металлов и сплавов.

В природе не существует идеально упругих и идеально пластичных материалов. Всякая упругая деформация сопровождается пластической деформацией, а полная деформация тела всегда состоит из упругой и пластической деформаций.

### **Статические испытания металлов на растяжение**

Основные характеристики прочности и пластичности определяются при статических испытаниях на растяжение ГОСТ 1497–84. Эти методы испытаний обеспечивают количественную оценку механических характеристик, которые определяют при растяжении образцов специальной формы (приложение 3).

Для статических испытаний на растяжение используют образцы, как правило, цилиндрической формы (рис. 2.1). Длина образца в 5 или 10 раз должна превышать его диаметр. Образец деформируется плавно возрастающей нагрузкой до его разрушения.

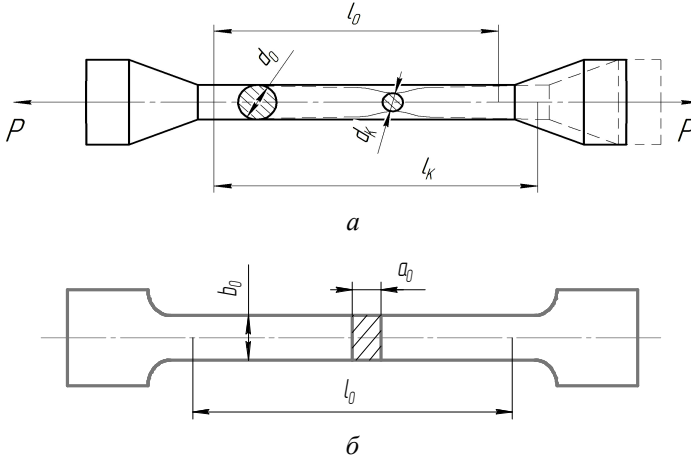


Рис. 2.1. Образцы для испытания на растяжение:  
а – круглый; б – плоский

При испытаниях фиксируется приложенная нагрузка и соответствующее удлинение образца. Зависимость между прикладываемой нагрузкой и удлинением образца удобно представить графически в виде диаграммы растяжения (рис. 2.2).

На оси абсцисс откладывают созданную деформацией  $\Delta l$  (удлинение образца), а по оси ординат – соответствующую ей нагрузку  $P$ . Форма диаграммы зависит от упруго-пластических свойств испытываемого металла. Современные испытательные машины позволяют автоматически получать диаграммы растяжения.

При статических испытаниях на растяжение в металлах возникают напряжения, которые являются основными характеристиками прочности испытываемого образца. Все характеристики прочности обозначаются буквой « $\sigma$ » (МПа (кгс/мм<sup>2</sup>)) и рассчитываются по формуле

$$\sigma = P / F_0 , \quad (2.1)$$

где  $P$  – соответствующая нагрузка, Н (кгс);  $F_0$  – начальная площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$  ( $\text{мм}^2$ ), для круглых образцов  $F_0 = \frac{\pi d^2}{4}$ .

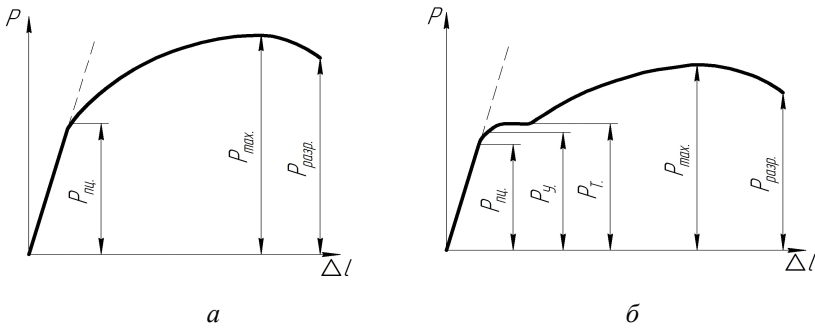


Рис. 2.2. Диаграммы растяжения:  
 а – без площадки текучести; б – с площадкой текучести

Существуют следующие основные характеристики прочности.

**Предел пропорциональности** (условный)  $\sigma_{\text{пл}}$  (МПа ( $\text{кгс}/\text{мм}^2$ )) – напряжение, при котором между нагрузкой  $P$  и удлинением  $\Delta L$  имеется прямо пропорциональная линейная зависимость, которая соответствует упругой деформации:

$$\sigma_{\text{пл}} = P_{\text{пл}} / F_0 . \quad (2.2)$$

**Предел упругости** (условный)  $\sigma_y$  (МПа ( $\text{кгс}/\text{мм}^2$ )) – напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,05 % первоначальной длины расчетной части образца:

$$\sigma_y = P_y / F_0 , \quad (2.3)$$

где  $P_y$  – нагрузка при удлинении образца на 0,05 %, Н (кгс);  
 $F_0$  – начальная площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$  ( $\text{мм}^2$ ).

**Предел текучести** (условный)  $\sigma_T$  (МПа (кгс/мм<sup>2</sup>)) – напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,2 % первоначальной длины участка образца:

$$\sigma_T = P_T / F_0, \quad (2.4)$$

где  $P_T$  – нагрузка при удлинении образца на 0,2 %, Н (кгс);

$F_0$  – начальная площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup> (мм<sup>2</sup>).

**Предел прочности при растяжении** (временное сопротивление разрыву)  $\sigma_B$  МПа (кгс/мм<sup>2</sup>) – условное напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке  $P_{\max}$ , предшествующей разрушению образца:

$$\sigma_B = P_{\max} / F_0, \quad (2.5)$$

где  $P_{\max}$  – максимальная нагрузка, предшествующая разрушению образца;

$F_0$  – начальная площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup> (мм<sup>2</sup>).

В общепринятой международной системе измерений СИ единица силы является производной от трех основных единиц: массы, длины и времени. Значительная часть приборов и оборудования, используемых в настоящее время для испытания металлов на растяжение, рассчитана на получение характеристик прочности в единицах системы МКГСС, одной из основных единиц которой является единица силы – килограмм-сила. При переводе единиц МКГСС в единицы СИ переводным коэффициентом является 9,81. Поэтому 1 кгс = 9,81 Н, а 1 кгс/мм<sup>2</sup> = 9,81 МПа.

**Пример.** Нагрузка, соответствующая условной текучести образца  $P_T$  диаметром  $d = 10$  мм, равна 5400 кгс (система МКГСС). Предел текучести  $\sigma_T$  равен

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0} = \frac{4 \cdot 5400}{3,14 \cdot 10^2} = 68 \text{ кгс/мм}^2.$$

Определить напряжение предела текучести  $\sigma_T$  в системе СИ. Выразим напряжение в кгс/мм<sup>2</sup>:  $\sigma_T = 68 \text{ кгс/мм}^2 = 68 \cdot 10^6 \text{ кгс/м}^2$  и введем коэффициент 9,81. Получим

$$\sigma_T = 68 \cdot 10^6 \cdot 9,81 = 667 \cdot 10^6 \text{ Па или } 667 \text{ МПа.}$$

В процессе статических испытаний образца на растяжение определяются следующие характеристики пластичности металла (приложение 3):

**относительное удлинение** после разрыва  $\delta$  – отношение разности конечной после разрушения и начальной длины образца  $\Delta l$  к первоначальной длине –  $l_0$  (в процентах)

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} 100, \% , \quad (2.6)$$

где  $l_k$  – длина образца после разрушения, м (мм);  
 $l_0$  – начальная длина образца, м (мм);

**относительное сужение** после разрыва  $\psi$  – отношение разности начальной площади и минимальной площади поперечного сечения образца в месте разрыва к начальной площади поперечного сечения образца (в процентах)

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} 100, \% , \quad (2.7)$$

где  $F_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup> (мм<sup>2</sup>);  
 $F_k$  – минимальная площадь поперечного сечения образца в месте разрыва, м<sup>2</sup> (мм<sup>2</sup>).

### **Динамические испытания металлов на ударную вязкость**

Определение вязкости проводится для металлов и сплавов, испытывающих в процессе эксплуатации ударные и другие динамические нагрузки. Вязкость определяет способность материала выдерживать динамические нагрузки, т. е. его склонность к хрупкому разрушению.

Для динамических испытаний на ударную вязкость используют призматические образцы с концентраторами напряжений различного типа ГОСТ 9454–78. Образцы с концентратором вида *U* применяются при выборе и приемочном контроле металлов и сплавов. Образцы с концентратором вида *V* применяются при контроле металлов и сплавов для конструкций повышенной степени надежности (летательные аппараты, транспортные средства, трубопроводы). Образцы с концентратором вида *T* применяются при контроле металлов и сплавов для особо ответственных конструкций. В качестве основного используется образец с концентратором вида *U* (рис. 2.3).

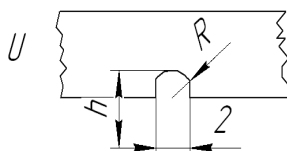


Рис. 2.3. Образец с *U*-образным концентратором для динамических испытаний

Ударной вязкостью называется механическая характеристика вязкости металла  $KC$ , Дж/м<sup>2</sup> (кгс·м/см<sup>2</sup>), равная работе удара, отнесенной к начальной площади поперечного сечения образца в месте концентратора. Ударную вязкость в системе СИ определяют по формуле

$$KC = \frac{K}{S_0}, \quad (2.8)$$

где  $K$  – работа удара, затраченная на разрушение образца, Дж;

$S_0$  – площадь поперечного сечения образца в месте надреза до испытания, м<sup>2</sup> (см<sup>2</sup>).

Метод определения ударной вязкости (ГОСТ 9454–78) основан на разрушении образца с концентратором напряжения, расположенным посередине, одним ударом маятникового копра. На рис. 2.4, *а* показана схема работы маятникового копра. В начале испытания маятник поднимают в верхнее исходное положение на высоту  $H_2$  с углом  $\alpha$ , в котором он удерживается защелкой. Положение образца и маятника при испытании изображено на рис. 2.4, *б*.

Испытуемый образец помещают горизонтально на две стальные закаленные опоры, привинченные внизу к стойкам станины таким образом, чтобы удар маятника приходился на участок с концентратором.

После спуска защелки молот маятника свободно падает, ломает испытуемый образец своим ножом и взлетает на некоторый угол  $\beta$ , поднимаясь на высоту  $h_2$ . Этот угол и подъем молота отмечают стрелкой на градуированной шкале. На излом образца маятник затрачивает определенную работу.

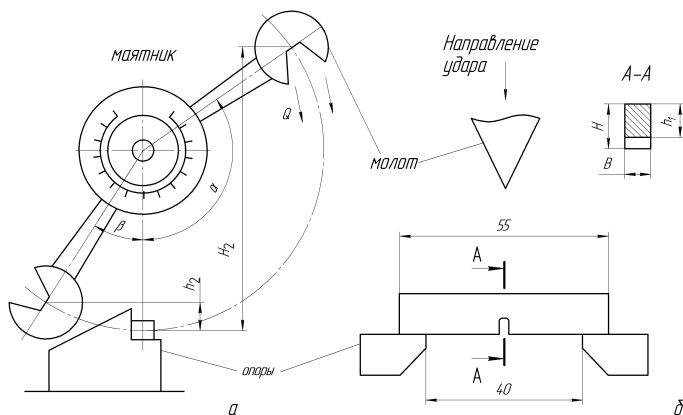


Рис. 2.4. Схема маятникового копра и испытания на ударную вязкость:  
*а* – схема работы маятникового копра;  
*б* – образец и положение маятника копра при испытании

Работа удара  $K$ , затраченная на излом образца и на потери при ударе, равна разности энергий маятника до и после разрушения образца:

$$K = Q (H_2 - h_2),$$

где  $Q$  – вес маятника.

Работу удара определяют по секторной шкале, проградуированной непосредственно в единицах измерения работы. Ее обозначают двумя буквами ( $KU$ ,  $KV$ ,  $KT$ ) и цифрами. Первая буква  $K$  – символ работы удара, вторая ( $U$ ,  $V$ ,  $T$ ) – вид концентратора. Последующие цифры обозначают максимальную энергию удара маятника, глубину

концентратора и ширину образца. Цифры не указываются при максимальной энергии удара маятника 300 Дж, глубине концентратора 2 мм вида  $U$ ,  $V$  и 3 мм вида  $T$ , ширине образца 10 мм (стандартные условия испытаний).

Работа разрушения образца шириной  $B = 10$  мм, высотой рабочего сечения  $h_1 = 8$  мм, после испытаний составляет 1,6 кгс·м (система МКГСС).

В системе СИ ударная вязкость  $KC$  рассчитывается по формуле (2.8), где  $K = 160$  кгс·см = 1,6 кгс·м = 1,6·9,81 Дж = 15,7 Дж.

$$S_0 = B \cdot h_1 = 10 \cdot 8 = 80 \text{ мм}^2 = 0,00008 \text{ м}^2 = 8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

Тогда:

$$KC = \frac{15,7}{8 \cdot 10^{-5}} = 1,92 \cdot 10^5 \text{ Дж/м}^2 = 0,192 \text{ МДж/м}^2.$$

### ***Примеры обозначений***

1.  $KV^{40} 50/2/2$  – ударная вязкость 50 Дж/м<sup>2</sup>, определенная на образце с концентратором вида  $V$  при температуре минус 40 °С. Глубина концентратора составляет 2 мм, ширина образца – 2 мм.

2.  $KCU 100$  ( $KCV 100$ ) – ударная вязкость 100 Дж/м<sup>2</sup>, определенная на стандартном образце с концентратором вида  $U$  ( $V$ ) при комнатной температуре.

## **Образцы и оборудование**

1. Образцы углеродистой качественной стали для статических испытаний на растяжение – цилиндрические диаметром 6–12 мм, плоские – толщиной 2–10 мм (см. рис. 2.1).

2. Образцы углеродистой качественной стали для динамических испытаний на ударный изгиб – призматические с концентратором напряжения длиной 55 мм (см. рис. 2.3).

3. Универсальная испытательная модернизированная машина УММ-5, предназначенная для статических испытаний металлов на растяжение, сжатие, изгиб с предельной нагрузкой 50 кН (5000 кгс). Машина работает по принципу разрывных машин с механическим нагружением образца и рычажно-маятниковым силоизмерителем.

Машина УММ-5 позволяет производить испытания при следующих нагрузках: цикл  $A - 0...5$  кН (500 кгс); цикл  $B - 0...10$  кН (1000 кгс); цикл  $B - 0...25$  кН (2500 кгс); цикл  $\Gamma - 0...50$  кН (5000 кгс).

4. Маятниковый копер КМ-5, предназначенный для динамических испытаний материалов, позволяет использовать один из трех маятников, имеющих различный вес. Маятник перед началом испытаний может быть зафиксирован при угле подъема  $\alpha$ , равном  $116^\circ$  или  $154^\circ$ . Стрелка КМ-5 после разрушения образца отклоняется и фиксируется в положении, соответствующем максимальному подъему маятника. Результат испытания показывает работу в кгс·см, которую выполняет маятник при разрушении образца. С учетом веса маятника и угла его подъема диапазон измерений может быть различным.

### **Порядок выполнения испытаний**

#### ***Порядок выполнения работы при испытании на растяжение***

1. Измерить размеры образца.
2. Выбрать шкалу отсчета по шкале нагрузок, исходя из размеров образца.
3. Закрепить образец в захватах.
4. Установить рабочую стрелку на «ноль».
5. Выбрать скорость перемещения захвата и рукояткой переключения скоростей включить соответствующую скорость.
6. Включить электродвигатель машины и начать испытание. В процессе испытания следить по указателю за нарастанием нагрузки вплоть до образования на образце шейки и его разрушения.
7. Определить максимальную нагрузку  $P_{\max}$ , записать в протокол испытания (табл. 2.1).
8. Выключить машину и снять с захватов обе части разорванного образца.
9. Замерить размеры разорванного образца.

#### ***Порядок выполнения работы при испытании на вязкость***

1. Осмотреть образец и убедиться в его пригодности к испытанию.
2. Положить испытуемый образец на опоры копра так, чтобы надрез образца был направлен внутрь станины, а удар маятника приходился бы со стороны, противоположной надрезу и строго по его центру.

3. Маятник отвести на необходимый угол в соответствии с выбранным запасом энергии и запереть его от самопроизвольного отпускания предохранителем.

4. Произвести испытание, для чего освободить маятник.

5. По шкале определить значение работы  $A_n$ , затраченной на разрушение образца, и записать в протокол испытания (табл. 2.2).

### Обработка результатов

#### *Обработка результатов испытания образцов на растяжение*

1. Записать данные замеров образца и максимальной нагрузки при испытании в протокол ( см. табл. 2.1).

2. Вычислить предел прочности образца стали  $\sigma_b$ , кгс/мм<sup>2</sup>, используя формулу (1.5).

3. Произвести перевод значения предела прочности образца  $\sigma_b$  из единиц системы МКГСС в единицы системы СИ.

4. Определить относительное удлинение образца  $\delta$ , %, по формуле (2.6);

5. Определить относительное сужение образца  $\psi$ , %, по формуле (2.7).

Таблица 2.1

Протокол испытаний на растяжение

Номер образца	Размеры образца, мм				Максимальная нагрузка $P_{max}$ , кгс	Предел прочности $\sigma_b$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %
	Диаметр		Длина						
	Начальный $d_0$	После разрыва $d_K$	Начальная $l_0$	После разрыва, $l_K$					
1									
2									
3									

#### **Обработка результатов испытания образцов на вязкость**

1. Записать размеры образца, вид концентратора и его глубину, а также работу, затраченную на разрушение образца  $A_n$  (кгс·см), в протокол испытаний (см. табл. 2.2).

2. Вычислить площадь поперечного сечения образца (см. рис. 2.4, б).
3. Определить значение ударной вязкости в единицах системы СИ по формуле (2.8).

Таблица 2.2

Протокол испытаний на ударную вязкость

Номер образца	Вид концентратора	Размеры образца, мм				Площадь поперечного сечения образца $S_0$ , м <sup>2</sup>	Работа удара		Ударная вязкость $K_C$ , Дж/м <sup>2</sup>
		Ширина образца $B$	Высота образца $H$	Глубина концентратора $h$	Высота рабочего сечения $h_1$		$A_{и\delta}$ , кГс·см	$K$ , Дж	
1									
2									
3									

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткое описание методов определения основных механических свойств металлов и сплавов.
3. Эскизы образцов для испытаний и схем испытательных машин.
4. Протоколы испытаний и расчеты значений прочности, пластичности и ударной вязкости образцов.
5. Выводы.
6. Список использованной литературы.

### Контрольные вопросы

1. Что такое прочность металлов?
2. Какие существуют характеристики прочности?
3. Что такое предел прочности металлов и в каких единицах он измеряется?
4. Что такое пластичность металлов?
5. Какие существуют характеристики пластичности?
5. Что представляют собой статические испытания?
6. Что представляют собой динамические испытания?

7. Что представляет собой диаграмма растяжения?
8. В каких единицах измерения определяются характеристики прочности?
9. В каких единицах измерения определяются характеристики пластичности?
10. Какие образцы используются для испытания на растяжение?
11. Что такое вязкость металлов и сплавов?
12. Что такое ударная вязкость металлов и сплавов и как она определяется?
13. В каких единицах измерения определяется ударная вязкость?
14. Какие образцы используются для испытания на вязкость?
15. Как обозначается значение ударной вязкости в системе СИ?
16. Какие виды концентраторов напряжения используются в образцах для испытаний на ударную вязкость?

## МИКРОСТРУКТУРНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

### *Цель работы:*

- 1) изучить микроструктурный метод исследования металлов;
- 2) изучить устройство металлографического микроскопа;
- 3) ознакомиться с процессом приготовления микрошлифов;
- 4) провести микроанализ сплава и определить марку стали.

**Студент должен знать:** сущность микроструктурного метода исследования металлов, устройство металлографического микроскопа, методику приготовления микрошлифов.

**Студент должен уметь:** приготовить микрошлифы для проведения микроанализа, пользоваться металлографическим микроскопом, определять марку стали по микроструктуре.

### Общие сведения

При изготовлении современной техники в большинстве случаев применяются не простые металлы, состоящие из одного элемента, а сплавы, которые обладают лучшими свойствами. Наибольшее применение в сельскохозяйственном машиностроении находят сплавы железа с углеродом (*стали и чугуны*), свойства которых зависят от многих факторов: химического состава, способа выплавки, скорости охлаждения, наличия неметаллических включений и т. д. Различие свойств определяется их внутренним строением – *структурой*. Для изучения строения металлов и сплавов используют различные методы: макроскопический анализ, микроструктурный анализ, рентгеноструктурный анализ. На практике наиболее часто используется микроструктурный метод исследования металлов.

**Макроскопический анализ** (макроанализ) заключается в изучении строения сплавов невооруженным глазом или с помощью небольших увеличений (до 30 раз) с помощью лупы. Строение металлов и сплавов, определяемое этим методом, называется *макроструктурой*.

Макроскопический анализ позволяет установить:

– строение металла или сплава в литых деталях или слитках, наличие и характер распределение зон кристаллизации, усадочных раковин, пористости, трещин;

- химическую неоднородность металла или сплава, получаемую в процессе кристаллизации;
- неоднородность состава и структуры металла или сплава, созданную термической обработкой или сваркой;
- строение металла после горячей и холодной обработки давлением (проката, штамповки,ковки и т. д.);
- характер излома металла или сплава.

**Микроструктурный анализ** (микроанализ) заключается в исследовании *микроструктуры* материалов при больших увеличениях (в 60–500000 раз) с помощью металлографических и электронных микроскопов.

В настоящее время используются несколько марок металлографических оптических микроскопов: МИ-1, Микро-2000 и др. Эти микроскопы для микроструктурного анализа сконструированы по одному принципу: изображение микроструктуры формируется светом, отраженным от поверхности изучаемого образца.

### **Методика приготовления микрошлифа**

Для микроструктурного метода необходимо приготовить специальный образец металла. *Микрошлифом* называется образец исследуемого металла, поверхность которого специально подготовлена для микроанализа. Подготовка микрошлифа состоит в получении плоского среза в нужном месте поверхности образца металла и последующего шлифования, полирования и травления этой поверхности. Заготовку для микрошлифа опиливают напильником или обрабатывают на наждачном круге.

Материалы, обладающие большой твердостью, разрезают вулканистыми или алмазными кругами, либо электроэрозионным способом. Образец при этом не должен разогреваться для исключения изменений структуры металла. Образцы небольших размеров для облегчения обработки размещают в специальных зажимах, состоящих из двух пластин, или помещают в металлические кольца и заливают легкоплавкими сплавами, эпоксидными смолами и т. п. Затем производится грубая шлифовка в три перехода на наждачных шкурках с номером зерна 63–50, 40–28 и 25–12.

Шлифовка ведется до исчезновения рисок от предыдущей обработки. Для этого при переходе на шлифовальную шкурку с меньшим

номером зерна, образец поворачивают на 90°. Тонкая шлифовка ведется в два перехода последовательно на шкурках M28–M20 и M14–M10, при этом образец слегка прижимается к кругу. Полировка производится на вращающемся фетровом круге. Поверхность фетра периодически смачивается суспензией абразива. В качестве абразива используются оксид хрома, оксид алюминия или магния. Полировка ведется до исчезновения рисок, видимых под микроскопом при увеличении в 100 раз. После полировки микрошлиф промывается в струе проточной воды, обезжиривается спиртом (смачиванием поверхности микрошлифа тампоном). Промытый и обезжиренный микрошлиф сушится фильтровальной бумагой. После промывки и сушки поверхность микрошлифа должна быть идеально чистой, без признаков загрязнения и следов влаги.

Травление микрошлифов сталей и чугунов производится 4 %-м раствором азотной кислоты в спирте окунанием или смачиванием тампоном. Длительность травления от 5 до 30 с. После травления производится промывка водой, а затем сушка фильтровальной бумагой. Контроль производится визуально – до равномерного потускнения поверхности. Микрошлиф рассматривается под микроскопом дважды: до травления и после травления.

При рассмотрении микрошлифа после полирования (до травления) под микроскопом виден светлый круг, на котором иногда заметны темные участки (серые или черные). Эти участки являются неметаллическими включениями в виде шлаков, оксидов, сульфидов и т. д. Если микрошлиф был приготовлен некачественно, то могут быть заметны царапины и другие дефекты обработки.

При рассмотрении микрошлифа после травления выявляется его микроструктура, которая имеет зернистое строение. При этом различные участки структуры имеют разный вид. Это объясняется тем, что травитель по-разному воздействует на границы и поверхность зерен. Поверхности зерен однофазных структурных составляющих (чистые металлы, твердые растворы, химические соединения) будут выглядеть светлыми, так как травитель воздействует на них равномерно. Луч света, падающий на такое зерно, будет отражаться от его поверхности, проходить в объектив и давать светлое отраженное изображение. Границы между зернами имеют повышенное содержание примесей и травятся (растворяются) быстрее, вследствие чего образуются углубления (канавки). Свет, падающий

на них, будет частично рассеиваться, и в результате они будут выглядеть более темными (рис. 3.1).

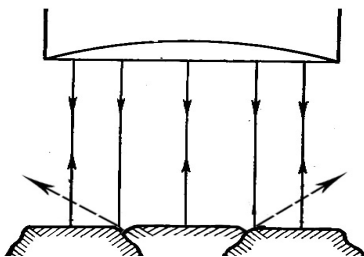


Рис. 3.1. Схема отражения лучей от полированной и протравленной поверхности микрошлифа, состоящего из однородных структурных составляющих

В зернах, состоящих из неоднородных составляющих двух или более фаз, например, механические смеси: перлит, ледебурит и т. п., каждая составляющая при воздействии травителя будет растворяться на различную глубину. В результате на поверхности таких зерен будет образовываться микрорельеф. Свет, падающий на поверхность протравленного неоднородного зерна, рассеивается и попадает в объектив микроскопа в меньшем количестве, чем и объясняется его темный цвет (рис. 3.2).

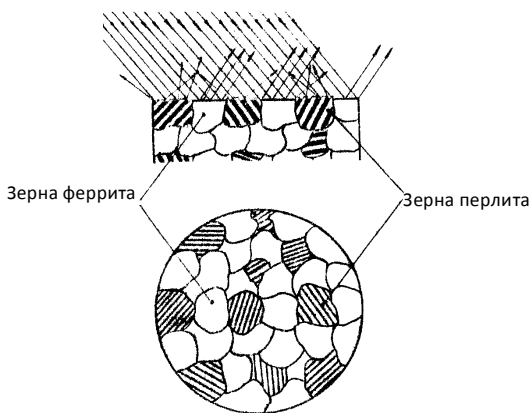


Рис. 3.2. Схема отражения лучей от полированной и протравленной поверхности микрошлифа, состоящего из неоднородных структурных составляющих

## Характеристики металлографического микроскопа

Металлографические микроскопы предназначены для визуального наблюдения и фотографирования непрозрачных объектов в отраженном свете с увеличением 60–1500 раз. Основными характеристиками микроскопа являются разрешающая способность, его общее и полезное увеличение.

**Разрешающая способность** микроскопа характеризуется минимальным расстоянием между двумя точками, при котором они различаются отдельно. Это расстояние может быть определено по формуле

$$d = \frac{\lambda}{A}, \quad (3.1)$$

где  $d$  – разрешающая способность, мкм;

$\lambda$  – длина световой волны, для белого света 0,6 мкм;

$A$  – числовая апертура объектива. Апертура (лат. *apertura* – отверстие) – характеристика оптического прибора, определяющая его способность собирать свет и противостоять размытию элементов изображения.

В оптическом микроскопе, какое бы большое увеличение ни применялось, нельзя увидеть объект, размеры которого меньше разрешающей способности ( $d = 0,2\text{--}0,3$  мкм).

**Полезное увеличение** микроскопа  $M$ , т. е. увеличение, при котором выявляются детали рассматриваемого предмета, определяется уравнением

$$M = \frac{d_1}{d}, \quad (3.2)$$

где  $d_1$  – разрешающая способность человеческого глаза. Наименьшая разрешающая способность глаза человека равна 300 мкм;

$d$  – разрешающая способность микроскопа, мкм.

Тогда полезное увеличение обычного объектива:

$$M = \frac{300}{0,3} = 1000 \text{ раз} . \quad (3.3)$$

**Общее увеличение** микроскопа определяется по формуле

$$V_{\text{м}} = V_{\text{ок}} \cdot V_{\text{об}}, \quad (3.4)$$

где  $V_{\text{ок}}$  и  $V_{\text{об}}$  – увеличения окуляра и объектива соответственно.

Наилучшее изображение микроструктуры достигается при правильном подборе (комбинации) увеличений объектива и окуляра. В современных оптических микроскопах, как правило, используется 10-кратный окуляр.

### Устройство микроскопа МИ-1

Металлографический микроскоп МИ-1 предназначен для металлографических исследований, для исследования разнообразных материалов в разнообразных отраслях науки и техники, а также в учебных целях.

На рис. 3.3 показан общий вид металлографического микроскопа МИ-1. Микроскоп состоит из следующих основных систем: оптической, осветительной, регистрирующей (с фотографической аппаратурой) и механической.

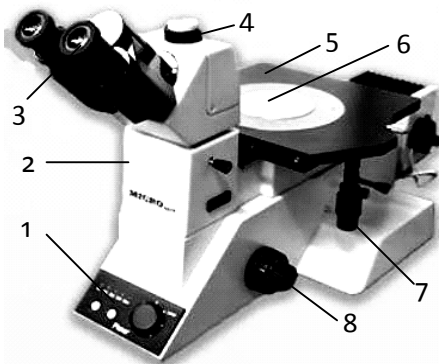


Рис. 3.3. Общий вид микроскопа МИ-1:

- 1 – панель регулировки освещения и перемещения объективов; 2 – корпус;
- 3 – окуляры; 4 – вывод для фотокамеры; 5 – предметный столик; 6 – образец;
- 7 – винты горизонтального перемещения столика;
- 8 – макро- и микрометрический винты настройки резкости

Оптическая система микроскопа включает объектив и окуляр, от которых зависит увеличение микроскопа, и ряд вспомогательных элементов: призмы, зеркала, линзы, диафрагмы. Они смонтированы в корпусе и нужны для того, чтобы сложный, рассеянный луч белого цвета превратить в прямолинейный луч и сфокусировать его в одной точке. Объектив представляет собой сочетание линз. Окуляр состоит из нескольких линз и предназначен для увеличения изображения, полученного объективом.

В осветительную систему микроскопа входят источник света, набор линз, светофильтры и диафрагмы. Источником света является электрическая лампа.

Механическая система включает устройства для макро- и микрофокусировки изображения структуры, а также для перемещения образца в горизонтальной плоскости. Перемещение предметного столика в горизонтальных направлениях для просмотра всей поверхности шлифа проводится специальной рукояткой.

В микроскопе МИ-1 используется отраженный свет. Микроскоп позволяет наблюдение структуры материалов в светлом и темном полях, поляризованном свете, а также с применением цветных светофильтров. Микроскоп имеет узел дифференциально-интерференционного контраста.

Микроскоп оснащен набором объективов, обеспечивающих увеличение до 1500 крат, которые помещены на пятипозиционную револьверную головку с электромеханическим приводом. Предметный стол микроскопа – поворотный с ручным управлением; ход стола по координатам X и Y составляет 25x25 мм, по оси Z – 7 мм.

Микроскоп имеет возможность подключения TV камеры.

### **Оборудование, материалы, инструменты**

1. Металлографический микроскоп МИ-1.
2. Шлифовально-полировальный станок.
3. Набор микрошлифов, зажимы.
4. Набор наждачных бумаг, оксид хрома, раствор травителя.
5. Плакаты, стенды, фотографии микроструктур сталей.

### **Порядок выполнения работы**

Для проведения микроструктурных исследований студенты получают набор шлифов доэвтектоидных сталей.

Шлифы предварительно шлифуются лаборантом. Их полирование и травление студент проводит самостоятельно.

На микроскопе МИ-1 при заданном увеличении ( $\times 200$ ) рассматриваются микроструктуры шлифов до и после травления.

Известно, что в углеродистой стали при концентрации углерода 0,8 % образуется эвтектоидная фаза, на 100 % состоящая из перлита. В доэвтектоидной стали (в соответствии с диаграммой состояния сплавов «железо–углерод») ее структура состоит из феррита и перлита.

Микроструктура доэвтектоидной стали приведена на рис. 3.4, *a*, ее схематическое изображение – на рис. 3.4, *б*.

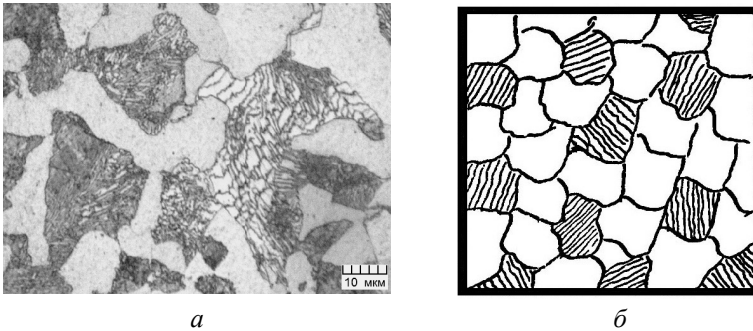


Рис. 3.4. Микроструктура доэвтектоидной стали (*a*) (увеличение  $\times 200$ ) и ее схематическое изображение (*б*)

Анализ содержания углерода в стали проводят путем определения процентного соотношения площадей, занимаемых темными (перлит) и светлыми (феррит) зернами в структуре.

По количественному соотношению площадей светлых и темных зерен (феррит, перлит), оцениваемых визуально, определяется количество перлита. По нему, с учетом содержания углерода в перлите (0,8 % C), определяют содержание углерода в стали и ее марку. В феррите при комнатной температуре содержится только 0,006 % C. Поэтому можно принять, что феррит является чистым железом.

**Пример.** Для структуры на рис. 3.4, *б* видно, что площадь темных зерен перлита в изучаемой стали примерно составляет 30 %. Тогда для определения содержания в ней углерода получаем пропорцию:

$$\begin{aligned} \text{перлит } 100 \% &- 0,8 \% \text{ C;} \\ \text{перлит } 30 \% &- X \% \text{ C.} \end{aligned}$$

Отсюда 
$$X = \frac{0,8 \cdot 30}{100} = 0,24 \% C,$$

что соответствует марке стали 25.

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Методы исследования структуры металлов и сплавов.
3. Описание технологии приготовления микрошлифов.
4. Схема отражения световых лучей от поверхности микрошлифа после травления.
5. Изображения микрошлифа до травления с указанием дефектов и после травления с указанием структурных составляющих.
6. Определение марки стали по микроструктуре приготовленного микрошлифа и полученной пропорции.
7. Выводы по работе.
8. Список использованной литературы.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение металлам и металлическим сплавам.
2. Какое строение имеют металлы и сплавы?
3. Что называется структурой?
4. Какие методы применяют для исследования внутреннего строения металлов?
5. Что называется макроанализом?
6. Что называется микроанализом?
7. Что называется микрошлифом?
8. Опишите технологию приготовления микрошлифа.
9. Чем производится грубая и тонкая шлифовки микрошлифа?
10. Как производится полирование микрошлифа?
11. Чем и с какой целью осуществляются травление микрошлифа?
12. Поясните схему видимости границ зерен под микроскопом.
13. Поясните схему видимости однородных и неоднородных зерен под микроскопом.
14. Какие вы знаете характеристики микроскопа?
15. Из каких основных узлов состоит микроскоп МИ-1?

## АНАЛИЗ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ «ЖЕЛЕЗО–ЦЕМЕНТИТ»

### **Цель работы:**

- 1) изучить диаграмму состояния сплавов «железо–цементит» и ее структурные составляющие;
- 2) выполнить индивидуальные задания по анализу железоуглеродистого сплава с применением правила фаз и правила отрезков.

**Студент должен знать:** основные структурные составляющие и фазы железоуглеродистых сплавов; превращения, происходящие в сплавах при нагреве и охлаждении.

**Студент должен уметь:** самостоятельно анализировать изменения, происходящие в железоуглеродистых сплавах, с помощью правила фаз и правила отрезков.

### **Общие сведения**

Диаграммы состояния сплавов железа с углеродом дают представления о превращениях, происходящих в сталях и чугунах в зависимости от температуры и концентрации сплавов.

Углерод может находиться в виде **цементита** (метастабильного равновесия) и **графита** (стабильного равновесия). В связи с этим существуют два варианта диаграмм состояния сплавов железа с углеродом – «железо–цементит» (*метастабильная*) и «железо–графит» (*стабильная*).

Большое практическое значение имеет метастабильная диаграмма «железо–цементит» ( $Fe-Fe_3C$ ), так как с ее помощью объясняют не только превращения в сталях и белых чугунах, но и осуществляют выбор оптимальных режимов термической обработки железоуглеродистых сплавов (рис. 1.1).

В железоуглеродистых сплавах при нагревании и охлаждении образуются следующие **структурные составляющие**: два твердых раствора, одно химическое соединение, две механические смеси.

### **Твердые растворы**

**Феррит** – твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железе. Максимальное содержание углерода  $C = 0,02$  % при температуре,

равной 727 °С. При комнатной температуре содержание углерода в феррите 0,006 %. Феррит – мягкая, пластичная структура со следующими механическими свойствами:  $\sigma_b = 250$  МПа,  $HB = 800$  МПа;  $\delta = 40$  %.

**Аустенит** – твердый раствор внедрения углерода в  $\gamma$ -железе. Максимальное содержание углерода – 2,14 % при температуре, равной 1147 °С. Аустенит существует до температуры  $t = 727$  °С; при этой температуре содержание углерода в аустените 0,8 %. Ниже 727 °С аустенит распадается. Аустенит тверже и прочнее феррита:  $\sigma_b = 600$  МПа;  $HB = 1800$ – $2000$  МПа.

### *Химическое соединение*

**Цементит** – химическое соединение  $Fe_3C$  (карбид железа). Цементит содержит углерода 6,67 %. Эта структура очень твердая и хрупкая:  $HB = 8000$  МПа;  $\delta = 0$  %; температура плавления – 1250 °С.

### *Механические смеси*

**Ледебурит** – механическая смесь аустенита и цементита (А+Ц), которая кристаллизуется из жидкого сплава с концентрацией  $C = 4,3$  % при постоянной температуре  $t = 1147$  °С. Ледебурит – эвтектическая смесь, твердая и хрупкая:  $HB = 6000$  МПа;  $\delta = 1$  %– $2$  %.

**Перлит** – механическая смесь феррита и цементита (Ф + Ц), которая кристаллизуется из аустенита при постоянной температуре  $t = 727$  °С. Содержание углерода в перлите 0,8 %. Перлит – эвтектоидная смесь, средней прочности и пластичности:  $\sigma_b = 650$  МПа;  $HB = 2000$  МПа;  $\delta = 20$  %.

Диаграмма сплавов «железо – цементит» имеет четыре фазы: жидкий сплав (Ж), цементит (Ц), феррит (Ф), аустенит (А).

### **Анализ диаграммы состояния сплавов «железо–цементит»**

Каждая точка метастабильной диаграммы состояния системы сплавов « $Fe$ – $Fe_3C$ » (рис. 1.1) характеризует состояние сплава строго определенного состава при определенной температуре (табл. 1.1).

Точка  $A$  ( $t = 1539$  °С) отвечает температуре плавления железа, а точка  $D$  ( $t = 1250$  °С) – температуре плавления цементита.

Линия  $ABCD$  – линия **ликвидус**. Это линия начала кристаллизации жидкого сплава.

По линии  $AB$  жидкий сплав кристаллизуется в виде феррита (Ф).

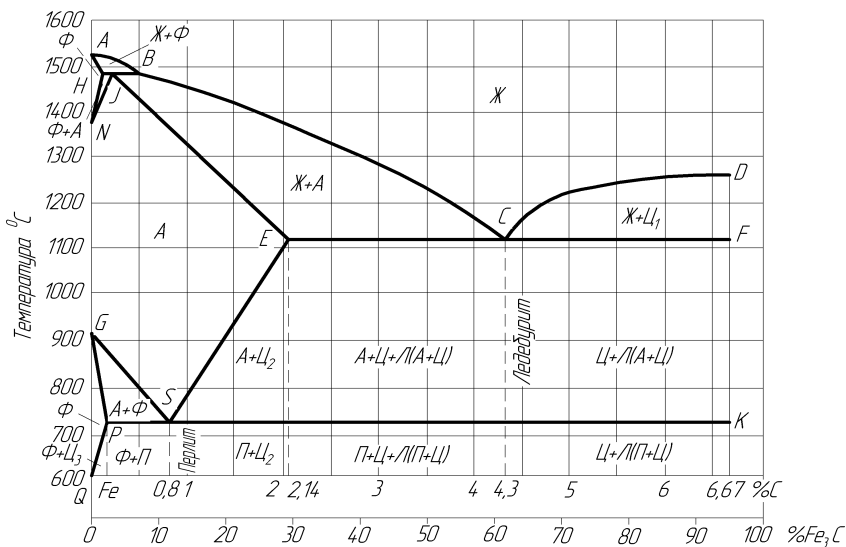


Рис. 1.1. Диаграмма состояния сплавов системы «железо–цементит»

По линии *BC* жидкий сплав кристаллизуется в виде аустенита (А).

По линии *CD* жидкий сплав кристаллизуется в виде цементита первичного ( $\text{Ц}_1$ ).

Линия *АНHJECF* – линия **солидус**. Это линия конца кристаллизации жидкого сплава.

По линии *АН* жидкость затвердевает в виде феррита (Ф).

По линии *JE* жидкость затвердевает в виде аустенита (А).

На линии *ECF* жидкость затвердевает в виде механической смеси аустенита и цементита – ледебурита (Л).

Линия *ECF* – линия **эвтектического или ледебуритного** превращения.

Линия *HJB* – линия **перитектического** превращения. Жидкость взаимодействует с ферритом, образуя аустенит (А).

Ниже линии *ES* из аустенита выделяется цементит вторичный ( $\text{Ц}_2$ ).

Ниже линии *GS* из аустенита выделяется феррит.

Линия *PSK* – линия **эвтектоидного или перлитного** превращения. Весь аустенит перекристаллизуется в перлит (П).

По линии *PQ* из феррита выделяется цементит третичный ( $\text{Ц}_3$ ).

Таблица 1.1

Точки диаграммы состояния «железо–цементит»

Обозначение	A	H	J	B	N	D	E	C	F	G	P	S	K
Концентрация углерода C, %	0	0,1	0,16	0,5	0	6,67	2,14	4,3	6,67	0	0,02	0,8	6,67
Температура, °C	1539	1499	1499	1499	1392	1250	1147	1147	1147	911	727	727	727

### Построение кривых охлаждения и определение концентрации и количественного соотношения фаз

Рассмотрим ряд примеров применения правила фаз и правила отрезков для выполнения заданий на конкретных железоуглеродистых сплавах, используя диаграмму состояния системы сплавов «Fe–Fe<sub>3</sub>C».

Общие закономерности изменения числа фаз в сплаве определяются **правилом фаз** (законом Гиббса), которое используется для анализа диаграмм состояния сплавов.

#### Правило фаз

Правило фаз в математической форме представлено уравнением

$$C = K + n - \Phi, \quad (1.1)$$

где  $C$  – степень свободы;

$K$  – число компонентов, образующих систему;

$\Phi$  – число фаз, находящихся в равновесии;

$n$  – число внешних факторов.

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

При использовании правила фаз в отношении металлов практически переменным считают только один внешний фактор – *температуру*, т. к. давление оказывает малое влияние, и уравнение принимает вид:

$$C = K + 1 - \Phi. \quad (1.2)$$

Анализ уравнения показывает, что в системе с двумя компонентами в равновесии может находиться не более трех фаз. Если в системе находится максимальное число фаз, то число степеней свободы равно  $C = 0$ , такое равновесие называется *инвариантным*. Это возможно в определенных условиях (при постоянной температуре и определенном составе находящихся в равновесии фаз).

### **Правило отрезков**

В процессе кристаллизации сплава изменяются концентрация фаз и их количественное соотношение. Для определения этих характеристик пользуются **правилом отрезков** (первое и второе положение). Используя диаграмму состояния двойных сплавов, с помощью правила отрезков можно в любой ее точке определить концентрации фаз и их количественный состав (содержание компонентов в %).

#### **Первое положение правила отрезков**

Для определения концентрации фаз или структур через данную точку, характеризующую состояние сплава, проводят горизонтальную линию (*каноду*) до пересечения с линиями, ограничивающими данные фазы или структуры. Проекция точек пересечения каноды с линиями диаграммы на ось концентрации показывают состав фаз или структур (рис. 1.2).

#### **Второе положение правила отрезков**

Для определения количественного соотношения фаз или структур через заданную точку проводят каноду до пересечения с линиями, ограничивающими данные фазы или структуры. Отрезки этой линии между заданной точкой ( $k$ ) и точками, определяющими составы фаз или структур ( $a$ ,  $b$ ), обратно пропорциональны количествам этих фаз (см. рис. 1.2).

Отношение количества жидкой фазы к количеству твердой фазы определяется отношением следующих отрезков:

$$\frac{Q_{\text{ж}}}{Q_{\text{тв}}} = \frac{ak}{kb}. \quad (1.3)$$

Отрезок данной каноды « $ab$ » характеризует количество обеих фаз в % и равняется 100 %. Отношение обратного отрезка ко всей каноде (« $ak$ »), умноженное на 100 %, определяет количество жидкой фазы

$$Q_{\text{ж}} = \frac{ak}{ab} \cdot 100, \%. \quad (1.4)$$

Количество твердой фазы ( $A$ )

$$Q_{\text{тв}(S_0)} = \frac{kb}{ab} \cdot 100, \%. \quad (1.5)$$

**Пример 1.** Проанализируем превращения, происходящие в сплаве I с 0,6 % углерода и 99,4 % железа, построив кривую охлаждения с помощью правила фаз, определим его состав и количественное соотношение структурных составляющих при температуре 650 °С с помощью правила отрезков. При выполнении задания необходимо осуществить следующие действия.

Вертикальная линия, соответствующая химическому составу сплава I, наносится на диаграмму состояния сплавов «железо – цементит» (см. рис. 1.2), точки пересечения данной линии с линиями диаграммы отмечаются цифрами «1», «2», «3», «4», «5».

Анализируются изменения, происходящие в сплаве при охлаждении, начиная с произвольной температуры в точке «0», расположенной в области жидкого состояния сплава.

Рассчитывается с помощью правила фаз число степеней свободы на отдельных участках линии сплава I.

На участке «01» происходит охлаждение жидкого сплава. Компонентов два – железо и углерод, фаза одна – жидкий сплав. По правилу фаз

$$C_{01} = 2 + 1 - 1 = 2 \text{ (жидкий сплав)}.$$

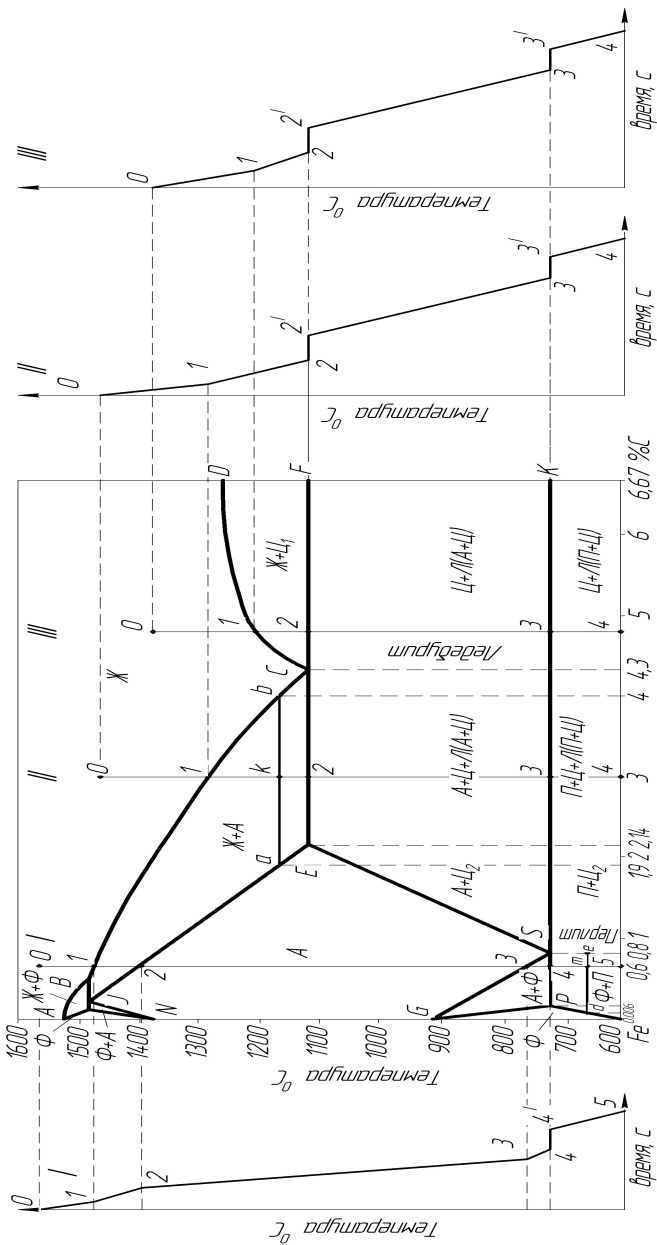


Рис. 1.2. Диаграмма состояния сплавов «железо–цементит»

В точке «1» при пересечении линии сплава I с линией ликвидус начинается процесс кристаллизации жидкого сплава с образованием аустенита. Процесс протекает от точки «1» до точки «2» при переменной температуре. Компонентов два – железо и углерод, фазы две – жидкий сплав и аустенит.

$$C_{12} = 2 + 1 - 2 = 1 \text{ (жидкий сплав, A)}.$$

В точке «2» линия сплава I пересекает часть линии солидус (IE). Это конец кристаллизации жидкого сплава. Жидкий сплав затвердевает в виде аустенита.

На участке «23» происходит охлаждение аустенита в виде твердой фазы. Компонентов два – железо и углерод, фаза – аустенит. Процесс протекает при переменной температуре.

$$C_{23} = 2 + 1 - 1 = 2 \text{ (A)}.$$

В точке «3» линия сплава I пересекает линию GS. На этой линии из аустенита выделяется феррит. На участке «34» от точки «3» до точки «4» происходит кристаллизация феррита из аустенита. Компонентов два – железо и углерод, фазы две – аустенит и феррит. По правилу фаз

$$C_{34} = 2 + 1 - 2 = 1 \text{ (}\Phi, A\text{)}.$$

В точке «4» линия сплава I пересекает линию эвтектоидного или перлитного превращения PSK. На этой линии весь аустенит превращается в перлит – механическую смесь феррита и цементита. Компонентов два – железо и углерод, фазы три – аустенит, феррит, цементит.

$$C_{44'} = 2 + 1 - 3 = 0 \text{ (A, }\Phi, Ц\text{)}.$$

На участке «45» происходит дальнейшее охлаждение сплава. Компонентов два – железо и углерод, фазы две – феррит и цементит.

$$C_{45} = 2 + 1 - 2 = 1 \text{ (}\Phi, Ц\text{)}.$$

Процесс протекает при переменной температуре.

Для определения состава и количественного соотношения структурных составляющих в точке «*m*» для сплава I при температуре 650 °С через данную точку проводим «каноду» – горизонталь до пересечения с линиями диаграммы «*Fe-Fe<sub>3</sub>C*», ограничивающими данные составляющие (точки «*e*» и «*d*»). Проекция, опущенная из точек «*e*» и «*d*» на ось концентрации, показывают концентрацию каждой структуры. Концентрация углерода в феррите в точке «*m*» равна 0,006 %, остальное – *Fe*. Концентрация углерода в перлите в точке «*m*» равна 0,8 %, остальное – *Fe*.

Количество феррита в точке «*m*» равно:

$$Q_{\text{феррита}} = \frac{me}{de} 100 \% ; \quad Q_{\text{феррита}} = \frac{0,8 - 0,6}{0,8 - 0,006} 100 \% = 20 \% .$$

Количество перлита в точке «*m*» равно:

$$Q_{\text{п}} = \frac{md}{de} 100 \% ; \quad Q_{\text{п}} = \frac{0,6 - 0,006}{0,8 - 0,006} 100 \% = 80 \% .$$

**Пример 2.** Проанализируем превращения, происходящие в сплаве II с 3 % углерода и 97 % железа, построив кривую охлаждения с помощью правила фаз, определим состав и количественное соотношение фаз при температуре 1150 °С с помощью правила отрезков. При выполнении задания необходимо осуществить те же действия, что и в примере 1.

Вертикальная линия, соответствующая химическому составу сплава II, наносится на диаграмму состояния сплавов «железо – цементит» (см. рис. 1.2), точки пересечения данной линии с линиями диаграммы отмечаются цифрами «1», «2», «3» и т. д. Изменения, происходящие в сплаве при охлаждении, изучаются, начиная с произвольной температуры в точке «0», расположенной в области жидкого состояния сплава.

Рассчитывается с помощью правила фаз число степеней свободы на отдельных участках линии сплава II.

На участке «01» происходит охлаждение жидкого сплава. Компонентов два – железо и углерод, фаза одна – жидкий сплав. По правилу фаз

$$C_{01} = 2 + 1 - 1 = 2 \text{ (жидкий сплав)}$$

В точке «1» при пересечении линии сплава II с линией ликвидус (BC) начинается процесс кристаллизации жидкого сплава с образованием аустенита. Процесс протекает от точки «1» до точки «2» при переменной температуре. Компонентов два – железо и углерод; фазы две – жидкий сплав и аустенит.

$$C_{12} = 2 + 1 - 2 = 1 \text{ (жидкий сплав, A)}.$$

В точке «2» линия сплава II пересекает часть линии солидус (ECF). Это окончание кристаллизации жидкого сплава. Жидкий сплав затвердевает в виде механической смеси аустенита и цементита (ледебурита). Компонентов два – железо и углерод, фазы три – жидкий сплав, аустенит, цементит. По правилу фаз

$$C_{22'} = 2 + 1 - 3 = 0 \text{ (жидкий сплав, A, Ц)}.$$

Образование ледебурита происходит при постоянной температуре.

На участке «23» из аустенита выделяется цементит вторичный. Компонентов два – железо и углерод, фазы две – аустенит, цементит.

$$C_{23} = 2 + 1 - 2 = 1 \text{ (A, Ц)}.$$

В точке «3» линия сплава II пересекает линию эвтектоидного превращения. На этой линии весь аустенит перекристаллизуется в перлит при постоянной температуре. Компонентов два – железо и углерод, фазы три – аустенит, феррит, цементит.

$$C_{33'} = 2 + 1 - 3 = 0 \text{ (A, Ф, Ц)}.$$

На участке «34» происходит дальнейшее охлаждение сплава. Компонентов два – железо и углерод, фазы две – феррит и цементит.

$$C_{34} = 2 + 1 - 2 = 1 \text{ (Ф, Ц)}.$$

Для определения состава и количественного соотношения фаз в точке «k» при температуре 1150 °С через данную точку проводим

«каноду» – горизонталь до пересечения с линиями диаграммы, ограничивающими данные фазы (точки «а» и «b»). Проекции, опущенные из точки «а» и «b» на ось концентрации, показывают концентрацию углерода в каждой фазе. Концентрация углерода в жидкой фазе в точке «k» равна 4 %, остальное – Fe, а концентрация углерода в твердой фазе – аустенит равна 1,9 %, остальное – Fe.

Количество жидкого сплава в точке «k» равно:

$$Q_{\text{ж.сплава}} = \frac{ak}{ab} 100 \% ; \quad Q_{\text{ж.сплава}} = \frac{3-1,9}{4-1,9} 100 \% = 41 \% .$$

Количество аустенита в точке «k» равно:

$$Q_A = \frac{kb}{ab} 100 \% ; \quad Q_A = \frac{4-3}{4-1,9} 100 \% = 59 \% .$$

**Пример 3.** Для сплава III с 4,8 % углерода и 95,2 % железа построить кривую охлаждения с помощью правила фаз. При выполнении задания необходимо осуществить те же действия, что и в примере 1.

Вертикальная линия, соответствующая химическому составу сплава III, наносится на диаграмму состояния сплавов «железо – цементит» (см. рис. 1.2), точки пересечения данной линии с линиями диаграммы отмечаются цифрами «1», «2», «3», «4».

Анализируются изменения, происходящие в сплаве при охлаждении, начиная с произвольной температуры в точке «0», расположенной в области жидкого состояния сплава.

Рассчитывается с помощью правила фаз число степеней свободы на отдельных участках линии сплава III.

На участке «01» происходит охлаждение жидкого сплава. Процесс протекает при переменной температуре. Компонентов два – железо и углерод, фаза одна – жидкий сплав. По правилу фаз

$$C_{01} = 2 + 1 - 1 = 2 \text{ (жидкий сплав).}$$

В точке «1» при пересечении линии сплава III с частью линии ликвидус (CD) начинается процесс кристаллизации жидкого сплава с образованием цементита первичного. Процесс протекает от точки

«1» до точки «2» при переменной температуре. Компонентов два – железо и углерод; фазы две – жидкий сплав и цементит.

$$C_{12} = 2 + 1 - 2 = 1 \text{ (жидкий сплав, Ц).}$$

В точке «2» линия сплава III пересекает часть линии солидус (*ECF*), являющейся линией эвтектического превращения. Это окончание кристаллизации жидкого сплава. Жидкий сплав затвердевает в виде механической смеси аустенита и цементита – ледебурита. Компонентов два – железо и углерод, фазы три – жидкий сплав, аустенит, цементит. По правилу фаз

$$C_{22'} = 2 + 1 - 3 = 0 \text{ (жидкий сплав, А, Ц).}$$

Образование ледебурита происходит при постоянной температуре.

На участке «23» происходит охлаждение аустенита и цементита при переменной температуре. Компонентов два – железо и углерод, фазы две – аустенит, цементит.

$$C_{23} = 2 + 1 - 2 = 1 \text{ (А, Ц).}$$

В точке «3» линия сплава III пересекает линию эвтектоидного превращения *PSK*. На этой линии весь аустенит кристаллизуется в перлит при постоянной температуре. Компонентов два – железо и углерод, фазы три – аустенит, феррит, цементит. По правилу фаз

$$C_{33'} = 2 + 1 - 3 = 0 \text{ (А, Ф, Ц).}$$

На участке «34» происходит дальнейшее охлаждение сплава. Компонентов два – железо и углерод, фазы две – феррит и цементит.

$$C_{34} = 2 + 1 - 2 = 1 \text{ (Ф, Ц).}$$

На основании вышеприведенных материалов студент в рабочей тетради после теоретического изучения диаграммы состояния «*Fe-Fe<sub>3</sub>C*» выполняет индивидуальное задание по анализу состояния железоуглеродистого сплава заданного химического состава.

## Содержание работы

1. Ознакомиться с целью работы.
2. Рассмотреть метастабильную диаграмму состояния сплавов « $Fe-Fe_3C$ » с указанием образующихся структурных составляющих и фаз.
3. Дать определения и привести механические свойства структурных составляющих.
4. Указать превращения, происходящие на линиях диаграммы состояния сплавов « $Fe-Fe_3C$ ».
5. Привести и пояснить применение правила фаз.
6. Рассмотреть первое и второе положения правила отрезков.
7. Для сплава определенного химического состава (по заданию преподавателя) построить кривую охлаждения с применением правила фаз. Описать фазовые превращения в этом сплаве при охлаждении.
8. Рассчитать, используя первое и второе положения правила отрезков, концентрации и количественное соотношение фаз и структурных составляющих в указанных точках.
7. Сформулировать выводы по выполненной работе.

## Контрольные вопросы

1. Назовите компоненты в железоуглеродистых сплавах.
2. Что такое феррит, какие его свойства?
3. Что такое аустенит, какие его свойства?
4. Что такое цементит, какие его свойства?
5. Что такое ледебурит, какие его свойства?
6. Что такое перлит, какие его свойства?
7. Назовите линию ликвидус, что на ней происходит?
8. Назовите линию солидус, что на ней происходит?
9. Назовите линию эвтектического превращения, что на ней происходит?
10. Назовите линию эвтектоидного превращения, что на ней происходит?
11. Как происходит образование цементита первичного, вторичного, третичного?
12. Для чего используется диаграмма состояния сплавов « $Fe-Fe_3C$ »?

13. Что является фазами в диаграмме состояния сплавов « $Fe-Fe_3C$ »?

14. Укажите предельную растворимость углерода в аустените и феррите.

15. Укажите на диаграмме области сталей и чугунов.

16. Сколько углерода содержится в феррите, аустените, цементите?

17. Постройте кривую охлаждения железоуглеродистого сплава с 2,5 % углерода, используя диаграмму состояния сплавов « $Fe-Fe_3C$ ».

18. На диаграмме состояния сплавов « $Fe-Fe_3C$ » для сплава с содержанием 2,5 %  $C$  при температуре 1200 °С определите состав и количественное соотношение жидкой и твердых фаз, используя правило отрезков.

## ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ, СВОЙСТВ И ПРИМЕНЕНИЯ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ

### *Цель работы:*

- 1) изучить влияние углерода и постоянных примесей на микроструктуру и свойства сталей и чугунов;
- 2) изучить классификацию, маркировку и применение углеродистых конструкционных и инструментальных сталей;
- 3) изучить классификацию, маркировку и области применения белых и серых чугунов.

**Студент должен знать** классификацию, маркировку, структуру и свойства углеродистых сталей и чугунов.

**Студент должен уметь** выбрать марку стали или чугуна для изготовления конкретной детали.

### Стали

#### Классификация сталей

**Стали** – сплавы железа с углеродом, содержание углерода в которых не превышает 2,14 %. Сталь является многокомпонентным сплавом, содержащим кроме углерода легирующие элементы и ряд постоянных примесей: *Mn, Si, S, P, O, N, H* и др., которые оказывают влияние на ее свойства.

*По химическому составу* стали классифицируются на углеродистые и легированные.

**Углеродистые стали** – сплавы железа с содержанием углерода от 0,02 % до 2,14 % с постоянными примесями: марганца (до 0,8 %), кремния (до 0,6 %), серы (до 0,06 %), фосфора (до 0,07 %) и газов (кислорода, водорода, азота), присутствующих в тысячных долях процента.

Классификация сталей производится по химическому составу, способу производства, назначению и качеству (рис. 4.1).

Углеродистые стали в зависимости от содержания углерода подразделяют на низкоуглеродистые (до 0,25 % C), среднеуглеродистые (0,25...0,60 % C) и высокоуглеродистые (свыше 0,60 % C).



Рис. 4.1. Классификация сталей

**Легированными** называются стали, в состав которых, кроме железа, углерода и постоянных примесей, входят специально введенные химические (*легирующие*) элементы: хром, никель, молибден, вольфрам и др., для придания стали требуемых свойств. Сталь также будет считаться легированной, если содержание в ней кремния превысит 0,5 %, а марганца – 1 %.

В зависимости от содержания легирующих элементов различают стали *низколегированные* (суммарное содержание легирующих элементов до 2,5 %), *среднелегированные* (2,5 %...10 %) и *высоколегированные* (более 10 %).

*По способу производства* стали делят на конверторную, марте-новскую и электросталь. Электросталь является наиболее чистой как по содержанию вредных примесей, так и по газовым и неметаллическим включениям. Этим способом выплавляют наиболее ответственные высококачественные марки углеродистой и легированной сталей.

В зависимости от *способа раскисления* жидкой стали в пла-вильном агрегате различают спокойную (**сп**), т. е. полностью рас-кисленную марганцем, кремнием и алюминием; полуспокойную (**пс**), раскисленную марганцем и кремнием; кипящую (**кп**), раскис-ленную только марганцем.

*По назначению* стали классифицируют на **конструкционные**, **инструментальные** и **специального назначения** (с особыми свойствами).

**Конструкционные стали** (0,05 %–0,70 % С) применяют в ма-шиностроении и строительстве для изготовления деталей машин, элементов конструкций и сооружений. Важнейшими характери-стиками сталей, по которым осуществляется их выбор, являются ме-ханические свойства.

**Инструментальные стали** (0,7 %–1,3 % С) служат для изготов-ления режущих, измерительных инструментов, штампов холодного и горячего деформирования. Основным требованием, предъявляе-мым к инструментальным сталям, является их высокая твердость, следовательно, износостойкость.

**Стали специального назначения** делятся на две группы – с особыми химическими и с особыми физическими свойствами.

Конструкционные и инструментальные стали могут быть угле-родистыми и легированными, а стали специального назначения – только легированными.

По *качеству* углеродистые стали подразделяют на стали **обык-новенного качества**, **качественные**, **высококачественные**.

Легированные стали по качеству подразделяются на стали **каче-ственные**, **высококачественные**, **особо высококачественные**.

**Качество стали** определяется содержанием вредных примесей и неметаллических включений, газонасыщенностью, степенью од-нородности химического состава.

Основным показателем, лежащим в основе классификации ста-лей по качеству, является содержание вредных примесей – серы и фосфора. Чем меньше указанных примесей, тем выше качество.

## Влияние углерода и примесей на структуру и свойства сталей

Микроструктуры технически чистого железа и углеродистых сталей характеризуются левой нижней частью диаграммы состояния сплавов «железо–цементит». Углерод в сталях находится в виде цементита. Сплавы с содержанием до 0,02 % углерода называются технически чистым железом; от 0,02 % до 0,8 % C – **доэвтектоидными** сталями; с содержанием 0,8 % C – **эвтектоидными** сталями; с содержанием более 0,8 % C – **заэвтектоидными** сталями.

С увеличением содержания углерода изменяется соотношение в структуре стали пластичной (феррит) и твердой (цементит) фаз (рис. 4.2), что является причиной повышения у стали прочностных ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$ ,  $HВ$ ) и снижения пластических ( $\delta$ ,  $\Psi$ ) свойств.

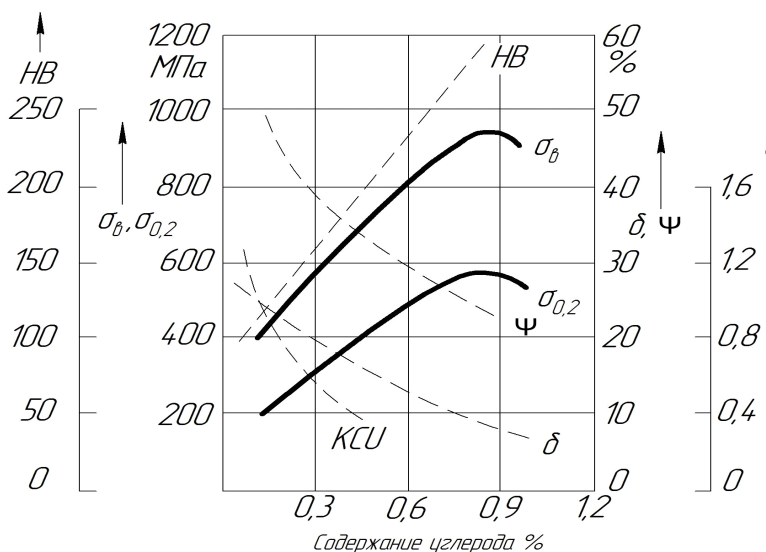


Рис. 4.2. Влияние углерода на механические свойства стали

Чем больше в стали углерода, тем больше цементита. Поэтому твердость ( $HВ$ ) тем больше, чем больше цементита в структуре стали. При количестве углерода 0,9 % и более предел прочности ( $\sigma_B$ ) и условный предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) снижаются из-за образования цементитной сетки по границам перлитного зерна.

Микроструктура доэвтектоидной углеродистой стали состоит из феррита и перлита (рис. 4.3). В доэвтектоидной стали после травления феррит выявляется в виде светлых полей, а перлит – в виде серых полей полосчатого строения.

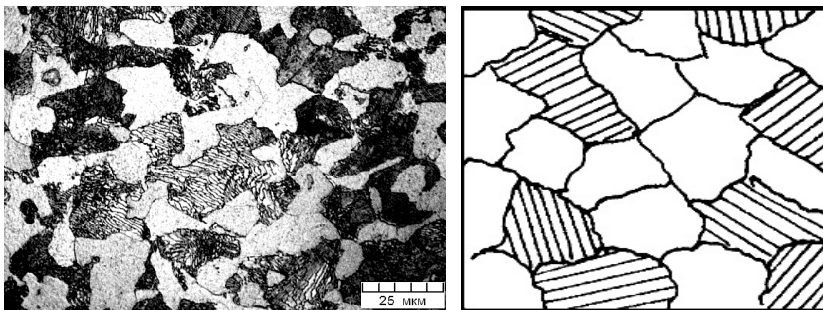


Рис. 4.3. Микроструктура углеродистой стали с 0,4 % углерода – слева, схема микроструктуры – справа

Микроструктура эвтектоидной стали состоит только из перлита (рис. 4.4). **Перлит** – это структурная составляющая, состоящая из двух фаз: феррита и цементита.

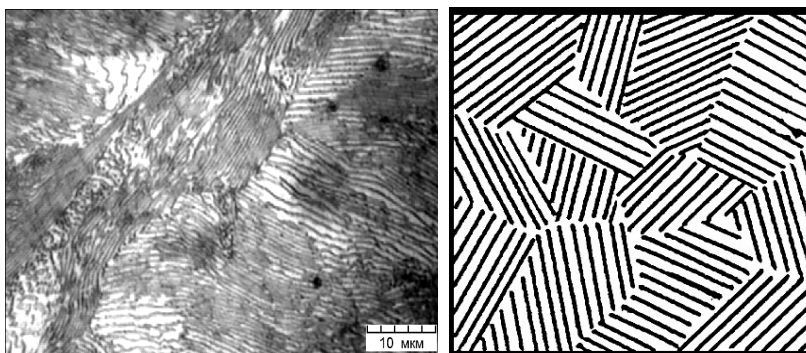


Рис. 4.4. Микроструктура эвтектоидной стали с 0,8 % углерода – слева, схема микроструктуры – справа

Заэвтектоидная сталь имеет структуру, состоящую из перлита и сетки вторичного цементита (рис. 4.5). Белая сетка – вторичный цементит, а внутри сетки зерна пластинчатого строения – перлит.

Чем больше углерода в заэвтектоидной стали, тем более широкой получается цементитная сетка.

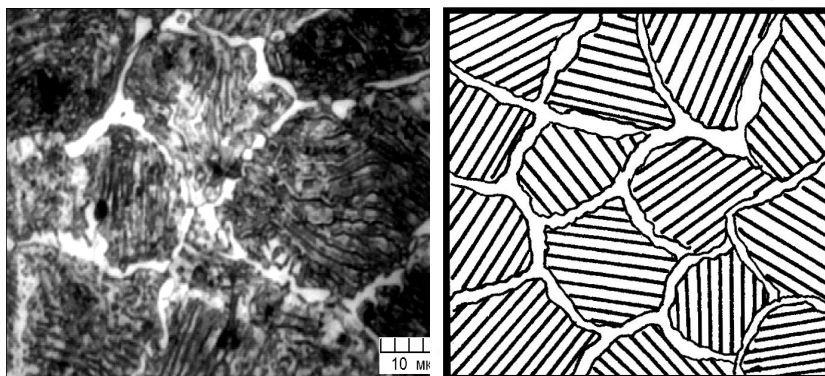


Рис. 4.5. Микроструктура заэвтектоидной стали с 1,0 % углерода – слева, схема микроструктуры – справа

Механические свойства стали зависят от формы и размера цементитных включений. Можно добиться образования округлых зерен цементита отжигом на зернистый перлит. Такая структура (смесь зерен цементита в ферритной основе (рис. 4.6)) может быть получена для эвтектоидной и заэвтектоидной сталей.

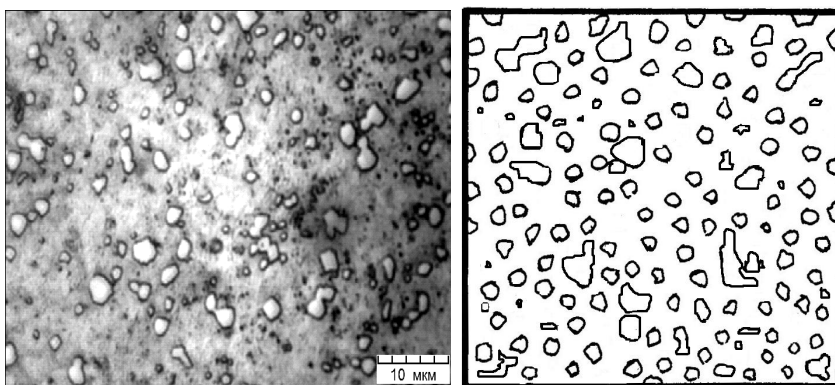


Рис. 4.6. Микроструктуры заэвтектоидной стали после отжига на зернистый перлит (слева), схема микроструктуры (справа)

Сталь со структурой зернистого перлита имеет более высокую прочность, чем сталь такого же химического состава, но имеющая в структуре перлит с сеткой цементита.

### Углеродистые конструкционные стали обыкновенного качества

**Углеродистые стали конструкционные обыкновенного качества** (ГОСТ 380–2005) предназначены для изготовления горячекатаного проката: сортового, фасонного, листового, ленты, проволоки, метизов. Сталь углеродистая обыкновенного качества широко применяется в строительстве и машиностроении для изготовления неотчетственных сварных, клепаных и болтовых конструкций, реже – малонагруженных деталей машин (валы, оси).

Углеродистые стали обыкновенного качества являются наиболее дешевыми, выплавляются по нормам массовой технологии. В них допускается повышенное содержание вредных примесей ( $S \leq 0,05 \%$ ,  $P \leq 0,04 \%$ ), а также газонасыщенность и загрязненность неметаллическими включениями.

Стали маркируют сочетанием букв «Ст» и цифрами от 0 до 6, указывающими номер марки. С увеличением цифры возрастает содержание углерода в стали и прочность (табл. 4.1). Цифры в их маркировке не указывают на содержание углерода.

Таблица 4.1

Углеродистые стали конструкционные обыкновенного качества (ГОСТ 380–2005)

Марка стали	Ст0	Ст1	Ст2	Ст3	Ст4	Ст5	Ст6
Содержание углерода, %	0,23	0,06–0,12	0,09–0,15	0,14–0,22	0,18–0,27	0,28–0,37	0,28–0,49
Содержание марганца, %	–	0,25–0,50	0,25–0,50	0,30–0,65	0,4–0,7	0,5–0,8	0,5–0,8

Области применения некоторых марок стали углеродистой обыкновенного качества указаны в табл. 4.2. Стали обыкновенного

качества в зависимости от степени раскисления могут быть кипящие (**кп**), полуспокойные (**пс**), спокойные (**сп**).

Таблица 4.2

Применение углеродистой стали обыкновенного качества

Марка стали	Применение
Ст0	Неответственные (нерасчитываемые) элементы конструкций: ограждения, настилы, перила и т. д.
Ст2кп	Неответственные детали, требующие повышенной пластичности; стали, работающие при положительных температурах
Ст1, Ст2, Ст3	Заклепки, котельные связи, гвозди
Ст3пс, Ст3сп	Несущие элементы конструкций и деталей, работающих при положительных температурах
Ст3пс, Ст3кп	Фасонные профили для каркасов и рам вагонов
Ст3кп, Ст3пс	Фасонные профили для обода колес автомобилей и для сельскохозяйственного машиностроения
Ст3сп, Ст3пс, Ст4сп	Фасонные профили для тракторостроения (швеллеры для рамы и уголок для корпуса трактора)
Ст5пс, Ст5сп	Детали клепаных конструкций, крепежные детали, ручки, тяги, рычаги, пальцы, штыри и др., детали, работающие в интервале температур от 0 до 425 °С Арматура периодического профиля (10–40 мм)
Ст6пс, Ст6сп	Бабы молотов, валы, оси, шпиндели неотвественного назначения

**Углеродистые конструкционные качественные стали**

*Углеродистые конструкционные качественные стали* (ГОСТ 1050–2013) маркируются числами, указывающими содержание углерода в сотых долях: 08, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75. Они могут быть с обычным и с повышенным содержанием марганца (обозначаются буквой Г в конце марки), с содержанием серы не более 0,04 %, фосфора – не более 0,035 %.

*Стали 08, 10кп, 15кп* – пластичные без термической обработки, применяются для листовой холодной штамповки, вытяжки. Из них производятся кузовные детали грузовых, легковых автомобилей.

*Стали 10, 15, 20, 25* – цементируемые стали, применяются для изготовления деталей, требующих твердости и износостойкости поверхностей при сохранении вязкой сердцевины.

*Стали 35, 40, 45, 50* – улучшаемые стали для изготовления валов, осей, втулок, шестерен, шатунов, поршневых пальцев, требующих высокой прочности при удовлетворительной вязкости.

*Стали 55, 60, 55Г, 60Г* – пружинно-рессорные, для изготовления деталей высокой прочности и упругости. После закалки и отпуска наилучшие механические свойства у сталей 55Г, 60Г.

*Стали 65, 70, 75, 65Г, 70Г, 75Г* – для производства деталей, требующих высокой износоустойчивости при абразивном изнашивании (долота, лемеха, лапы культиваторов, диски посевных и почвообрабатывающих машин). Наилучшие механические свойства у сталей 65Г, 70Г, 75Г.

### **Углеродистые инструментальные стали**

***Углеродистые инструментальные стали*** (ГОСТ 1435–99) выпускаются качественными (содержание серы не более 0,028 %, фосфора < 0,030 %) или высококачественными (содержание серы не более 0,018 %, фосфора < 0,025 %). В марке буква **У** обозначает – сталь углеродистая инструментальная, буква **А** – высококачественная, цифры показывают среднее содержание углерода в десятых долях процента.

Качественные стали – У7, У8, У9, У10, У11, У12, У13.

Высококачественные стали – У7А, У8А, У9А, У10А, У11А, У12А, У13А.

Примерное назначение:

У7, У8, У9, У7А, У8А, У9А – для изготовления инструментов по дереву, зубила, долота;

У10, У11, У10А, У11А – мелкие сверла, фрезы, метчики, развертки;

У12, У13, У12А, У13А – для инструментов с максимальной износостойкостью, напильники, граверный инструмент.

## Легированные стали

По *назначению* легированные стали делятся на **конструкционные, инструментальные и специального назначения**.

Буквы указывают на легирующий элемент, цифра после букв – количество легирующего элемента в целых долях (отсутствие цифры указывает, что оно составляет 1,0 %–1,5 %). Две цифры в начале маркировки стали указывают содержание углерода в сотых долях для конструкционных сталей, одна цифра – содержание углерода для инструментальных сталей в десятых долях, буква А в конце маркировки – сталь высококачественная.

Легирующие элементы: Х – хром; Г – марганец; М – молибден; В – вольфрам; С – кремний; Н – никель; Т – титан; К – кобальт; Ф – ванадий; Д – медь; Ю – алюминий; Р – бор; Б – ниобий; А (в середине марки) – азот.

Например, сталь 30ХГС обозначает содержание 0,28 %–0,35 % углерода, 0,8 %–1,1 % хрома, 0,9 %–1,2 % марганца, 0,8 %–1,2 % кремния.

Некоторые стали обозначаются условными буквами: А (в начале марки) – автоматная; Р – быстрорежущая; Ш – шарикоподшипниковая; Э – электротехническая.

Например, Р18 – инструментальная быстрорежущая сталь, 18 % вольфрама; ШХ15 – конструкционная подшипниковая сталь около 1,5 % хрома; 50ХФА – конструкционная легированная сталь с содержанием углерода около 0,50 %, хрома около 1 %, ванадия около 0,1 %, А – высококачественная; 09Г2С – конструкционная легированная сталь с содержанием углерода около 0,09 %, марганца около 2 %, кремния около 1 %.

## Чугуны

### Классификация чугунов

**Чугун** – это сплав железа с углеродом, с содержанием углерода свыше 2,14 % С и наличием постоянных примесей.

По назначению чугуны разделяют на *передельные* (85 %–90 % от всего объема производства), *литейные* (9 %–12 %), *специальные* (рис. 4.7).

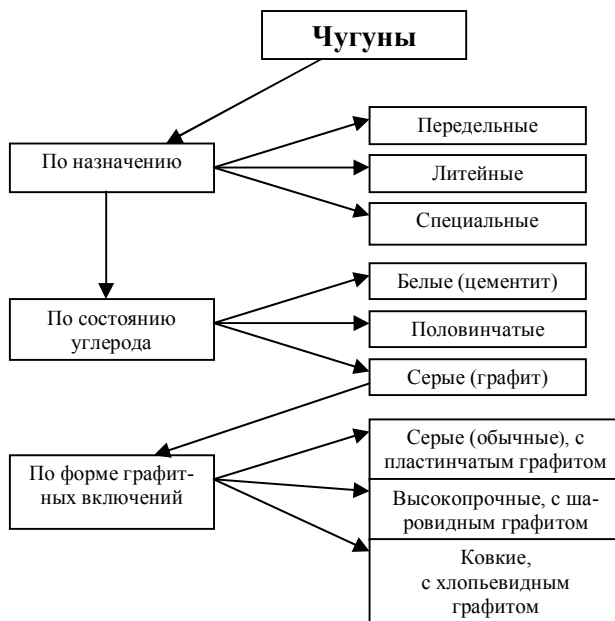


Рис. 4.7. Классификация чугунов

В зависимости от того, в каком виде углерод находится в чугунах, его разделяют на: **белый** – углерод находится в связанном состоянии (в виде цементита  $Fe_3C$ ); **серый** – углерод находится в свободном состоянии (в виде графита); **половинчатый** (отбеленный) – углерод может быть в виде графита и цементита.

По форме включений графита серые чугуны подразделяют на **серый** с пластинчатым графитом (СЧ), **ковкий** с хлопьевидным графитом (КЧ), **высокопрочный** с шаровидным графитом (ВЧ).

### Влияние примесей на структуру и свойства чугунов

На структурообразование чугуна влияют скорость охлаждения и количество элементов, способствующих **графитизации** – процессу образования графитных включений.

**Кремний** повышает механические свойства чугуна при концентрации не более 3,0 %–3,5 %. При более высокой концентрации кремния включения графита становятся грубыми, пластичность чугуна снижается.

**Марганец** увеличивает растворимость углерода в чугуне. При содержании более 0,5 % он повышает склонность чугуна к отбеливанию. Увеличение содержания марганца повышает усадку, что способствует образованию трещин и внутренних напряжений. Основное назначение марганца в чугуне – нейтрализация вредного влияния серы.

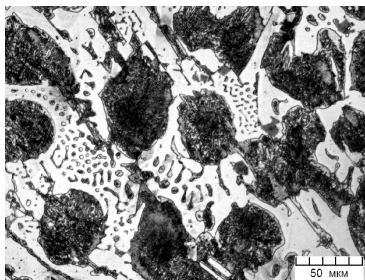
**Сера** – наиболее нежелательная примесь в чугуне. Ее влияние определяется формированием по границам зерен хрупкой тройной эвтектики. При повышении содержания серы жидкотекучесть чугуна ухудшается, усадка и склонность к образованию трещин повышаются.

**Фосфор** не оказывает существенного влияния на графитизацию. Фосфор сильнее других элементов повышает жидкотекучесть чугуна. Влияние фосфора на механические свойства чугуна отрицательные: способствует снижению ударной вязкости, повышает склонность к образованию холодных трещин.

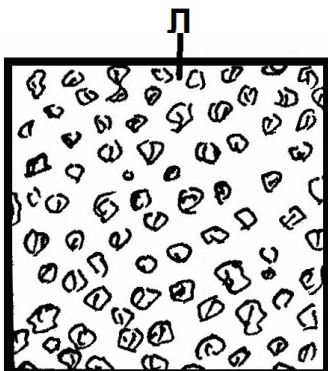
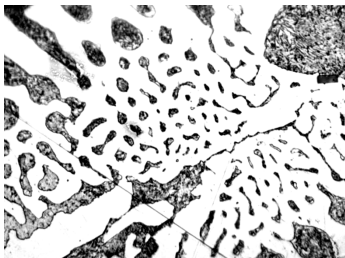
### Белые чугуны

**Белые чугуны** – это чугуны, в которых углерод находится в связанном состоянии, в виде цементита. Они очень твердые и хрупкие, плохо обрабатываются режущим инструментом. Поэтому отливки из белого чугуна применяются редко.

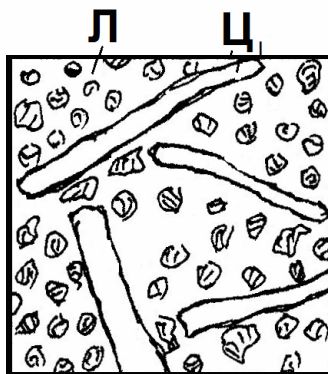
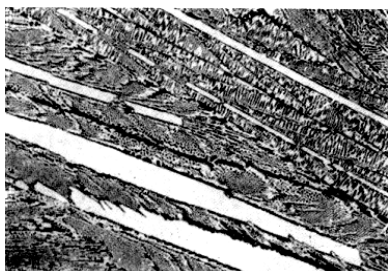
По структуре белые чугуны подразделяются (рис. 4.8) на доэвтектические (перлит + цементит + ледебурит), эвтектические (ледебурит), заэвтектические (цементит + ледебурит).



a



б



в

Рис. 4.8. Микроструктуры белого чугуна и их схемы:  
а – доэвтектическая; б – эвтектическая; в – заэвтектическая

## Серые чугуны

**Серые чугуны** – это чугуны, в которых углерод находится в свободном состоянии, в виде графита. В серых чугунах графитовые включения находятся в металлической основе (матрице). Структура матрицы может быть феррит, феррит + перлит, перлит в зависимости от содержания углерода и условий кристаллизации отливок (рис. 4.9).

Серый чугун (благодаря меньшей в сравнении со сталью температурой плавления и наличием в структуре графита) обладает лучшими литейными свойствами. Он имеет хорошую жидкотекучесть

и малую усадку. Отливки из серого чугуна с пластинчатым графитом составляют до 80 % общего объема чугунного литья. Серый обычный чугун – один из наиболее распространенных литейных сплавов. Он маркируется буквами СЧ и цифрами, указывающими минимальное значение временного сопротивления  $10^{-1}$  МПа (кгс/мм<sup>2</sup>) по ГОСТ 1412–85.

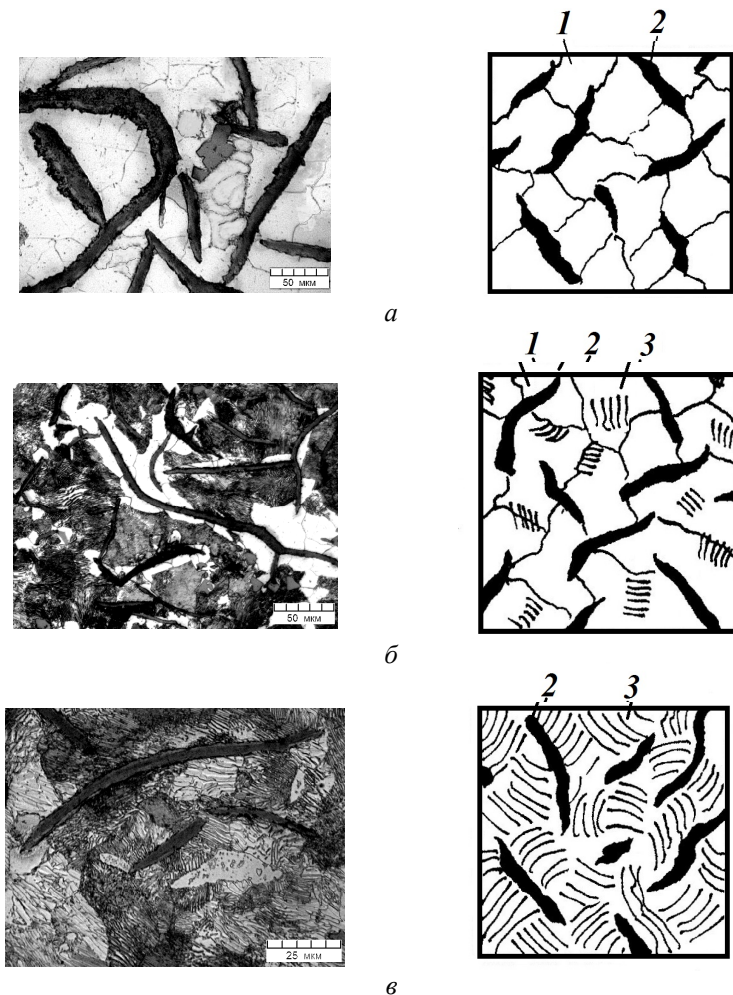


Рис. 4.9. Микроструктуры серого чугуна и их схемы:  
*а* – ферритный; *б* – перлитно-ферритный; *в* – перлитный;  
 1 – феррит; 2 – пластинчатый графит; 3 – перлит

**Серый обычный чугун** имеет графитные включения пластинчатой формы.

Механические свойства серых чугунов зависят от химического состава. Из табл. 4.3 видно, что для получения чугуна с высокой прочностью необходимо уменьшить суммарное содержание углерода и кремния при некотором увеличении содержания марганца. Такое изменение несколько ухудшает литейные свойства.

Прочностные свойства серого чугуна при испытании на сжатие значительно лучше, чем при испытании на растяжение и изгиб. Это объясняется концентрацией напряжений возле пластинок графита. Пластинки графита делают его хрупким, нарушая сплошность металлической основы чугуна. Их можно рассматривать как готовые трещины в прочной металлической основе. Чугун с перлитной основой более прочен и износостойчив.

Таблица 4.3

Механические свойства и химический состав серого чугуна по ГОСТ 1412–85

Марка чугуна	Механические свойства		Средний химический состав, %		
	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа (кгс/мм <sup>2</sup> )	<i>HВ</i>	Углерод	Кремний	Марганец
не менее					
<b>Ферритные чугуны</b>					
СЧ10	100 (10)	120...200	3,6	2,4	0,6
СЧ15	150 (15)	130...234	3,6	2,4	0,6
<b>Феррито-перлитный чугун</b>					
СЧ18	180 (18)	130...230	3,5	2,0	0,6
<b>Перлитные чугуны</b>					
СЧ20	200 (20)	143...240	3,4	1,8	0,5
СЧ25	250 (25)	155...255	3,3	1,8	0,8
СЧ30	300 (30)	163...270	3,1	1,6	0,8
СЧ35	350 (35)	179...290	2,95	1,4	0,9

Механические свойства серого чугуна определяются соотношением структурных составляющих – главным образом феррита, перлита и графита. Серый чугун с пластинчатым графитом имеет очень низкую пластичность, которая практически не зависит от характера металлической основы. Особенно значительную роль играют количество, форма, размеры и характер распределения

включений графита. Включения графита снижают прочность чугуна за счет уменьшения эффективной площади поперечного сечения. Кроме того, они играют роль внутренних концентраторов напряжений. Наряду с этим наличие графита в структуре чугуна обеспечивает такие его качества, как высокую циклическую вязкость и низкую чувствительность к внешним надрезам. Серый обычный чугун является основным конструкционным материалом для изготовления базовых отливок (табл. 4.4), работающих в условиях знакопеременных нагрузок и вибраций.

Таблица 4.4

Применение отливок из серого чугуна

Марка чугуна	Назначение
СЧ10, СЧ15	Малоответственные части сельскохозяйственных, текстильных и швейных машин, станочное литье, радиаторы
СЧ18, СЧ20	Ответственные части тракторов, автомобилей, станков, крупные шкивы и маховики
СЧ25, СЧ30	Ответственные отливки для дизелестроения, блоки автомобильных цилиндров. Поршневые кольца
СЧ30, СЧ35	Высокоответственные отливки: дизельные цилиндры, кулачковые валы, штампы и др. тяжело нагруженные отливки

### Высокопрочные чугуны

**Высокопрочным** называется чугун с шаровидной формой графита. Его получают введением в жидкий серый обычный чугун модификаторов (*Mg, Ce, Li* и др.). Матрица высокопрочного чугуна может быть ферритной, ферритно-перлитной и перлитной (рис. 4.10).

Высокопрочные чугуны (ГОСТ 7293–85) маркируются буквами ВЧ и цифрами, указывающими минимальное значение временного сопротивления  $10^{-1}$  МПа (кгс/мм<sup>2</sup>).

Существуют следующие основные марки высокопрочных чугунов (табл. 4.5). Ферритные чугуны ВЧ35 и ВЧ40 характеризуются умеренной прочностью и высокой пластичностью. Перлитно-ферритные чугуны ВЧ45 и ВЧ50 имеют более высокую прочность, но существенно

меньшую пластичность. Требуемые свойства чугунов этих двух классов получают непосредственно в литом состоянии без термической обработки. Перлитные чугуны ВЧ60, ВЧ70, ВЧ80 и ВЧ100 при значительно более высокой прочности, чем у перлито-ферритных чугунов, имеют практически равную пластичность. Содержание углерода во всех марках высокопрочного чугуна примерно одинаково – 3,2%–3,8%.

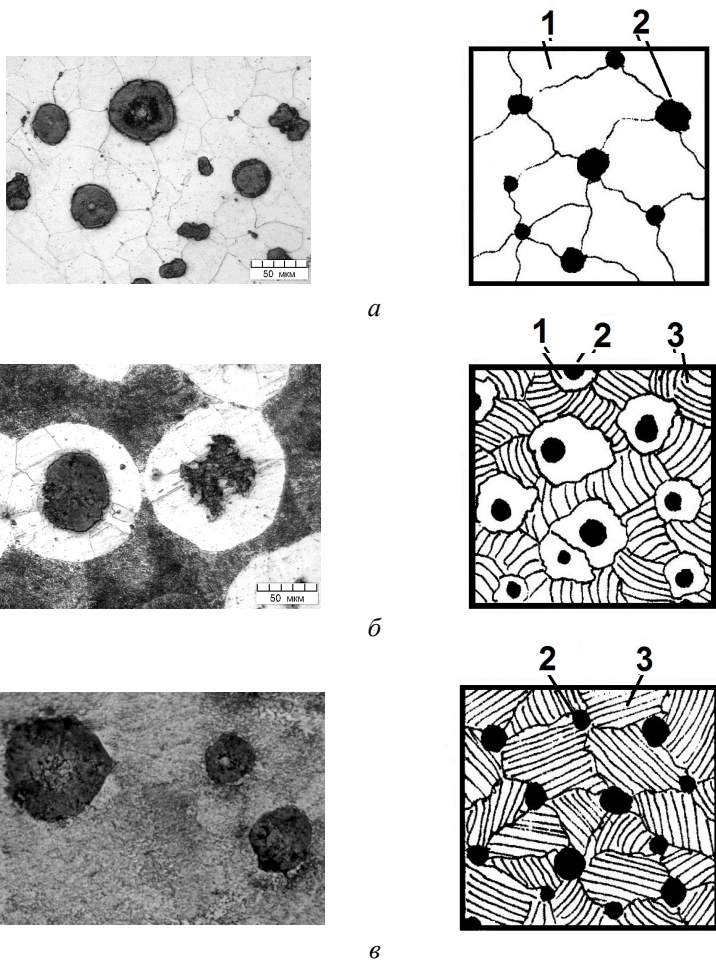


Рис. 4.10. Микроструктуры высокопрочного чугуна и их схемы:  
*а* – ферритный; *б* – перлитно-ферритный; *в* – перлитный;  
 1 – феррит; 2 – шаровидный графит; 3 – перлит

Таблица 4.5

Механические свойства и химический состав высокопрочного чугуна  
по ГОСТ 7293–85

Марка чугуна	Механические свойства				Средний химический состав, %		
	$\sigma_b$ , МПа (кгс/мм <sup>2</sup> )	$\sigma_m$ , МПа (кгс/мм <sup>2</sup> )	$\delta$ , %	<i>HВ</i>	Углерод	Крем- ний	Марга- нец
не менее							
<b>Ферритные чугуны</b>							
ВЧ35	350 (35)	220 (22)	22	140...170	2,7...3,8	0,8...2,9	0,2...0,6
ВЧ40	400 (40)	250 (25)	15	140...202	2,7...3,8	0,5...2,9	0,2...0,6
<b>Феррито-перлитные чугуны</b>							
ВЧ45	450 (45)	340 (34)	10	140...225	2,7...3,8	0,5...2,9	0,3...0,7
ВЧ50	500 (50)	320 (32)	7	153...245	2,7...3,7	0,8...2,9	0,3...0,7
<b>Перлитные чугуны</b>							
ВЧ60	600 (60)	370 (37)	3	192...277	3,0...3,6	2,4...2,8	0,4...0,7
ВЧ70	700 (70)	420 (42)	2	228...302	3,0...3,6	2,6...2,9	0,4...0,7
ВЧ80	800 (80)	480 (48)	2	248...351	3,2...3,6	2,6...2,9	0,4...0,7
ВЧ100	1000 (100)	700 (70)	2	270...360	3,2...3,6	3,0...3,8	0,4...0,7

Высокопрочные чугуны по механическим свойствам не уступают литым углеродистым сталям, сохраняя хорошие литейные свойства. Они находят применение в различных областях промышленности и сельского хозяйства (табл. 4.6).

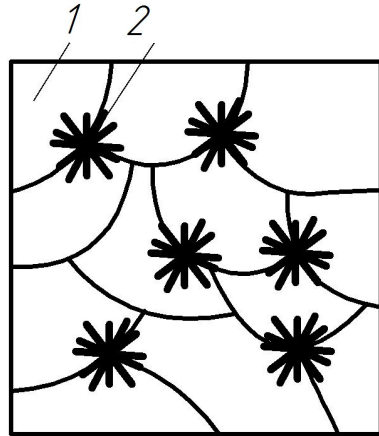
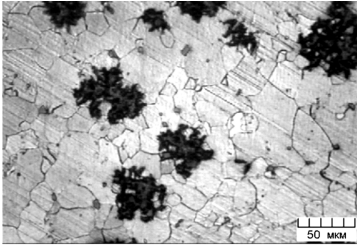
Таблица 4.6

Области применения высокопрочного чугуна

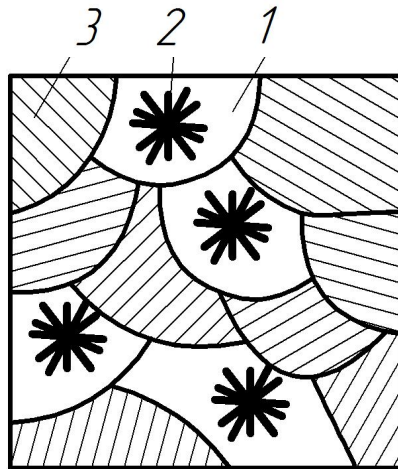
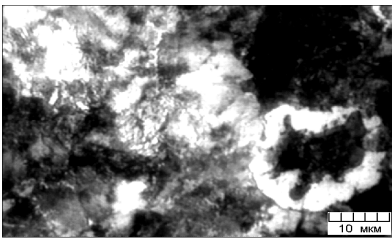
Марка чугуна	Наименование детали
ВЧ40	Корпус барабана механизма подъема крана, букса колеса приводного крана
	Поршень, крестовина, корпус гидротурбины, статор, сепаратор, корпус клапана паровой турбины
ВЧ50 ВЧ60	Коленчатые валы автомобильных и тракторных двигателей
ВЧ70 ВЧ80	Цилиндрические, конические шестерни

## Ковкие чугуны

**Ковким** называется чугун с хлопьевидным графитом, получаемый путем графитизирующего отжига белого чугуна. Матрица может быть перлитная, ферритная, перлитно-ферритная (рис. 4.11).



*a*



*б*

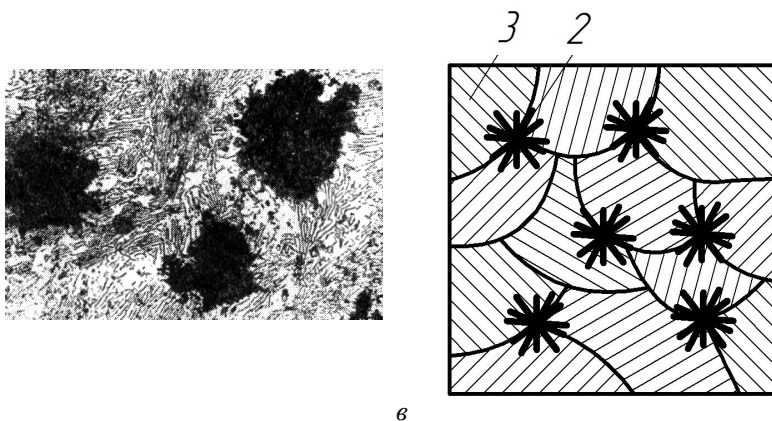


Рис. 4.11. Микроструктуры ковкого чугуна и их схемы:  
*a* – ферритный; *б* – перлитно-ферритный; *в* – перлитный;  
 1 – феррит; 2 – хлопьевидный графит; 3 – перлит

Графитизирующий отжиг является обязательной операцией технологического процесса получения отливок из КЧ. Основная цель отжига – обеспечить графитизацию всего цементита и получение ферритной матрицы, либо частичную графитизацию первичного цементита и образование феррито-перлитной основы.

Маркировка ковкого чугуна производится буквами КЧ и двумя числами, из которых первое обозначает минимальное значение временного сопротивления  $10^{-1}$  МПа (кгс/мм<sup>2</sup>), а второе – относительное удлинение (в %). Существуют следующие марки ковких чугунов по ГОСТ 1215–79 (табл. 4.7). Химический состав ковкого чугуна отличается пониженным содержанием графитизирующих элементов углерода (2,4 %...2,9 %) и кремния (1,0 %...1,6 %).

По уровню свойств ковкий чугун занимает промежуточное положение между серым чугуном и сталью. При этом он отличается от стали лучшими литейными свойствами, а от серого чугуна – более высокой вязкостью и пластичностью. Это послужило причиной получения названия «ковкий», хотя никаким процессамковки этот чугун не подвергается.

Основные преимущества ковкого чугуна заключаются в однородности его свойств по сечению отливки, отсутствии напряжений в отливках и сочетании высоких механических свойств с хорошей обрабатываемостью резанием.

Таблица 4.7

## Механические свойства и химический состав ковкого чугуна

Марка чугуна	Механические свойства			Средний химический состав, %		
	$\sigma_B$ , МПа (кгс/мм <sup>2</sup> )	$\delta$ , %	НВ	Углерод	Кремний	Марганец
	не менее					
Ферритные чугуны						
КЧ30-6	300 (30)	6	100...163	2,7	1,3	0,5
КЧ33-8	330 (33)	8	100...163	2,7	1,3	0,5
КЧ35-10	350 (35)	10	100...163	2,6	1,2	0,4
КЧ37-12	370 (37)	12	100...163	2,5	1,2	0,3
Феррито-перлитные чугуны						
КЧ45-6	450 (45)	7	150...207	2,6	1,2	0,6
КЧ500-5	500 (50)	5	170...230	2,6	1,2	0,6
КЧ55-4	550 (55)	4	192...241	2,6	1,2	0,6
Перлитные чугуны						
КЧ60-3	600 (60)	3	200...269	2,6	1,2	0,6
КЧ65-3	650 (65)	3	212...269	2,5	1,3	0,6
КЧ70-2	670 (70)	2	241...285	2,5	1,3	0,6
КЧ80-1,5	800 (80)	1,5	270...320	2,5	1,3	0,6

Ковкий чугун используется во многих отраслях машиностроения преимущественно для отливок толщиной стенки 5...50 мм. Из него изготавливают мелкие фасонные отливки, работающие в условиях динамических знакопеременных нагрузок: детали приводных механизмов, коробок передач, детали шасси в автотракторном машиностроении, коллекторы, рычаги и т. д. (табл. 4.8).

## Области применения ковкого чугуна

Марка чугуна	Наименование детали
КЧ30-6	Головки, кронштейны, гайки, глушители, мелкие фасонные отливки
КЧ33-8	Фланцы, муфты, фитинги арматуры
КЧ35-10	Скобы, ступицы, коллекторы, рычаги передач автомобилей и тракторов
КЧ37-12	Картеры редукторов, крюки, детали приводных механизмов
КЧ50-5	Вилки карданных валов автомобилей, звенья цепей конвейера
КЧ55-4	Втулки, муфты, тормозные колодки автомобилей

**ЧВГ** – это чугуны с вермикулярным графитом, в которых углерод находится в свободном состоянии, в виде графита в форме «червяков» (ГОСТ 28394–89). В чугунах графитовые включения находятся в металлической основе (матрице). Структура матрицы может быть феррит, феррит + перлит, перлит в зависимости от содержания углерода и условий кристаллизации отливок (рис. 4.12).

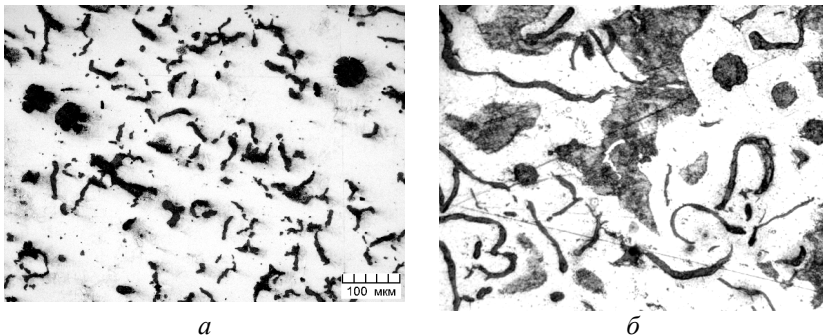


Рис. 4.12. Микроструктуры чугуна с вермикулярным графитом:  
а – без травления; б – после травления

## **Порядок выполнения работы**

1. Получить наборы шлифов углеродистых сталей и чугунов.
2. Рассмотреть на микроскопе МИМ-7 (МИМ-8) при увеличении  $\times 240$  шлифы образцов доэвтектоидной, эвтектоидной, заэвтектоидной углеродистых сталей; белого, серого, ковкого и высокопрочного чугунов.
3. Зарисовать схематично просмотренные микроструктуры сталей и чугунов, используя приведенные схемы структур.
4. Изучить классификацию, маркировку, свойства и применение углеродистых сталей и чугунов.
5. Сделать выводы по работе.

## **Приборы и оборудование**

1. Микроскоп МИ-1.
2. Набор шлифов углеродистых сталей.
3. Набор шлифов чугунов.
4. Фотографии и плакаты микроструктур углеродистых сталей и чугунов.

## **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Краткие сведения об углеродистых сталях и чугунах, классификация и маркировки углеродистых сталей и чугунов.
3. Схемы микроструктур углеродистых сталей и чугунов.
4. Выводы по работе.
5. Список использованной литературы.

## **Контрольные вопросы**

1. Что такое сталь?
2. Какие имеются постоянные примеси в сталях?
3. Как влияют постоянные примеси на свойства сталей?
4. Как классифицируются стали по способу производства?
5. Как классифицируются стали по химическому составу?
6. Как классифицируются стали по назначению?

7. Как классифицируются стали по качеству?
8. Как подразделяются углеродистые стали по структуре?
9. Как маркируются углеродистые стали обыкновенного качества?
10. Как маркируются конструкционные качественные стали?
11. Где применяются конструкционные качественные стали?
12. Как маркируются углеродистые инструментальные стали?
13. Что такое легированная сталь?
14. Что такое чугун?
15. Какие чугуны являются белыми?
16. Какие существуют структуры белых чугунов?
17. Какие чугуны являются серыми?
18. Как подразделяются серые чугуны в зависимости от формы графита?
19. Какие существуют структуры серых чугунов?
20. Как маркируются серые чугуны?
21. Какие чугуны считаются высокопрочными?
22. Какие чугуны считаются ковкими?
23. Какие чугуны считаются с вермикулярным графитом?

## ЗАКАЛКА И ОТПУСК СТАЛЕЙ

### **Цель работы:**

- 1) изучить теоретические основы термической обработки сталей;
- 2) практически освоить технологии закалки и отпуска закаленной стали;
- 3) изучить изменение структуры и свойств углеродистой стали в результате закалки и отпуска.

**Студент должен знать:** основные методы закалки и отпуска сталей, взаимосвязь структуры и свойств стали при закалке и отпуске.

**Студент должен уметь:** назначить режимы термической обработки углеродистых сталей.

### **Общие сведения**

В сельскохозяйственном машиностроении для изготовления и ремонта деталей, инструментов, приспособлений широко используют углеродистые стали. Для получения необходимых механических свойств, предъявляемых к стальным изделиям, их подвергают термической обработке.

**Термическая обработка** – это совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения. Цель термической обработки стали – изменение ее структуры, приводящее к изменению свойств (твердости, прочности, пластичности, износостойкости, обрабатываемости резанием и т. д.). Основными видами термической обработки являются отжиг, закалка и отпуск.

### **Отжиг стали**

**Отжиг стали** – термическая обработка, при которой сталь нагревают выше критических температур ( $A_{c1}$  или  $A_{c3}$ ), выдерживают при этих температурах и медленно охлаждают в основном вместе с печью (рис. 5.1). Основная цель отжига – приблизить металл к равновесному структурному состоянию, снять напряжения, вызванные предыдущей обработкой, снизить твердость, повысить пластичность, улучшить обрабатываемость резанием.

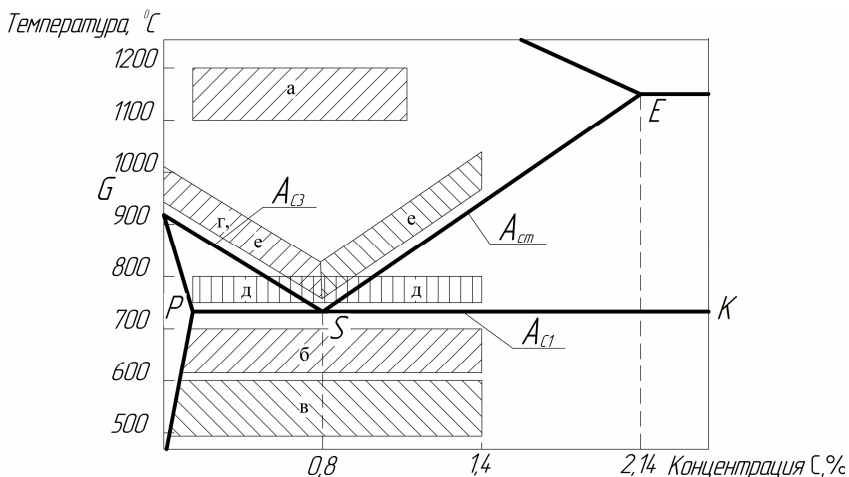


Рис. 5.1. Температурные зоны нагрева для различных видов отжига

- |                                |                  |
|--------------------------------|------------------|
| а – диффузионный отжиг         | } отжиги I рода  |
| б – рекристаллизационный отжиг |                  |
| в – низкий отжиг               |                  |
| г – полный отжиг               | } отжиги II рода |
| д – неполный отжиг             |                  |
| е – нормализация               |                  |

Отжики бывают I рода – без фазовой перекристаллизации и II рода – с фазовой перекристаллизацией.

К отжигу I рода относятся: диффузионный отжиг, рекристаллизационный отжиг, низкий отжиг.

К отжигу II рода относятся: полный отжиг, неполный отжиг, циклический отжиг, изотермический отжиг, нормализационный отжиг.

**Нормализационный отжиг (нормализация) стали** – термическая обработка, при которой доэвтектоидные стали нагревают выше критической точки  $A_{C3}$ , эвтектоидные и заэвтектоидные стали выше критической точки  $A_{cm}$  на  $30\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  с непродолжительной выдержкой и последующим охлаждением на воздухе. Цель нормализации – перекристаллизация зерна стали, снятие внутренних напряжений, подготовка стали к дальнейшей пластической деформации, механической или термической обработке.

## Закалка сталей

**Закалка сталей** – термическая обработка, которая заключается в нагреве доэвтектоидных сталей выше критической точки  $A_{C3}$ , эвтектоидных и заэвтектоидных сталей выше  $A_{C1}$  на  $30\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , выдержке при данной температуре и последующим быстрым охлаждением со скоростью больше критической. Цель закалки – повышение твердости стали за счет получения неравновесной структуры *мартенсита*. Мартенсит представляет собой пересыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе.

В зависимости от температуры нагрева различают следующие виды закалки – **полную** и **неполную** (рис. 5.2). При температуре нагрева выше  $A_{C3}$  закалка считается полной, если температура нагрева выше  $A_{C1}$ , закалка считается неполной.

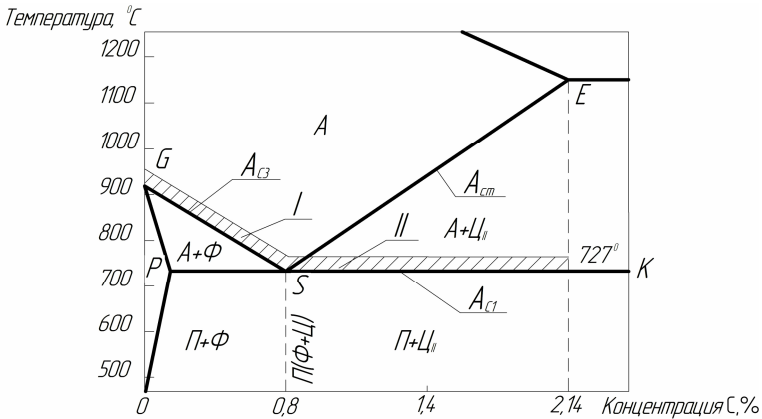


Рис. 5.2. Температурные зоны нагрева стали под закалку:  
I – полная закалка; II – неполная закалка

Для доэвтектоидных сталей применяют полную закалку, в результате которой образуется структура *мартенсита* с *небольшим количеством аустенита остаточного*.

Для заэвтектоидных сталей применяют неполную закалку. Структура после такой закалки представляет собой *мартенсит* и *цементит* с *небольшим количеством аустенита остаточного*. Наличие цементита в закаленной стали повышают ее твердость и износостойкость.

**Критическая скорость заковки** – минимальная скорость охлаждения, при которой происходит превращение аустенита в мартенсит (касательная к кривой начала распада аустенита на диаграмме изотермического превращения) (рис. 5.3).

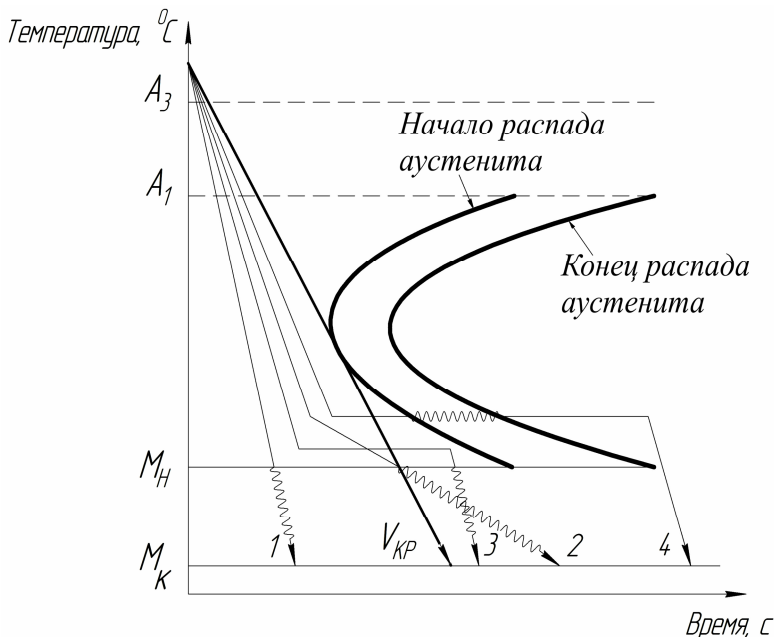


Рис. 5.3. Основные способы заковки стали:

- 1 – непрерывная (в одном охладителе); 2 – прерывистая (в двух охладителях);  
3 – ступенчатая; 4 – изотермическая

Неполная заковка не применяется для доэвтектоидных сталей, так как при этом образуется структура, состоящая из *мартенсита* и *феррита* и имеющая невысокую прочность и твердость. Полная заковка не применяется для заэвтектоидных сталей, поскольку в результате сохраняется большое количество аустенита остаточного, возможен перегрев стали, уменьшается твердость, а цементит отсутствует.

Необходимые структуры при заковке сталей можно получить, используя различные заковочные среды. Скорости охлаждения сталей при заковке в различных средах приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Скорость охлаждения стали в различных закалочных средах

Закалочная среда	Скорость охлаждения, °C/с при различных температурах, °C	
	650...550	300...200
Вода при температуре, °C		
18	600	270
28	500	270
50	100	270
10 %-й раствор <i>NaOH</i> в воде при 18 °C	1200	300
10 %-й раствор <i>NaCl</i> в воде при 18 °C	1100	20...50
Минеральное масло	100...150	20...50
Спокойный воздух	30	1

Для определения общей продолжительности времени нагрева при закалке  $\tau_{\text{общ}}$  используют формулу:

$$\tau_{\text{общ}} = \tau_{\text{сквозного нагрева}} + \tau_{\text{изотермической выдержки}}$$

или пользуются опытными данными (табл. 5.2).

Таблица 5.2

Ориентировочная продолжительность нагрева изделий в различных печах для закалки от 800 °C–850 °C

Вид нагрева	Продолжительность нагрева на 1 мм сечения или толщины изделия, с		
	Круглое	Квадратное	Прямоугольное
В электрической печи	40...50	50...60	60...75
В пламенной печи	35...40	45...50	55...60
В соляной ванне	12...15	15...18	18...22
В свинцовой ванне	6...8	8...10	10...12

Микроструктуры углеродистой доэвтектоидной стали после нагрева выше критической точки  $A_{c3}$  и последующего охлаждения с различной скоростью приведены на рис. 5.4.

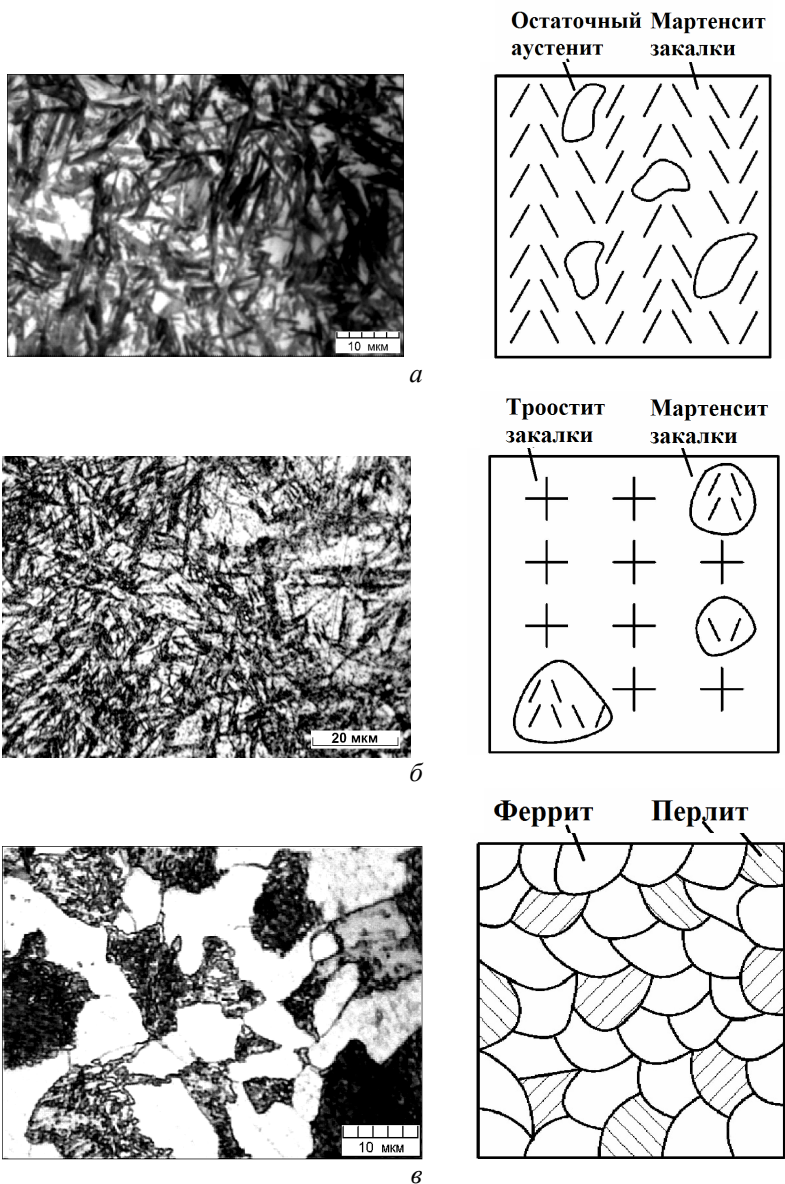


Рис. 5.4. Микроструктуры стали 45 после закалки и нормализации и их схемы: а – закалка в воду; б – закалка в масло; в – нормализация – охлаждение на воздухе

## Основные способы закалки

На способ закалки основное влияние оказывает метод охлаждения. Охлаждающая среда должна обеспечивать скорость охлаждения выше критической в интервале температур  $A_1-M_n$  и более плавное охлаждение в интервале температур мартенситного превращения  $M_n-M_k$  (см. рис. 5.3).

**1. Непрерывная закалка** (в одном охладителе) (см. рис. 5.3, кривая 1). Деталь нагревают до температуры закалки, затем быстро погружают в закалочную жидкость со скоростью охлаждения выше критической и выдерживают до полного охлаждения. Этот метод применяют для закалки деталей несложного профиля и крупного сечения. Недостаток этого метода состоит в том, что в результате неравномерного охлаждения детали по сечению возникают большие термические напряжения, которые могут привести к короблению детали или возникновению трещин.

**2. Прерывистая закалка** (в двух средах) (см. рис. 5.3, кривая 2). Деталь нагревают до температуры закалки, после чего охлаждают со скоростью больше критической до температуры, выше точки  $M_n$ , а затем быстро переносят в менее интенсивный охладитель, например, из воды в масло. В результате переноса во вторую закалочную среду мартенситное превращение протекает более медленно, вследствие чего уменьшаются внутренние напряжения. Данная закалка применяется для закалки инструмента несложного профиля, изготовленного из заэвтектидных углеродистых сталей.

**3. Ступенчатая закалка** (см. рис. 5.3, кривая 3). Деталь, нагретую до температуры закалки, охлаждают со скоростью выше критической в среде, имеющей температуру на  $30\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  больше мартенситной точки  $M_n$  (расплавленные соли, щелочи), выдерживают изотермически для выравнивания температуры по всему сечению изделия, чтобы не произошел распад аустенита на ферритоцементитную смесь, а затем охлаждают в масле или на воздухе. Данный метод обеспечивает закалку с минимальными внутренними напряжениями и применяется для деталей сложной конфигурации (сверла, метчики, зенкеры, фрезы, развертки и т. д.). Недостаток этого метода состоит в том, что его невозможно использовать для закалки деталей крупного сечения.

**4. Изотермическая закалка** (рис. 5.3, кривая 4) проводится так же, как и ступенчатая, но изотермическую выдержку выше точки

$M_n$  дают такую, чтобы произошел распад аустенита с образованием бейнита или другой структуры, соответствующей температуре выдержки. Внутренние напряжения и деформация при такой закалке минимальные. Изделие после закалки имеет меньшую твердость, но повышенные прочность, пластичность, ударную вязкость.

**5. Закалка с самоотпуском.** Деталь нагревают до температуры закалки, затем охлаждают в одном охладителе со скоростью больше критической непродолжительное время и прерывают охлаждение на 3–5 с. Затем деталь охлаждают полностью. При этом наружные слои детали претерпевают мартенситное превращение, а сердцевина – троостосорбитное. Вследствие теплообмена наружные слои за счет тепла внутренних слоев нагреваются до температур отпуска и таким образом происходит **самоотпуск**. В результате деталь приобретает высокую твердость поверхности, вязкую и прочную сердцевину (зубила, керны, лемеха, кузнечный инструмент и т. д.).

### Дефекты, возникающие при закалке стали

1. Низкая твердость в результате недогрева (доэвтектоидные стали были нагреты до температуры ниже  $A_{c3}$ , а эвтектоидные и заэвтектоидные – ниже  $A_{c1}$ ), или если охлаждение при закалке проводилось со скоростью ниже критической. Этот дефект может быть устранен повторной закалкой с правильным режимом.

2. Перегрев (повышенная хрупкость). Этот дефект возникает, если превысили температуру закалки на 100 °С...200 °С. В результате закалки образуется крупноигльчатый мартенсит. Этот дефект устраняется полным отжигом и последующей закалкой с правильным режимом.

3. Мягкие пятна на поверхности детали (участки с пониженной твердостью). Образуются при возникновении паровой рубашки, уменьшающей скорость охлаждения. Для устранения этого дефекта деталь необходимо перемещать в охлаждающей среде.

4. Окисление и обезуглероживание поверхности детали. Этот дефект возникает, если нагрев под закалку ведется в печи с окислительной атмосферой и устраняется при нагреве деталей в нейтральных атмосферах (азоте, аргоне и т. д.).

5. Деформации и коробление. Они могут быть устранены при медленном охлаждении деталей в области температур мартенситного превращения, изменением метода закалки и конструкции детали.

6. Внутренние и наружные трещины. Склонность к образованию трещин возрастает с увеличением в стали содержания углерода, с повышением температуры закалки и увеличением скорости охлаждения в температурном интервале мартенситного превращения. Трещины образуются в изделиях в местах концентраторов напряжений (резкое изменение сечения изделия или местные вырезы, углубления, выступы и т. д.). Трещины – неисправимый дефект.

После закалки стальные детали получают большие остаточные напряжения, которые могут привести к короблению или образованию трещин. Для предотвращения этих явлений после закалки детали подвергают отпуску.

### Отпуск сталей

**Отпуск стали** – термическая обработка, которая заключается в нагреве закаленной стали до температуры ниже  $A_{c1}$ , выдержке при заданной температуре и последующем охлаждении с определенной скоростью. Отпуск является окончательной операцией термической обработки, в результате которой сталь получает требуемые механические свойства. Отпуск полностью или частично устраняет *внутренние* напряжения, возникающие при закалке. При отпуске происходит переход стали в более устойчивое состояние, что сопровождается превращениями.

### Превращения при отпуске

**Первое превращение при отпуске** происходит при температуре  $80\text{ }^{\circ}\text{C}–200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При этом происходит перераспределение углерода, который выделяется из мартенсита и образует зародыши низкотемпературного гексагонального  $\epsilon$ -карбида  $Fe_{2,4}C$ . Тетрагональность мартенсита при этом уменьшается, соответственно, уменьшается его объем.

Образуется механическая смесь малоуглеродистого мартенсита и карбидов, которая называется **отпущенный мартенсит** или **мартенсит отпуска**. Твердость стали сохраняется максимальной, такой, которая получилась при закалке.

**Второе превращение при отпуске** происходит при температуре  $200\text{ }^{\circ}\text{C}…300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Протекает одновременно несколько процессов:

- 1) продолжается распад мартенсита;

2) начинается распад остаточного аустенита.

Твердость закаленной стали заметно не изменяется, но повышается хрупкость. Поэтому отпуск в зоне температур 200 °С–300 °С не производится.

**Третье превращение при отпуске** происходит при температуре 350 °С...450 °С. Завершается процесс выделения углерода из  $\alpha$ -раствора (мартенсита), осуществляется обособление решеток феррита и карбида, связанное с одновременным протеканием карбидного превращения, в результате которого образуется цементит ( $Fe_{2,4}C \rightarrow Fe_3C$ ). Изменяются размеры и форма карбидных частиц. Она приближается к сфероидальной. Образуется феррито-цементитная очень мелкая смесь, которая называется **троостит отпуска**. Твердость стали снижается ~ на 1/3 от максимума.

**Четвертое превращение при отпуске** происходит при повышении температуры до 500 °С...650 °С, которое приводит к изменениям микроструктуры: протекает процесс коагуляции и сфероидизации карбидов. Образуется более крупная феррито-цементитная смесь, которая называется **сорбитом отпуска**. Твердость стали снижается ~ на 2/3 от максимума.

Все превращения и образование структур при отпуске происходят при определенной температуре нагрева в процессе выдержки и не зависят от скорости охлаждения. Влияние температуры отпуска на механические свойства закаленной стали 45 представлены на рис. 5.5.

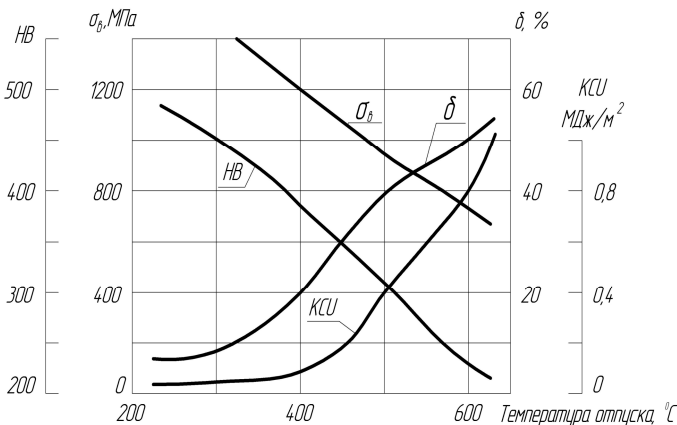


Рис. 5.5. Влияние температуры отпуска на механические свойства закаленной стали с содержанием 0,45 % углерода

## Виды отпуска

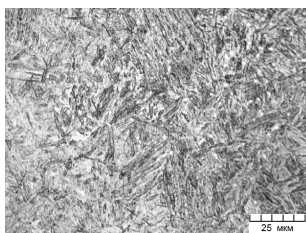
**Низкий отпуск.** Температура  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Структура стали – **мартенсит отпуска**. Твердость остается высокой –  $55\text{...}62\text{ HRC}$ , но уменьшаются остаточные напряжения. Низкий отпуск применяют для измерительного и режущего инструмента, после цементации, цианирования, поверхностной закалки, для деталей, требующих максимальной твердости.

**Средний отпуск.** Температура  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Структура стали после среднего отпуска – **троостит отпуска**. Твердость  $40\text{...}50\text{ HRC}$ . Охлаждение после этого вида отпуска рекомендуется проводить в воде, что приводит к образованию в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия, которые увеличивают предел выносливости деталей. Применяют для пружин, рессор и т. п.

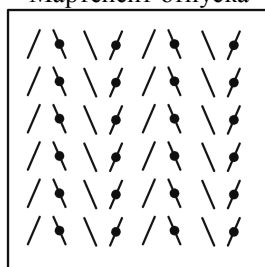
**Высокий отпуск.** Температура  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Структура – **сорбит отпуска**. Твердость  $25\text{...}30\text{ HRC}$ . Данная структура имеет высокую ударную вязкость. Этот вид отпуска применяют для деталей, работающих при знакопеременных и ударных нагрузках и не требующих высокой твердости: оси и полуси тракторов, автомобилей, валы, пальцы, болты, шатуны двигателей и др. Сочетание закалки и высоко-го отпуска в практике называется **улучшением стали**.

Структуры троостита и сорбита, получаемые отпуском, являются зернистыми, а те же структуры, получаемые закалкой, являются пластинчатыми. Для обеспечения более высоких механических свойств на практике стремятся получать троостит и сорбит отпуска.

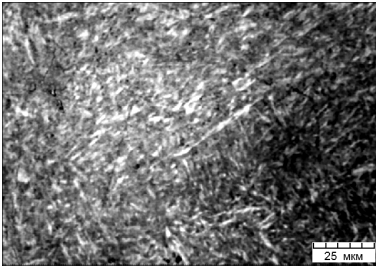
Микроструктуры углеродистой стали после закалки и различных видов отпуска и их схемы приведены на рис. 5.6.



Мартенсит отпуска

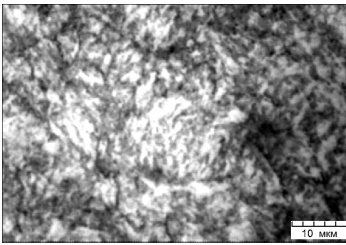
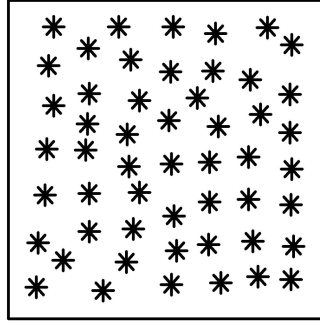


*a*



б

Троостит отпуска



в

Сорбит отпуска

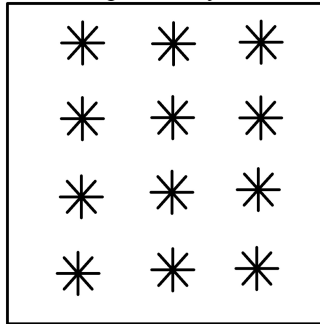


Рис. 5.6. Схемы структуры закаленной стали 45 после отпуска и их схемы:  
*a* – низкий отпуск,  $t - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; *б* – средний отпуск,  $t - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  
*в* – высокий отпуск,  $t - 600\text{ }^{\circ}\text{C}$

### Порядок проведения работы

1. Изучить исходную структуру образца марки стали 45 и зарисовать схему ее структуры.
2. Измерить твердость стали в исходном состоянии.
3. Назначить режимы закалки:
  - а) температуру нагрева под закалку;
  - б) время нагрева и выдержки;
  - в) скорость охлаждения (охлаждающую среду) по диаграмме изотермического превращения аустенита (см. рис. 5.3) для данной марки стали.

4. Нагреть образцы стали до температуры заковки и дать время на прогрев.
5. Охладить образцы в воде, масле, на воздухе.
6. Изучить и зарисовать схемы микроструктур стали после заковки с различной скоростью охлаждения (см. рис. 5.4).
7. Измерить твердость образцов после заковки в различных средах.
8. Построить график зависимости твердости стали *HRC* от скорости охлаждения в °C/с.
9. Изучить превращения в стали при отпуске.
10. Для образцов из стали 45, закаленных на мартенсит с охлаждением в воде, выполнить три вида отпуска:
  - а) низкий, температура 200 °C;
  - б) средний, температура 400 °C;
  - в) высокий, температура 600 °C.
11. Изучить под микроскопом и зарисовать схемы структур отпущенной стали 45 (рис. 5.6).
12. Измерить твердость образцов после отпуска на приборе ТК-2.
13. Построить график зависимости твердости закаленной стали *HRC* от температуры отпуска в °C.
14. Сделать выводы по работе.

### **Материалы, инструменты и оборудование**

1. Образцы из углеродистой стали 45 для заковки и отпуска диаметром 10–12 мм, длиной 15–20 мм.
2. Электроды камерные лабораторные СНОЛ.
3. Закалочные клещи.
4. Закалочные ванны.
5. Твердомеры ТК-2.
6. Микроскопы МИ-1.
7. Набор микрошлифов стали 45 после заковки.
8. Микрошлифы стали 45 после низкого, среднего и высокого отпусков.

### **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Определение основных видов термической обработки (отжиг, нормализация, заковка полная и неполная, отпуск).

3. Участок диаграммы состояния « $Fe-Fe_3C$ » с нанесенными на ней температура-турными зонами нагрева под закалку.
4. Диаграмма изотермического превращения аустенита со схематичным изображением способов закалки и их определение.
5. Краткие сведения о превращениях при отпуске, виды отпуска.
6. Назначенные режимы термической обработки.
7. Схемы микроструктуры образцов стали 45: а) исходной; б) после закалки, полученной с различной скоростью охлаждения; в) после различных видов отпуска.
8. График зависимости твердости стали от скорости охлаждения.
9. График зависимости твердости закаленной стали от температуры отпуска.
10. Выводы по работе.
11. Список использованной литературы.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое отжиг?
2. Что такое закалка?
3. Что такое нормализация?
4. Что такое критическая скорость закалки?
5. Что такое полная закалка?
6. Что такое неполная закалка?
7. Что такое непрерывная закалка?
8. Что такое прерывистая закалка?
9. Что такое ступенчатая закалка?
10. Что такое изотермическая закалка?
11. Что такое закалка с самоотпуском?
12. Какие могут быть дефекты при закалке?
13. Как выбрать температуру под закалку для доэвтектоидных сталей?
14. Как выбрать температуру под закалку для заэвтектоидных сталей?
15. Как определить продолжительность нагрева при закалке?
16. Что такое мартенсит, в каком случае образуется эта структура?
17. Как влияет скорость охлаждения на твердость закаленной стали?

18. Что такое критическая точка  $A_{c3}$ ?
19. Что такое критическая точка  $A_{c1}$ ?
20. Что такое отпуск?
21. Какие существуют превращения при отпуске?
22. Какие виды отпуска вы знаете?
23. Какая структура образуется при низком отпуске?
24. В каком случае применяется низкий отпуск?
25. Какая структура образуется при среднем отпуске?
26. В каком случае применяется средний отпуск?
27. Какая структура образуется при высоком отпуске?
28. В каком случае применяется высокий отпуск?
29. В чем отличие троостита и сорбита закалки от троостита и сорбита отпуска?
30. Как влияет температура отпуска на механические свойства стали?

## ВЫБОР РЕЖИМОВ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

### *Цель работы:*

1) изучить основные методы и режимы поверхностного упрочнения стальных деталей – поверхностную закалку и химико-термическую обработку;

2) изучить изменение структуры и свойств углеродистой стали после индукционной закалки и цементации.

**Студент должен знать:** сущность и методы поверхностной закалки и химико-термической обработки сталей.

**Студент должен уметь:** выбрать режимы поверхностного упрочнения стальных деталей.

### Общие сведения

Большинство современных машин работает под действием статических и динамических нагрузок при обычных и повышенных температурах, вызывающих быстрый износ, коррозию, усталость и разрушение поверхностных слоев деталей.

Для повышения сопротивляемости разрушениям при производстве и ремонте стальных изделий необходимо изменить структурное состояние их поверхности, что достигается различными методами упрочнения. Классификация методов упрочнения поверхностей предусматривает две группы:

1) упрочнение изделия без изменения химического состава поверхности, но с изменением ее структуры;

2) упрочнение изделия с изменением химического состава поверхностного слоя и его структуры.

Упрочнение методами первой группы достигается поверхностной закалкой, поверхностной пластической деформацией и другими методами.

Вторая группа упрочнения осуществляется различными методами химико-термической обработки (ХТО) и физическими методами нанесения защитных слоев.

Из методов упрочнения без изменения химического состава поверхности, но с изменением ее структуры, наиболее распространены

методы *поверхностной закалки*, а из способов упрочнения с изменением химического состава поверхности и ее структуры – *методы ХТО*.

Выбор метода поверхностного упрочнения детали зависит от условий ее эксплуатации, формы, размеров, марки выбранной стали и других факторов.

### Поверхностная закалка

Сущность любого способа поверхностной закалки состоит в том, что поверхностные слои стальной детали быстро нагревают выше температуры закалки, а затем охлаждают со скоростью выше критической. В результате слой металла, нагретый выше  $A_{C3}$  (I), получит полную закалку; слой, нагретый выше  $A_{C1}$ , но ниже  $A_{C3}$  (II), – не полную закалку, а сердцевина (III) (рис. 2.1) или не нагреется, или нагреется ниже  $A_{C1}$ , и закалки не произойдет.

Основное назначение поверхностной закалки: повышение твердости, износостойкости и предела выносливости поверхности при сохранении вязкой сердцевины детали.

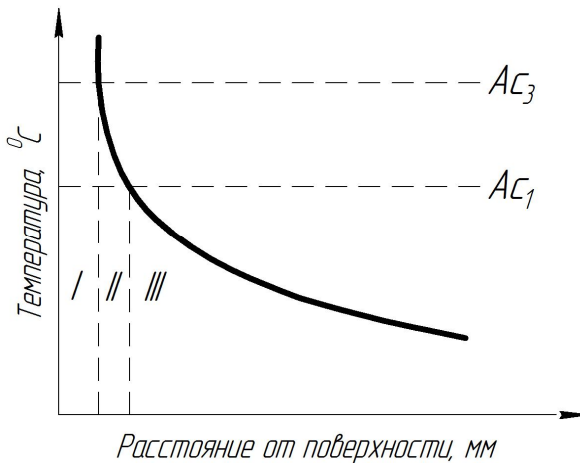


Рис. 2.1. Распределение температуры от поверхности в глубину при поверхностной закалке

Способы поверхностной закалки определяются методом нагрева:  
1) в расплавленных металлах или солях (закалка в расплаве);

- 2) ацетилено-кислородной или газовой горелки (закалка с газопламенным нагревом);
- 3) в электролитах (закалка в электролите);
- 4) токами высокой частоты, индуцируемыми в поверхностных слоях детали (индукционная закалка);
- 5) лазерами (лазерная закалка) и др.

### Индукционная закалка

В промышленности самым распространенным способом является индукционная закалка с нагревом токами высокой частоты (ТВЧ), имеющая наиболее высокую производительность. Для крупных деталей, в основном, применяется закалка с газопламенным нагревом.

Закалку с индукционным нагревом ТВЧ широко используют для повышения долговечности осей, пальцев, валов и других деталей цилиндрической формы (рис. 2.2). Толщина поверхностного слоя определяется условиями работы стальной детали. Когда изделие работает только на износ или в условиях усталости, толщину закаленного слоя чаще принимают 1,5–3,0 мм, в условиях высоких контактных нагрузок и возможной перешлифовки – 4,0–6,0 мм. В случае особо больших контактных нагрузок, например, для валков холодной прокатки, толщина закаленного слоя достигает 10,0–15,0 мм и выше. Обычно считают, что площадь сечения закаленного слоя должна быть не более 20 % всего сечения.

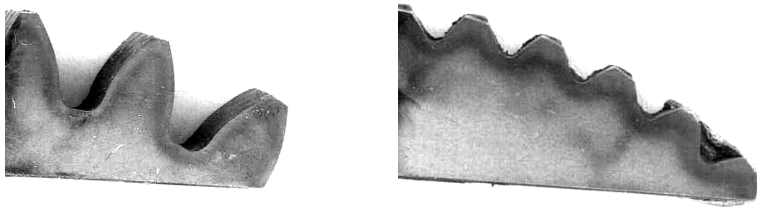


Рис. 2.2. Примеры индукционной закалки зубьев шестерни из стали 45

Индукционный нагрев происходит вследствие теплового действия тока, индуцируемого в стальном изделии, помещенном в переменное магнитное поле высокой частоты.

Деталь 1 помещают внутри индуктора 2, представляющего собой один или несколько витков пустотелой водоохлаждаемой медной трубки или шины (рис. 2.3). Переменный ток высокой частоты, протекая через индуктор, создает переменное магнитное поле. В результате индукции в поверхностном слое детали возникают вихревые токи, происходит выделение Джоулева тепла. Ток проходит, в основном, в поверхностном слое проводника (детали). Это явление называется поверхностным эффектом.

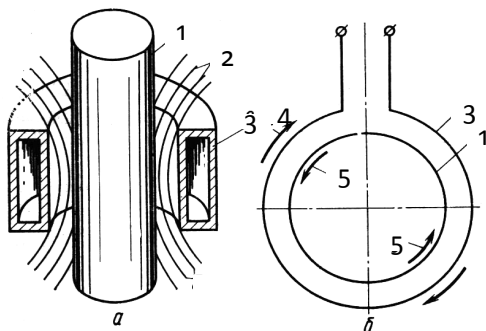


Рис. 2.3. Схема высокочастотной установки:  
*a* – распределение магнитного потока в индукторе;  
*б* – направление токов в индукторе и детали; 1 – нагреваемая деталь;  
 2 – виток индуктора; 3 – магнитные силовые линии;  
 4 – направление тока в индукторе; 5 – направление тока в детали

Около 90 % тепла выделяется в слое толщиной  $\delta$ , которая определяется по уравнению (2.1):

$$\delta = 50,3 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}}, \text{ [М]}, \quad (2.1)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  
 $\mu$  – магнитная проницаемость, Гс/Э;  
 $f$  – частота тока, Гц.

Толщина слоя  $\delta$  в основном зависит от частоты подаваемого тока, магнитной проницаемости и удельного электрического сопротивления

нагреваемого металла. Чем больше частота, тем меньше глубина проникновения тока. Для получения закаленного слоя толщиной 1,0 мм частота тока составляет 50 000-60 000 Гц, для слоя 2,0 мм частота тока – 15 000 Гц.

Источником ТВЧ служат машинные генераторы. Машинные генераторы вырабатывают ток частотой от 1000 до 15 000 Гц; ламповые – до 100 000 Гц. В последнее время широко применяют тиристорные и транзисторные преобразователи частоты, обеспечивающие плавное регулирование частоты тока в заданном режиме.

Охлаждающую жидкость (воду, масло) подают через душевое устройство (спрейер). Спрейер часто совмещают с индуктором. После закалки с индукционным нагревом изделия подвергают низкому отпуску при 160 °С –200 °С, иногда самоотпуску.

Для поверхностной индукционной закалки применяют углеродистые стали, содержащие 0,4 %–0,5 % углерода (40, 45, 50 и др.) и стали с пониженной прокаливаемостью (55ПП, 60ПП). В этих сталях при охлаждении после нагрева на поверхности образуется мартенсит (60 HRC), а в сердцевине, поскольку скорость охлаждения меньше критической, образуется сорбит или троостит (30–40 HRC).

Метод поверхностной закалки ТВЧ не эффективен для деталей сложной формы, для которых из-за их конструктивных особенностей возможно только местное упрочнение. Этого недостатка не наблюдается при газопламенной обработке, обеспечивающей для деталей сложной формы равномерное упрочнение.

## **Химико-термическая обработка стали**

**Химико-термическая обработка** заключается в насыщении поверхностного слоя стали различными элементами (C, N, B и др.) путем их диффузии в атомарном состоянии при высокой температуре из насыщающей среды, называемой «*карбюризатором*». ХТО сочетает термическое и химическое воздействия с целью изменения состава, структуры и свойств поверхностного слоя стали.

Физическая сущность химико-термической обработки состоит в следующем:

1) образование насыщающего элемента в атомарном состоянии (*диссоциация*);

2) поглощение (растворение) атомов насыщающего элемента поверхностью металла (*адсорбция*);

3) проникновение насыщающего элемента вглубь (*диффузия*).

В результате образуется диффузионный слой, на поверхности которого концентрация диффундирующего элемента наибольшая.

В зависимости от насыщающего элемента существуют следующие разновидности химико-термической обработки:

– *цементация* – насыщение стали углеродом;

– *азотирование* – насыщение стали азотом;

– *нитроцементация (цианирование)* – одновременное насыщение стали углеродом и азотом;

– *борирование* – насыщение стали бором и т. д.

– *диффузионная металлизация* – насыщение поверхности различными металлами с образованием твердых растворов замещения с железом (*алитирование, хромирование* и т. д.).

Практическое значение для сельхозмашиностроения имеют технологические процессы цементации, азотирования, нитроцементации, диффузионного хромирования. Наиболее широко используется цементация вследствие экономичности и недефицитности насыщающей среды.

## Цементация

**Цементация** заключается в насыщении стальных деталей углеродом для придания высокой твердости и износостойкости их поверхности при сохранении вязкой и пластичной сердцевины. Окончательные свойства цементированные изделия приобретают после закалки и низкого отпуска. Цементации обычно подвергаются детали, изготовленные из сталей с содержанием углерода 0,10 %–0,25 %, работающие в условиях контактного износа и приложения знакопеременных нагрузок: среднеразмерные зубчатые колеса, втулки, поршневые пальцы, кулачки, валы коробок передач автомобилей, отдельные детали рулевого управления и т. д.

Различают цементацию в твердом, газовом и жидком карбюризаторах. Температура цементации изменяется в интервале 880 °С–1000 °С.

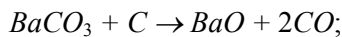
## Цементация в твердом карбюризаторе

Цементируемые детали вместе с карбюризатором загружают в ящики, герметически упаковывают, выдерживают при 930 °С. Скорость насыщения составляет 0,1 мм/ч. После цементации ящики охлаждают на воздухе до 400 °С–500 °С, а затем раскрывают. В качестве карбюризатора применяют смесь древесного угля или каменноугольного полукокса с углекислым барием и кальцием. Для контроля над протеканием процесса и толщиной цементуемого слоя в ящик закладывают образцы (свидетели) диаметром 10–15 мм из той же марки стали, которые периодически вынимают и определяют глубину слоя. Широко применяют карбюризатор, состоящий из 76,5 %–71,5 % древесного угля, 20 %–25 %  $BaCO_3$  и 3,5 %  $CaCO_3$ .

В цементационном ящике имеется воздух, кислород которого при высокой температуре взаимодействует с углеродом карбюризатора, образуя оксид углерода  $CO$ . Оксид углерода в присутствии железа диссоциирует по уравнению



Механизм действия активизатора сводится к увеличению количества оксида углерода в ящике:



Существенным недостатком цементации в твердом карбюризаторе является большая длительность процесса, невозможность регулирования содержания углерода в слое, высокая стоимость подготовительных операций (ручная укладка деталей в ящики, приготовление карбюризатора и т. д.). Простота цементации в твердом карбюризаторе обуславливает применение процесса в мелкосерийном и единичном производствах.

## Газовая цементация

Этот процесс осуществляют нагревом изделия в среде газов, содержащих углерод. Газовая цементация имеет ряд преимуществ по сравнению с цементацией в твердом карбюризаторе. В этом случае можно получить заданную концентрацию углерода в слое, скорость процесса составляет  $\approx 0,2$  мм/ч, что сокращает длительность процесса. При этом обеспечивается возможность полной механизации и автоматизации процессов, включая и последующую термическую обработку стальных деталей.

В качестве карбюризатора используют природные газы, состоящие из метана ( $CH_4$ ) и пропанбутановых смесей. Также применяют жидкие углеводороды (керосин, синтин, спирты и др.), каплями подаваемые в печь. Углеводородные соединения при высокой температуре разлагаются с образованием атомарного углерода и водорода.

В серийном производстве газовую цементацию обычно проводят в шахтных печах. В крупносерийном и массовом производствах ее осуществляют в безмуфельных печах непрерывного действия.

Газовая цементация является самым распространенным промышленным методом ХТО.

### Структура цементационного слоя

Упрочненный слой имеет переменную концентрацию углерода по толщине, уменьшающуюся от поверхности к сердцевине стальной детали. Различают три основные зоны в слое (рис. 2.4):

- 1 – заэвтектоидная зона, состоящая из перлита и цементитной сетки;
- 2 – эвтектоидная зона, представляющая собой перлит;
- 3 – доэвтектоидная зона, в которой по мере приближения к сердцевине уменьшается количество углерода, перлита, а количество феррита возрастает.

За глубину цементированного слоя «у» принимают сумму заэвтектоидной, эвтектоидной и половину доэвтектоидной зоны, где количество феррита и перлита составляет по 50 процентов.

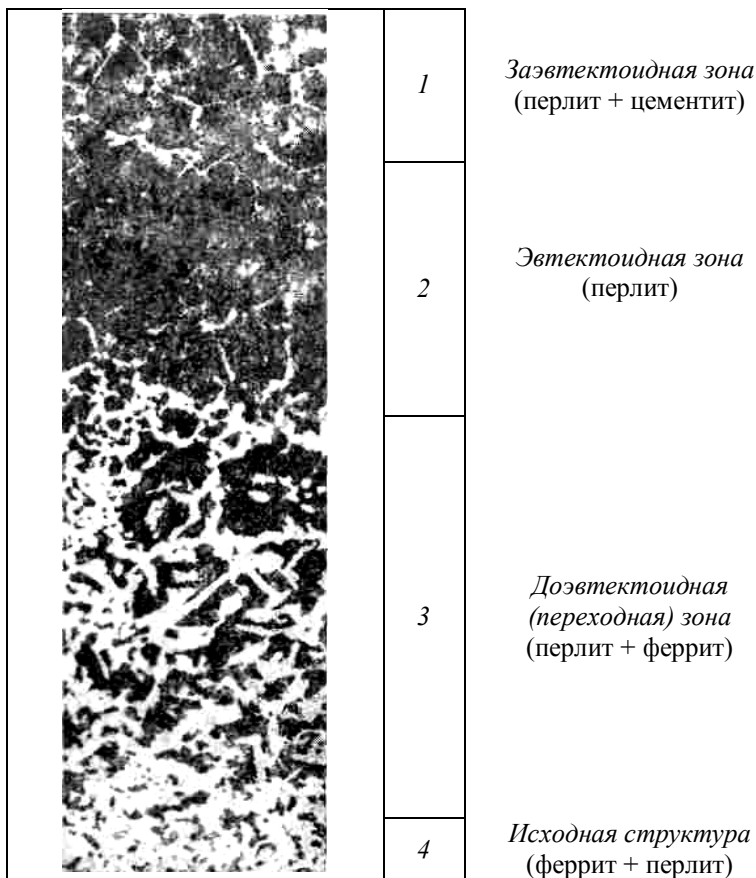


Рис. 2.4. Структура углеродистой доэвтектоидной стали после цементации

### **Режимы термической обработки цементованной стали**

Окончательные свойства стальных деталей достигаются в результате термической обработки, выполняемой после цементации. Этой обработкой можно исправить структуру и измельчить зерно сердцевины и цементированного слоя, получить высокую твердость в поверхностном слое 56–60 HRC и хорошие механические свойства сердцевины 26–40 HRC; устранить карбидную сетку в поверхностном слое, которая может возникнуть при насыщении его углеродом до заэвтектоидной концентрации.

При термической обработке наследственно мелкозернистых сталей применяют закалку выше точки  $A_{c3}$  при  $820\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это обеспечивает измельчение зерна и полную закалку цементированного слоя, частичную перекристаллизацию и измельчение зерна сердцевины. После газовой цементации применяют закалку без повторного нагрева, а непосредственно из цементационной печи после подстуживания изделий до  $840\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $860\text{ }^{\circ}\text{C}$ , для уменьшения коробления обрабатываемых изделий. Для уменьшения деформации цементированных изделий выполняют также ступенчатую закалку в горячем масле (при температуре  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

В результате термической обработки поверхностный слой приобретает структуру мелкоиглочатого мартенсита и изолированных участков остаточного аустенита (не более 15 %–20 %) (рис. 2.5).

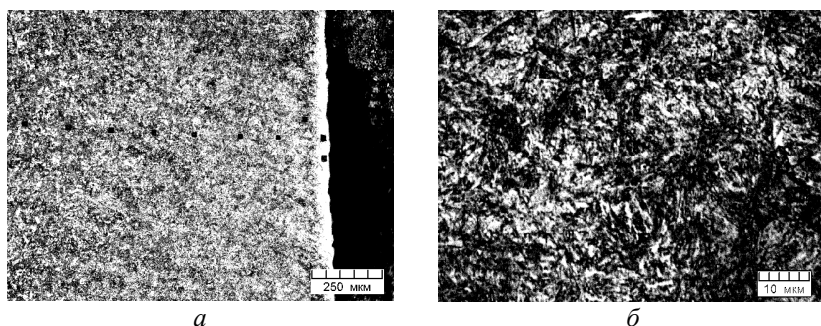


Рис. 2.5. Структура цементованного слоя после термической обработки стали 20

Заключительной операцией термической обработки стальных деталей после цементации во всех случаях является низкий отпуск при  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ , снимающий напряжения и переводящий мартенсит закалки в поверхностном слое в отпущенный мартенсит.

Для изготовления цементуемых деталей, от которых требуется высокая поверхностная твердость и допустима невысокая прочность сердцевины, применяются **углеродистые качественные стали**, содержащие  $\leq 0,25\text{ \% C}$  (стали 10, 15, 20, 25).

Для небольших деталей, работающих на износ в условиях трения, при средних удельных давлениях и скоростях, используются **хромистые конструкционные стали** 15X, 20X, 20XФ. Для изготовления ответственных деталей, работающих при больших скоростях,

средних и высоких удельных давлениях, при наличии ударных нагрузок применяются **хромомарганцевые стали** марок 18ХГТ, 25ХГТ, 20ХГР, дополнительно легированные *Ti*, *Mn*, *B*.

### Азотирование

**Азотированием** называется процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали азотом. Чаще всего проводится при температурах 500 °С–600 °С. Азотирование повышает твердость поверхностного слоя деталей, износостойкость, сопротивление коррозии в атмосфере, воде и т. п.

Свойства азотированного слоя сохраняются до температур 450 °С–550 °С. Азотированию подвергают легированные стали, содержащие хром, ванадий, молибден и другие элементы (например, 20Х13, 30Х13, 30ХМЮА, 30ХЗМФ1, 35ХМЮА, 38ХМЮА и др.). Их применяют для изготовления шестерен, коленчатых валов, клапанов, гильз цилиндров мощных двигателей, кулачков, втулок, деталей топливной аппаратуры и паровых турбин. Азотируются детали, работающие в условиях трения скольжения, склонные к короблению (деформации) и испытывающие небольшие контактные нагрузки. Азотированию могут подвергаться все легированные стали. Износостойкость азотированной стали в 2–4 раза выше износостойкости цементированной стали.

В процессе газового азотирования в качестве карбюризатора применяют аммиак. Атомарный азот при диссоциации аммиака диффундирует в сталь, образуя твердые растворы в  $\alpha$  и  $\gamma$  железе (азотистый феррит и аустенит) и химические соединения – нитриды. Данный процесс длительный, для получения глубины слоя 0,1 мм необходимо около 24 часов. Перед азотированием проводят улучшение (закалку и высокий отпуск).

Азотирование широко применяется для мало- и средненагруженных зубчатых колес сложной конфигурации, например, с внутренними зубьями, шлифование которых трудно осуществить. Колеса изготавливают из стали 40Х (конические) или 40ХФА (цилиндрические). После азотирования на глубину 0,10–0,13 мм, при котором обеспечивается минимальная деформация, проводится только притирка зубьев.

Широко применяется азотирование деталей топливной аппаратуры и клапанов дизельных двигателей, деталей турбин из высокохромистых сталей (20X13, 30X13, 40X13), а также штоков клапанов паровых турбин, гильз цилиндров, игл форсунок, пальцев, плунжеров (рис. 2.6)

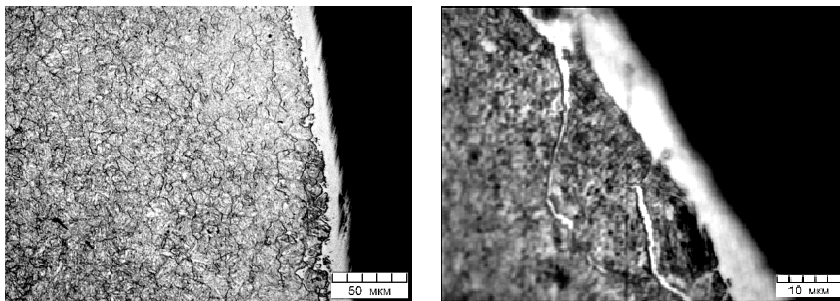


Рис. 2.6 Структура азотированного слоя зубчатого колеса из стали 40ХФА

## Нитроцементация

**Нитроцементацией** называют процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом при температуре  $840\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $860\text{ }^{\circ}\text{C}$  в газовой среде, состоящей из науглероживающего газа и аммиака. Продолжительность процесса составляет 4–10 ч. Установлено, что при одновременной диффузии углерода и азота ускоряется диффузия углерода. Процесс проводят при более низкой температуре ( $840\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $860\text{ }^{\circ}\text{C}$  вместо  $910\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $930\text{ }^{\circ}\text{C}$  при цементации). После нитроцементации следует закалка непосредственно из печи, реже – после повторного нагрева.

После закалки проводят отпуск при  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Структура упрочненного слоя после нитроцементации, как и после цементации, состоит из мелкокристаллического мартенсита и остаточного аустенита, но в ней присутствует небольшое количество дисперсных равномерно распределенных карбонитридов. Твердость слоя после закалки и низкого отпуска составляет 58–60 HRC. Нитроцементации обычно подвергают детали сложной конфигурации, склонные к короблению, в крупносерийном и массовом производствах, например, на автомобильных и тракторных заводах.

Краевая зона представляет собой карбонитридный слой. В нем установлено наличие фазы  $Fe_4(Fe(CN)_6)_3$ , что подтверждает процесс цианирования. В поверхностном слое наблюдается сетка микротрещин, которая формируется при цианировании при содержании азота 0,5 % (рис. 2.7, а). Под ним находится закаленный слой (рис. 2.7, б), представляющий собой мартенсит (темные иглы) и остаточный аустенит (светлая фаза).

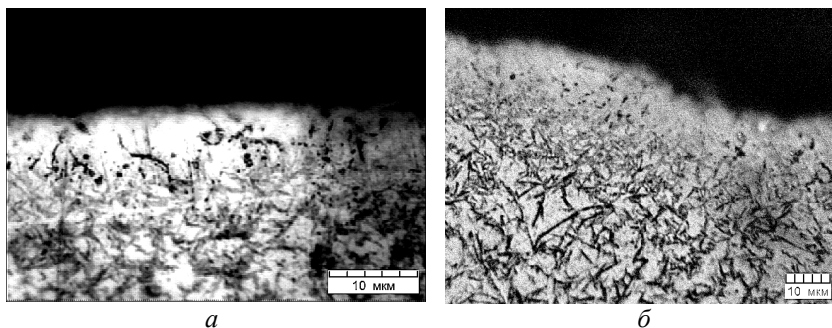


Рис. 2.7. Структура упрочненного слоя рессоры из стали 40ХГНМ после нитроцементации

### Порядок проведения работы

1. Изучить основные методы и режимы поверхностного упрочнения сталей.
2. Изучить микроstructures стали после поверхностной закалки.
4. Изучить микроstructures стали после цементации.
5. Изучить микроstructures стали после цементации и последующей закалки.
6. Выполнить индивидуальные задания в рабочей тетради и сформулировать выводы по работе.

### Оборудование, инструмент и материалы

1. Установка ТВЧ, индукторы.
2. Металлографические микроскопы МИ-1.
3. Образцы микроstructures стали после поверхностной индукционной закалки, цементации, цементации и последующей закалки.

## Контрольные вопросы

1. В каком случае применяется поверхностное упрочнение детали?
2. Основные методы поверхностного упрочнения деталей?
3. Изложите сущность поверхностной закалки.
4. Перечислите основные методы поверхностной закалки.
5. Объясните закалку газопламенным нагревом.
6. Объясните процесс индукционной закалки ТВЧ.
7. От чего зависит глубина закаленного слоя?
8. Что называется химико-термической обработкой?
9. Поясните физическую сущность химико-термической обработки.
10. Объясните процесс цементации.
11. Какую термическую обработку проводят после цементации?
12. Какие существуют методы цементации?
13. Объясните процесс азотирования стали.
14. Какую предварительную термическую обработку проводят перед азотированием?
15. Укажите преимущества и недостатки цементации.
16. Укажите преимущества и недостатки поверхностной индукционной закалки ТВЧ.
17. Объясните процесс нитроцементации.

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

Настоящие тестовые задания составлены для использования в электронном варианте для изучения раздела «Материаловедение» при подготовке к лабораторным занятиям и управляемым самостоятельным работам студентов по дисциплине «Материаловедение». Технология конструкционных материалов. Для каждой работы приведен перечень вопросов, охватывающий ее теоретическое и экспериментальное содержание.

Форма тестовых заданий предусматривает выбор одного правильного ответа из нескольких предложенных вариантов. Задания представлены, главным образом, в виде утверждения, которому соответствует одно правильное суждение или ответ.

### Лабораторная работа № 1

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ

**1. Сущность измерения твердости по методу Роквелла состоит во внедрении в образец:**

- 1) алмазной пирамиды;
- 2) алмазного конуса или закаленного стального шарика;
- 3) закаленного стального (твердосплавного) шарика;
- 4) ничего не внедряется.

**2. Измерение твердости по методу Бринелля производится вдавливанием в образец:**

- 1) алмазного конуса или закаленного стального шарика;
- 2) алмазной пирамиды;
- 3) закаленного стального (твердосплавного) шарика;
- 4) ничего не вдавливаются.

**3. Условия испытания при измерении твердости по методу Бринелля:**

- 1) нагрузка, время приложения нагрузки;
- 2) диаметр шарика, нагрузка, время приложения нагрузки;
- 3) диаметр отпечатка;
- 4) время приложения нагрузки.

**4. Шарики каких диаметров используются при измерении твердости по методу Бринелля, мм ?:**

- 1) 0,5; 3,0; 7,0; 2) 2,5; 5,0; 10,0; 3) 1,5; 3,0; 6,0; 4) 1,0; 4,0; 8,0.

**5. Зависимость между пределом прочности и твердостью Бринелля:**

- 1) прямолинейная;
- 2) криволинейная;
- 3) не существует;
- 4) параболическая.

**6. При измерении твердости по методу Роквелла применяются инденторы:**

- 1) пирамида;
- 2) конус, шарик;
- 3) шарики различного диаметра;
- 4) конусы с различными углами.

**7. Твердость, измеренная по методу Роквелла с алмазным конусом, обозначается:**

- 1) *HB*; 2) *HV*; 3) *HRB*; 4) *HRA*.

**8. При измерении твердости по методу Роквелла к образцу прикладывается:**

- 1) предварительная нагрузка;
- 2) предварительная и основная нагрузки;
- 3) основная нагрузка;
- 4) ничего не применяется.

**9. *HRC* обозначает твердость, определенную методом:**

- 1) Бринелля;
- 2) Виккерса;
- 3) Роквелла;
- 4) такого обозначения твердости нет.

**10. Твердость по Бринеллю обозначается:**

- 1) *KCV*; 2) *HB*; 3)  $\Psi$ ; 4)  $\sigma_B$ .

**11. На чертеже детали указано 90 HRB, обозначающее:**

- 1) относительное сужение материала при растяжении;
- 2) ударную вязкость;
- 3) твердость по Бринеллю;
- 4) твердость по Роквеллу с индентором – стальным шариком.

**12. На чертеже детали указано 55 HRC, обозначающее:**

- 1) твердость по Виккерсу;
- 2) ударную вязкость;
- 3) твердость по Бринеллю;
- 4) твердость по Роквеллу с индентором – алмазным конусом.

**13. На чертеже детали указано 302 HB, обозначающее:**

- 1) предел прочности;
- 2) ударную вязкость;
- 3) твердость по Бринеллю;
- 4) твердость по Роквеллу с индентором – стальным шариком.

**14. На чертеже детали указано 190 HB<sub>5/750/10</sub>, обозначающее:**

- 1) ударную вязкость;
- 2) твердость по Бринеллю, измеренную шариком диаметром 5 мм, при нагрузке 750 кг, времени приложения нагрузки 10 с;
- 3) твердость по Виккерсу;
- 4) твердость по Роквеллу с индентором – стальным шариком.

**15. При определении твердости измеряют диаметр отпечатка по методу:**

- 1) Бринелля;
- 2) Виккерса;
- 3) Роквелла с алмазным конусом;
- 4) Роквелла с шариком.

**16. Твердость по Роквеллу измеряется:**

- 1) в %;
- 2) в МПа (кгс/мм<sup>2</sup>);
- 3) в Дж/м<sup>2</sup>;
- 4) является безразмерной величиной.

**17. Твердость закаленных изделий измеряют:**

- 1) по Роквеллу с алмазным (твердосплавным) конусом;
- 2) по Бринеллю;
- 3) по Роквеллу с шариком;
- 4) перечисленными методами твердость закаленных изделий измерить невозможно.

**18. Мера измерения твердости по Бринеллю:**

- 1) глубина отпечатка, мм;
- 2) диаметр отпечатка, мм;
- 3) прикладываемая нагрузка, кгс;
- 4) величина отскока, мм.

**19. Мера измерения твердости по Роквеллу:**

- 1) диаметр отпечатка, мм;
- 2) глубина отпечатка, мм;
- 3) прикладываемая нагрузка, кгс;
- 4) величина отскока, мм.

**20. Алмазный конус для измерения твердости по Роквеллу используется:**

- 1) при измерении мягких материалов;
- 2) при измерении твердых материалов;
- 3) во всех случаях;
- 4) по Роквеллу алмазный конус не применяется.

**21. Твердость напильника можно измерить:**

- 1) по Бринеллю;
- 2) по Роквеллу с алмазным конусом;
- 3) по Роквеллу с шариком;
- 4) любым из перечисленных методов.

**22. Неразрушающим видом контроля является следующий метод испытания:**

- 1) измерение прочности;
- 2) измерение ударной вязкости;
- 3) измерение пластичности;
- 4) измерение твердости.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ, ПЛАСТИЧНОСТИ И ВЯЗКОСТИ МЕТАЛЛОВ

**1. Способность материала сопротивляться деформации или разрушению в условиях статического нагружения называется:**

- 1) ударной вязкостью;
- 2) пластичностью;
- 3) износостойкостью;
- 4) прочностью.

**2. Пластическая деформация – это:**

- 1) деформация образца, которая исчезает после снятия нагрузки;
- 2) необратимое изменение размеров деформированного образца;
- 3) обратимое изменение размеров нагруженного образца;
- 4) работа, затраченная на разрушение образца.

**3. Относительное удлинение материала при разрыве является характеристикой:**

- 1) прочности;
- 2) износостойкости;
- 3) выносливости;
- 4) пластичности.

**4. Способность материала получать остаточную деформацию без разрушения называется:**

- 1) пластичностью;
- 2) прочностью;
- 3) твердостью;
- 4) выносливостью.

**5. Относительное сужение при разрыве обозначают символом:**

- 1)  $HRC$ ;
- 2)  $\Psi$ ;
- 3)  $KCV$ ;
- 4)  $\sigma_T$ .

**6. Символом  $\delta$  обозначают:**

- 1) ударную вязкость;
- 2) твердость по Роквеллу;

- 3) относительное удлинение при разрыве;
- 4) предел текучести.

**7. Символом  $\sigma_b$  обозначают:**

- 1) твердость по Бринеллю;
- 2) предел прочности при растяжении;
- 3) ударную вязкость;
- 4) относительное удлинение при разрыве.

**8. Для испытания на разрыв обычно используют образец:**

- 1) в виде куба;
- 2) в виде прутка квадратного сечения с надрезом;
- 3) в виде шайбы;
- 4) цилиндрический с утолщениями (головками) на концах.

**9. Прочность материала выражается:**

- 1) в процентах;
- 2) в Дж/м<sup>2</sup> (кгс·м/см<sup>2</sup>);
- 3) в МПа (кгс/мм<sup>2</sup>);
- 4) это безразмерная величина.

**10. По оси абсцисс диаграммы растяжения откладывается:**

- 1) твердость материала;
- 2) нагрузка на образец;
- 3) абсолютное удлинение;
- 4) температура.

**11. В случае если напряжение в образце выше  $\sigma_{0,05}$ , но меньше  $\sigma_T$ , состояние образца следующее:**

- 1) образец разорван;
- 2) образец только упруго деформирован;
- 3) началось пластическое деформирование образца;
- 4) образец не деформирован.

**12. Разрушением образца падающим маятником определяют:**

- 1) твердость по Роквеллу;
- 2) прочность при разрыве;
- 3) ударную вязкость;
- 4) твердость по Бринеллю.

**13. Для определения ударной вязкости используют следующий образец:**

- 1) в виде прутка прямоугольного сечения с надрезом;
- 2) цилиндрический образец с утолщениями на концах;
- 3) в виде куба;
- 4) в виде плоской полосы.

**14. Ударная вязкость обозначается:**

- 1)  $KCV$ ;
- 2)  $\delta$ ;
- 3)  $HRC$ ;
- 4)  $\sigma_{0.2}$ .

**15. С помощью маятникового копра определяют:**

- 1) твердость по Роквеллу;
- 2) ударную вязкость;
- 3) твердость по Бринеллю;
- 4) относительное удлинение при разрыве.

**16. Ударная вязкость имеет размерность:**

- 1) МПа (кгс/мм<sup>2</sup>);
- 2) %;
- 3) Дж/м<sup>2</sup>;
- 4) ударная вязкость – безразмерная величина.

**17. Полученный результат  $KCU \approx 0$  при измерении ударной вязкости говорит о том, что:**

- 1) испытание проведено неправильно;
- 2) испытан материал с очень высокой вязкостью;
- 3) испытан очень хрупкий материал;
- 4) при испытании образец не разрушился.

**18. Более высокую ударную вязкость имеет:**

- 1) напильник;
- 2) гвоздь;
- 3) сверло;
- 4) иголка.

**19. Получить разную величину ударной вязкости одной и той же стали возможно:**

- 1) если испытать закаленную и незакаленную стали;
- 2) если сделать образцы разного сечения;
- 3) если сделать образцы разной длины;
- 4) невозможно (в любом случае).

## **МИКРОСТРУКТУРНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ**

### **1. Микроструктурный анализ заключается в изучении:**

- 1) структуры материалов невооруженным глазом;
- 2) структуры материалов при увеличении с помощью микроскопов;
- 3) структуры материалов с помощью рентгеновских лучей;
- 4) определении химического состава.

### **2. Макроструктурный анализ заключается в изучении:**

- 1) структуры материалов невооруженным глазом;
- 2) структуры материалов при увеличении с помощью микроскопов;
- 3) структуры материалов с помощью рентгеновских лучей;
- 4) химического состава.

### **3. Рентгеноструктурный анализ представляет исследование внутреннего строения металлов:**

- 1) невооруженным взглядом;
- 2) с помощью рентгеновских лучей;
- 3) с помощью электронных лучей;
- 4) на металлографическом микроскопе.

### **4. Структура представляет собой:**

- 1) внутреннее строение металлов и сплавов;
- 2) химический состав сплава;
- 3) внешний вид образца металла;
- 4) координационное число кристаллической решетки.

### **5. Микрошлиф представляет собой:**

- 1) образец, отрезанный от заготовки;
- 2) специально приготовленный образец для проведения микро-анализа;
- 3) отрезанный образец, обработанный напильником;
- 4) отрезанный образец, обработанный на шлифовальном круге.

### **6. Приготовление микрошлифа производится:**

- 1) отрезкой образца от заготовки;

- 2) шлифованием, полированием, травлением плоской поверхности отрезанного образца;
- 3) опиловкой образца напильником;
- 4) шлифованием отрезанного образца.

**7. Шлифовка образца производится:**

- 1) наждачной бумагой различной зернистости;
- 2) напильником;
- 3) на фетровом круге;
- 4) на наждачном круге.

**8. Полировка образца производится:**

- 1) наждачной бумагой различной зернистости;
- 2) травлением кислотами;
- 3) на фетровом круге;
- 4) на наждачном круге.

**9. Травление микрошлифов сталей и чугунов производится:**

- 1) спиртом;
- 2) 2 %-м раствором серной кислоты;
- 3) 4 %-м раствором азотной кислоты в спирте;
- 4) 1 %-м раствором плавиковой кислоты.

**10. Общее увеличение микроскопа равно:**

- 1) отношению разрешающей способности человеческого глаза к разрешающей способности микроскопа;
- 2) увеличению окуляра, умноженному на увеличение объектива;
- 3) отношению длины волны света к числовой апертуре объектива;
- 4) сумме увеличений окуляра и объектива.

**11. Полезное увеличение микроскопа равно:**

- 1) отношению разрешающей способности человеческого глаза к разрешающей способности микроскопа;
- 2) увеличению окуляра, умноженному на увеличение объектива;
- 3) отношению длины световой волны к числовой апертуре объектива;
- 4) сумме увеличений окуляра и объектива.

**12. Для определения содержания углерода в углеродистой стали необходимо:**

- 1) определить количество цементита;
- 2) определить количество перлита;
- 3) определить размер зерна феррита;
- 4) определить количество неметаллических включений.

**13. Содержание углерода в стали, состоящей из 50 % перлита и 50 % феррита, составляет:**

- 1) 0,16 %;      2) 0,24 %;      3) 0,40 %;      4) 0,56 %.

**14. Содержание углерода в стали, состоящей из 40 % перлита и 60 % феррита, составляет:**

- 1) 0,16 %;      2) 0,24 %;      3) 0,32 %;      4) 0,56 %.

**15. Содержание углерода в стали, состоящей из 20 % перлита и 80 % феррита, составляет:**

- 1) 0,16 %;      2) 0,24 %;      3) 0,40 %;      4) 0,56 %.

**16. Содержание углерода в стали, состоящей из 30 % перлита и 70 % феррита, составляет:**

- 1) 0,16 %;      2) 0,24 %;      3) 0,40 %;      4) 0,56 %.

**17. Содержание перлита в стали с 0,6 % C при комнатной температуре составляет:**

- 1) 25 %;      2) 50 %;      3) 75 %;      4) 100 %.

**18. Содержание перлита в стали с 0,8 % C при комнатной температуре составляет:**

- 1) 25 %;      2) 50 %;      3) 75 %;      4) 100 %.

**19. Содержание перлита в стали с 0,4 % C при комнатной температуре составляет:**

- 1) 25 %;      2) 50 %;      3) 75 %;      4) 100 %.

**20. Содержание перлита в стали с 0,2 % C при комнатной температуре составляет:**

- 1) 25 %;      2) 50 %;      3) 75 %;      4) 100 %.

## АНАЛИЗ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ «ЖЕЛЕЗО–ЦЕМЕНТИТ»

### 1. Ферритом называется:

- 1) твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железо;
- 2) твердый раствор внедрения углерода в  $\gamma$ -железо;
- 3) химическое соединение ( $Fe_3C$ );
- 4) эвтектическая смесь перлита с цементитом.

### 2. Аустенитом называется:

- 1) твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железо;
- 2) твердый раствор внедрения углерода в  $\gamma$ -железо;
- 3) химическое соединение ( $Fe_3C$ );
- 4) эвтектоидная смесь феррита с цементитом.

### 3. Цементитом называется:

- 1) твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железо;
- 2) твердый раствор внедрения углерода в  $\gamma$ -железо;
- 3) химическое соединение ( $Fe_3C$ );
- 4) эвтектоидная смесь феррита и цементита.

### 4. Перлитом называется:

- 1) твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железо;
- 2) твердый раствор внедрения углерода в  $\gamma$ -железо;
- 3) химическое соединение ( $Fe_3C$ );
- 4) эвтектоидная смесь феррита и цементита.

### 5. Линия ликвидус диаграммы состояния сплавов «железо–цементит» (рис. 1) обозначена буквами:

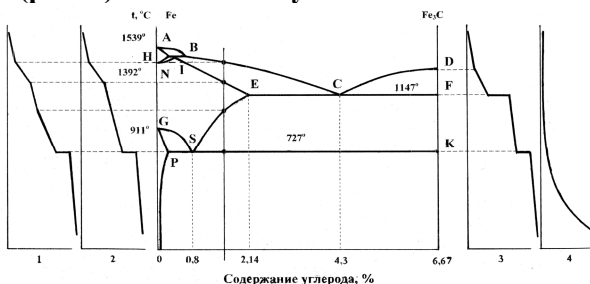


Рис. 1. Диаграмма состояния сплавов «железо–цементит»

- 1) *ABCD*;      2) *AHIECF*;      3) *PSK*;      4) *ECF*.

**6. Состав жидкой фазы при кристаллизации аустенита меняется по следующей линии диаграммы состояния сплавов «железо–цементит» (см. рис. 1):**

- 1) *IE*;    2) *BC*;    3) *ECF*;    4) состав жидкой фазы не меняется.

**7. Количество углерода в эвтектическом сплаве диаграммы состояния сплавов «железо – цементит» (рис. 1) составляет:**

- 1) 0,8 %;      2) 2,14 %;      3) 4,3 %;      4) 6,67 %.

**8. Предельная концентрация углерода в аустените достигается при температуре:**

- 1) 727 °C;      2) 911 °C;      3) 1147 °C;      4) 1539 °C.

**9. Содержание углерода (в %) в ледебурите составляет:**

- 1) 0,2 %;      2) 0,8 %;      3) 2,14 %;      4) 4,3 %.

**10. Температура образования эвтектоида составляет:**

- 1) 1539 °C;    2) 1147 °C;    3) 727 °C;    4) эвтектоид образуется в интервале температур.

**11. Начало кристаллизации стали с 0,5 % C происходит с температуры (примерно):**

- 1) 1500 °C;    2) 1300 °C;    3) 750 °C;    4) 700 °C.

**12. При кристаллизации стали с 0,7 % C из жидкого расплава появляется следующая твердая фаза:**

- 1) феррит;      2) аустенит;      3) цементит;      4) ледебурит.

**13. Кристаллы аустенита у сплава с 2,2 % углерода при температуре 1147 °C содержат углерода:**

- 1) 0,8 %;    2) 2,14 %;    3) 4,3 %;    4) сплав при этой температуре не имеет аустенита.

**14. Сталь с 1,0 % C при температуре 1400 °C состоит из:**

- 1) цементита + жидкого сплава;  
2) перлита + цементита вторичного;

- 3) перлита + ледебурита + цементита вторичного;
- 4) аустенита + жидкого сплава.

**15. Критическим точкам  $A_{C3}$  соответствует следующая линия диаграммы «железо – цементит» (см. рис. 1):**

- 1)  $PS$ ;
- 2)  $SE$ ;
- 3)  $GS$ ;
- 4)  $ECF$ .

**16. По линии  $SE$  диаграммы состояния сплавов «железо–цементит» (см. рис. 1) при охлаждении происходит следующее превращение в сплавах:**

- 1) выделение избыточного феррита;
- 2) образование перлита;
- 3) образование ледебурита;
- 4) выделение вторичного цементита.

**17. Ледебурит при температуре 1000 °С представляет собой:**

- 1) механическую смесь перлита с цементитом;
- 2) твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе;
- 3) химическое соединение  $Fe_3C$ ;
- 4) механическую смесь аустенита с цементитом.

**18. В сплаве с 2,14 % углерода в интервале температур 1300 °С–1200 °С при охлаждении происходит:**

- 1) образование эвтектики – ледебурита;
- 2) кристаллизация цементита;
- 3) кристаллизация аустенита;
- 4) образование эвтектоида – перлита.

**19. В сплаве с 3 % углерода в интервале температур 1147–727 °С при охлаждении происходит:**

- 1) выделение вторичного цементита;
- 2) образование ледебурита;
- 3) переход аустенита в перлит;
- 4) в этом интервале температур никаких структурных превращений не происходит.

**20. Структуру феррит + перлит могут иметь следующие сплавы:**

- 1) доэвтектоидные стали;
- 2) заэвтектоидные стали;

- 3) доэвтектические чугуны;
- 4) заэвтектические чугуны.

**21. В железоуглеродистых сплавах во время охлаждения при температуре 727 °С происходит:**

- 1) полная кристаллизация жидкого расплава;
- 2) переход аустенита в перлит;
- 3) переход перлита в аустенит;
- 4) выделение вторичного цементита.

**22. Третичный цементит образуется:**

- 1) при кристаллизации жидкого расплава;
- 2) при понижении растворимости углерода в феррите;
- 3) при понижении растворимости углерода в аустените;
- 4) при аллотропическом (полиморфном) превращении  $\gamma$ -железа в  $\alpha$ -железо.

**23. Форма кристаллической решетки  $\alpha$ -железа:**

- 1) объемно-центрированная кубическая;
- 2) гранецентрированная кубическая;
- 3) гексагональная;
- 4) тетрагональная.

**24. Форма кристаллической решетки  $\gamma$ -железа:**

- 1) объемно-центрированная кубическая;
- 2) гранецентрированная кубическая;
- 3) гексагональная;
- 4) тетрагональная.

**25. Максимальная растворимость углерода в  $\alpha$ -железе:**

- 1) 0,02 %;      2) 0,8 %;      3) 2,14 %;      4) 6,67 %.

**26. Максимальная растворимость углерода в  $\gamma$ -железе:**

- 1) 0,02 %;      2) 0,8 %;      3) 2,14 %;      4) 6,67 %.

**27. Содержание углерода в перлите составляет:**

- 1) 0,02 %;      2) 0,8 %;      3) 2,14 %;      4) 6,67 %.

**28. Содержание углерода в цементите составляет:**

- 1) 0,02 %;      2) 0,8 %;      3) 2,14 %;      4) 6,67 %.

**29. Температура плавления чистого железа:**

- 1) 768 °С;      2) 910 °С;      3) 1401 °С;      4) 1539 °С.

**30. В перлите содержится:**

- 1) одна фаза;      2) две фазы;      3) три фазы;      4) четыре фазы.

**31. Структура перлита образуется при температуре:**

- 1) 727 °С;      2) 910 °С;      3) 1147 °С;      4) 1539 °С.

## **ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ, СВОЙСТВ И ПРИМЕНЕНИЯ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ**

### **1. Структура доэвтектоидной стали состоит из:**

- 1) цементита;
- 2) феррита и перлита;
- 3) перлита и цементита;
- 4) перлита.

### **2. Структура эвтектоидной стали состоит из:**

- 1) феррита и цементита третичного;
- 2) феррита и перлита;
- 3) перлита и цементита;
- 4) перлита.

### **3. Структура заэвтектоидной стали состоит из:**

- 1) феррита и перлита;
- 2) феррита и цементита третичного;
- 3) перлита и цементита;
- 4) перлита.

### **4. Сера оказывает следующее влияние на свойства стали:**

- 1) увеличивает хрупкость;
- 2) вызывает красноломкость;
- 3) вызывает хладноломкость;
- 4) повышает пластичность.

### **5. Фосфор оказывает следующее влияние на свойства стали:**

- 1) увеличивает хрупкость;
- 2) вызывает красноломкость;
- 3) вызывает хладноломкость;
- 4) повышает пластичность.

### **6. Структура серого чугуна на ферритной основе состоит из:**

- 1) феррита и графита пластинчатого;
- 2) перлита и графита пластинчатого;

- 3) феррита, перлита и графита пластинчатого;
- 4) феррита и графита хлопьевидного.

**7. Структура ковкого чугуна на ферритной основе состоит из:**

- 1) феррита и графита пластинчатого;
- 2) перлита и графита шаровидного;
- 3) феррита и графита хлопьевидного;
- 4) перлита, феррита и графита хлопьевидного.

**8. Структура белого доэвтектического чугуна состоит из:**

- 1) ледебурита;
- 2) ледебурита и цементита первичного;
- 3) ледебурита, перлита и цементита вторичного;
- 4) феррита и графита пластинчатого.

**9. Структура серого чугуна на перлитной основе состоит из:**

- 1) феррита и графита шаровидного;
- 2) перлита и графита пластинчатого;
- 3) феррита, перлита и графита пластинчатого;
- 4) феррита и графита хлопьевидного.

**10. Структура белого заэвтектического чугуна состоит из:**

- 1) ледебурита;
- 2) ледебурита и цементита первичного;
- 3) ледебурита, перлита и цементита вторичного;
- 4) феррита и графита хлопьевидного.

**11. Структура высокопрочного чугуна на ферритной основе состоит из:**

- 1) феррита и графита шаровидного;
- 2) перлита и графита шаровидного;
- 3) феррита и графита хлопьевидного;
- 4) перлита, феррита и графита пластинчатого.

**12. Структура высокопрочного чугуна на перлитной основе состоит из:**

- 1) феррита и графита шаровидного;
- 2) перлита и графита шаровидного;

- 3) перлита и графита хлопьевидного;
- 4) перлита, феррита и графита хлопьевидного.

**13. Структура белых чугунов формируется в следующих условиях:**

- 1) быстрое охлаждение в металлической изложнице;
- 2) медленное охлаждение в земляной форме;
- 3) путем отжига белого чугуна;
- 4) модифицированием жидкого чугуна магнием.

**14. Структура ковкого чугуна формируется в следующих условиях:**

- 1) быстрое охлаждение в металлической изложнице;
- 2) медленное охлаждение в земляной форме;
- 3) путем отжига белого чугуна;
- 4) модифицированием жидкого чугуна магнием.

**15. Структура серого чугуна с пластинчатым графитом формируется в следующих условиях:**

- 1) быстрое охлаждение в металлической форме;
- 2) медленное охлаждение в земляной форме;
- 3) отжигом белого чугуна;
- 4) модифицированием жидкого чугуна магнием.

**16. Структура высокопрочного чугуна с шаровидным графитом формируется в следующих условиях:**

- 1) при быстром охлаждении в металлической форме;
- 2) при медленном охлаждении в земляной форме;
- 3) при отжиге деталей, изготовленных из белого чугуна;
- 4) путем модифицирования жидкого серого чугуна магнием.

**17. Форма графита в высокопрочном чугуне:**

- 1) пластинчатая; 2) шаровидная; 3) хлопьевидная; 4) графита нет.

**18. Форма графита в сером чугуне:**

- 1) пластинчатая;
- 2) шаровидная;
- 3) хлопьевидная;
- 4) графита нет.

**19. Полностью раскисленной является сталь:**

- 1) Ст3пс;
- 2) Ст6сп;
- 3) Ст1кп;
- 4) среди перечисленных нет.

**20. Маркировка материала Ст3 принадлежит:**

- 1) качественной конструкционной стали;
- 2) качественной инструментальной стали;
- 3) стали обыкновенного качества;
- 4) легированной стали.

**21. Углеродистой качественной конструкционной сталью является:**

- 1) сталь У12;
- 2) сталь 30Х13;
- 3) сталь 45;
- 4) сталь Ст2кп

**22. Инструментальной углеродистой сталью является:**

- 1) сталь У8А;
- 2) сталь 65;
- 3) сталь 12Х18Н10Т;
- 4) сталь Р6М5.

**23. 1,2 % углерода может иметь следующий материал:**

- 1) сталь обыкновенного качества;
- 2) качественная конструкционная сталь;
- 3) углеродистая инструментальная сталь;
- 4) ковкий чугун.

**24. Первое число марки ковкого чугуна КЧ 33-8 обозначает:**

- 1) предел прочности при растяжении, кгс/мм<sup>2</sup>;
- 2) предел прочности при изгибе, кгс/см<sup>2</sup>;
- 3) относительное удлинение, %;
- 4) относительное сужение, %.

**25. Число марки высокопрочного чугуна ВЧ 60 обозначает:**

- 1) предел прочности при растяжении, кгс/мм<sup>2</sup>;
- 2) предел прочности при изгибе, кгс/мм<sup>2</sup>;
- 3) относительное удлинение, %;
- 4) относительное сужение, %.

**26. Число марки серого чугуна СЧ 20 обозначает:**

- 1) предел прочности при растяжении, кгс/мм<sup>2</sup>;
- 2) предел прочности при изгибе, кгс/мм<sup>2</sup>;

- 3) относительное удлинение, %;
- 4) относительное сужение, %.

**27. Второе число марки ковкого чугуна КЧ 55-4 обозначает:**

- 1) предел прочности при растяжении,  $\text{кгс}/\text{мм}^2$ ;
- 2) предел прочности при изгибе,  $\text{кгс}/\text{см}^2$ ;
- 3) относительное удлинение, %;
- 4) относительное сужение, %.

**28. Относительное удлинение, равное 8 %, при разрыве имеет следующий материал:**

- 1) КЧ33-8;
- 2) ВК8;
- 3) сталь 08;
- 4) сталь У8.

**29. Относительное удлинение при растяжении у ковкого чугуна КЧ 30-6 составляет:**

- 1) 6 %;
- 2) 30 %;
- 3) в маркировке не указывается удлинение;
- 4) этот чугун не ковкий.

## ЗАКАЛКА И ОТПУСК СТАЛЕЙ

### 1. Трооститом называют:

- 1) механическую смесь феррита с цементитом;
- 2) твердый пересыщенный раствор углерода в  $\alpha$ -железе;
- 3) твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе;
- 4) химическое соединение углерода с железом.

### 2. Мартенситом называют:

- 1) механическую смесь феррита с цементитом;
- 2) пересыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе;
- 3) твердый раствор внедрения углерода в  $\gamma$ -железе;
- 4) химическое соединение железа с углеродом.

### 3. Структурой бездиффузионного превращения аустенита является:

- 1) цементит;
- 2) троостит;
- 3) мартенсит;
- 4) сорбит.

### 4. Меньшую по сравнению с сорбитом твердость имеет структура:

- 1) мартенсит;
- 2) цементит;
- 3) троостит;
- 4) перлит.

### 5. Наиболее твердой является структура:

- 1) троостит;
- 2) феррит;
- 3) сорбит;
- 4) мартенсит.

### 6. Наиболее хрупкой является структура:

- 1) сорбит;
- 2) троостит;
- 3) перлит;
- 4) мартенсит.

### 7. Наименьшая скорость охлаждения при термической обработке может быть получена:

- 1) на воздухе;
- 2) вместе с печью;
- 3) в воде;
- 4) в масле.

### 8. При закалке углеродистой стали в качестве охлаждающей среды используют воду для получения структуры:

- 1) цементита;
- 2) сорбита;
- 3) троостита;
- 4) мартенсита.

**9. Критическая скорость закалки – это:**

- 1) наименьшая скорость получения чистого мартенсита;
- 2) скорость, при которой образуется трещина;
- 3) характеристика охлаждающей среды;
- 4) наибольшая из возможных скоростей охлаждения.

**10. Нагрев доэвтектоидной стали на  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше температуры точек  $A_{C3}$  с последующим охлаждением на воздухе соответствует следующей термической операции:**

- 1) нормализации;
- 2) закалке;
- 3) отпуску;
- 4) диффузионному отжигу.

**11. Неполная закалка – это:**

- 1) закалка с охлаждением стали со скоростью менее критической с температур выше линии  $GSK$ -диаграммы  $Fe-Fe_3C$ ;
- 2) закалка с нагревом выше линии  $PSK$ , но ниже линии  $GSE$  диаграммы  $Fe-Fe_3C$ ;
- 3) закалка с нагревом выше линии  $GSE$ -диаграммы;
- 4) закалка только поверхности детали.

**12. Отпуском называют:**

- 1) нагрев закаленной стали до температур ниже линии  $PSK$  метастабильной диаграммы  $Fe-Fe_3C$  с последующим охлаждением;
- 2) нагрев стали выше линии  $GSK$  с быстрым охлаждением;
- 3) нагрев стали выше линии  $GSK$  с медленным охлаждением;
- 4) нагрев стали выше линии  $GSE$  с медленным охлаждением.

**13. Нагрев заэвтектоидной стали до температуры выше линии  $SK$ , но ниже  $SE$  диаграммы с последующим охлаждением в воде соответствует следующей термической обработке:**

- 1) полной закалке;
- 2) нормализации;
- 3) отжигу;
- 4) неполной закалке.

**14. Сталь У13, нагретая до температуры 750 °С и охлажденная в масле, будет иметь структуру:**

- 1) мартенсит + цементит вторичный;
- 2) троостит;
- 3) перлит + цементит вторичный;
- 4) сорбит.

**15. Для полной закалки стали 40 необходимая температура нагрева составляет:**

- 1) 650 °С;
- 2) 750 °С;
- 3) 850 °С;
- 4) 1050 °С.

**16. Для закалки стали У11 рекомендуют следующую температуру нагрева:**

- 1) 1147 °С;
- 2) 910 °С;
- 3) 780 °С;
- 4) 560 °С.

**17. Для среднего отпуска углеродистой стали используют следующую температуру нагрева:**

- 1) 910 °С;
- 2) 780 °С;
- 3) 600 °С;
- 4) 400 °С.

**18. Сталь У12 после неполной закалки будет иметь следующую структуру:**

- 1) перлит + цементит вторичный;
- 2) мартенсит + феррит;
- 3) мартенсит;
- 4) мартенсит + цементит вторичный.

**19. Сталь 50 после полной закалки может иметь твердость:**

- 1) 56 HRC;
- 2) 30 HRC;
- 3) 250 HB;
- 4) 90 HRB.

**20. Сталь У10 после нормализации будет иметь структуру:**

- 1) феррит + перлит;
- 2) мартенсит + цементит вторичный;
- 3) мартенсит + феррит;
- 4) перлит + цементит вторичный.

**21. Сталь 45 после закалки и среднего отпуска будет иметь структуру:**

- 1) сорбит отпуска;
- 2) мартенсит отпуска;

- 3) троостит отпуска;
- 4) мартенсит отпуска + цементит вторичный.

**22. Сталь У8 после закалки и высокого отпуска будет иметь структуру:**

- 1) мартенсит отпуска;
- 2) сорбит отпуска;
- 3) троостит отпуска;
- 4) мартенсит отпуска + цементит вторичный.

**23. Закаленная сталь У10 после низкого отпуска будет иметь твердость (примерно):**

- 1) 60 HRC;
- 2) 50 HRC;
- 3) 40 HRC;
- 4) 30 HRC.

**24. Сталь У12 после закалки и низкого отпуска будет иметь структуру:**

- 1) мартенсит отпуска;
- 2) мартенсит отпуска + цементит;
- 3) сорбит отпуска;
- 4) троостит отпуска.

**25. После закалки напильника из стали У11 необходимо провести:**

- 1) отжиг;
- 2) высокий отпуск;
- 3) низкий отпуск;
- 4) нормализацию.

**26. Закалка со средним отпуском требуется для изделия:**

- 1) сверло;
- 2) метчик;
- 3) пружина;
- 4) напильник.

**27. Сорбитную структуру должна иметь следующая из перечисленных деталей автомобиля:**

- 1) шестерня коробки передач;
- 2) лист рессоры;
- 3) шатун;
- 4) крестовина карданного вала.

**28. Термическая обработка метчика из стали У12А для нарезания резьбы заключается в:**

- 1) закалке + высоком отпуске;
- 2) закалке + низком отпуске;
- 3) закалке + нормализации;
- 4) нормализации.

**29. Причиной недостаточной твердости стали после закалки и отпуска может быть:**

- 1) слишком высокая температура нагрева для закалки;
- 2) малая температура отпуска;
- 3) слишком высокая температура отпуска;
- 4) слишком высокая скорость охлаждения при закалке.

**30. Причиной коробления деталей при закалке может быть:**

- 1) недостаточная температура нагрева;
- 2) неправильное погружение детали в охлаждающую среду;
- 3) недостаточная температура отпуска;
- 4) недостаточная скорость охлаждения при закалке.

**31. Причиной слишком высокой твердости после закалки и отпуска может быть:**

- 1) недостаточная температура отпуска;
- 2) недостаточная скорость охлаждения при закалке;
- 3) слишком высокая температура отпуска;
- 4) слишком высокая скорость охлаждения при закалке.

## **ВЫБОР РЕЖИМОВ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

### **1. Сущность процесса цементации заключается:**

- 1) в насыщении поверхностного слоя азотом;
- 2) в насыщении поверхностного слоя бором;
- 3) в насыщении поверхностного слоя углеродом;
- 4) в насыщении поверхностного слоя углеродом и азотом.

### **2. Для цементации применяется следующая марка стали:**

- 1) троостит;
- 2) феррит;
- 3) сорбит;
- 4) мартенсит.

### **3. После цементации производится следующая термическая обработка:**

- 1) закалка + низкий отпуск;
- 2) отпуск;
- 3) отжиг;
- 4) нормализация.

### **4. Микроструктура поверхностного слоя стали после цементации (до закалки) представляет собой:**

- 1) перлит и цементит;
- 2) феррит и перлит;
- 3) аустенит и феррит;
- 4) перлит.

### **5. Температура нагрева углеродистой стали под цементацию до закалки равна:**

- 1) 210 °С;
- 2) 727 °С;
- 3) 1147 °С;
- 4) 920 °С.

### **6. Высокая твердость поверхностного слоя при цементации углеродистой стали с последующей закалкой обусловлена:**

- 1) образованием нитридов железа;
- 2) образованием мартенсита с содержанием углерода до 1 %;
- 3) образованием наклепанной поверхности;
- 4) образованием карбидов хрома и вольфрама.

**7. При цементации содержание углерода в поверхностном слое детали:**

- 1) сохраняется постоянным;
- 2) изменяется;
- 3) увеличивается до 1 % углерода;
- 4) уменьшается до 0,1 % углерода.

**8. Поверхностный слой детали при цементации насыщают следующим элементом:**

- 1) азотом;
- 2) углеродом;
- 3) кремнием;
- 4) хромом.

**9. Содержание углерода в поверхностном слое стали после цементации составляет:**

- 1) 0,2 %;
- 2) до 0,5 %;
- 3) до 1 %;
- 4) до 1,3 %.

**10. Структура стали после цементации и последующей закалки представляет собой:**

- 1) на поверхности – мартенсит и цементит, в сердцевине – феррит и перлит;
- 2) на поверхности – цементит, в сердцевине феррит и аустенит;
- 3) на поверхности – перлит и цементит, в сердцевине – мартенсит;
- 4) на поверхности – аустенит, в сердцевине – перлит.

**11. Сущность процесса нитроцементации заключается:**

- 1) в насыщении поверхностного слоя азотом;
- 2) в насыщении поверхностного слоя азотом и углеродом в жидкой среде;
- 3) в насыщении поверхностного слоя азотом и углеродом в газовой среде;
- 4) в насыщении поверхностного слоя углеродом.

**12. Основным назначением нитроцементации является:**

- 1) повышение режущих свойств инструмента из быстрорежущей стали за счет нитридов;
- 2) получение в поверхностном слое детали азотистого мартенсита;
- 3) получение в поверхностном слое аустенитной структуры;
- 4) насыщение поверхностного слоя различными металлами.

**13. Высокая твердость поверхностного слоя детали при азотировании обусловлена:**

- 1) высоким содержанием углерода;
- 2) образованием нитридов углерода, хрома, молибдена, алюминия;
- 3) образованием мартенсита;
- 4) образованием цементита.

**14. Сущность процесса азотирования заключается:**

- 1) в насыщении поверхностного слоя углеродом;
- 2) в насыщении поверхностного слоя азотом;
- 3) в насыщении поверхностного слоя бором;
- 4) в насыщении поверхностного слоя азотом и углеродом.

**15. Азотирование производится при температуре:**

- 1) 550 °С;
- 2) 727 °С;
- 3) 910 °С;
- 4) 1400 °С.

**16. Для азотирования можно применять следующую сталь:**

- 1) 60;
- 2) У11;
- 3) 38ХМЮА;
- 4) Ст5сп.

**17. Основное назначение хромирования изделий из малоуглеродистой стали (до 0,2 % углерода) заключается:**

- 1) в повышении поверхностной твердости;
- 2) в резком повышении коррозионной стойкости;
- 3) в повышении пластичности поверхностного слоя;
- 4) в повышении предела прочности стали.

**18. Основное назначение процесса алитирования заключается:**

- 1) в повышении окалинстойкости деталей за счет образования на поверхности пленки окиси алюминия;
- 2) в повышении твердости сердцевины детали;
- 3) в повышении дисперсности закаленных деталей;
- 4) в образовании на поверхности детали мартенсита.

**19. Сущность процессов диффузионной металлизации заключается:**

- 1) в насыщении поверхностного слоя углеродом;
- 2) в насыщении поверхностного слоя стали различными газами;

- 3) в насыщении поверхностного слоя стали различными металлами;
- 4) в насыщении поверхностного слоя стали окислами металлов.

**20. Сущность процесса цианирования заключается:**

- 1) в одновременном насыщении поверхности стали углеродом и азотом в жидкой среде;
- 2) в насыщении поверхностного слоя углеродом;
- 3) в насыщении поверхностного слоя азотом;
- 4) в насыщении поверхностного слоя кремнием.

**21. Основным назначением процесса борирования является:**

- 1) повышение окалиностойкости;
- 2) повышение износостойкости;
- 3) повышение износостойкости и жаростойкости;
- 4) повышение износостойкости, жаростойкости и коррозионной стойкости поверхностного слоя детали.

**22. Нагрев поверхностного слоя деталей при применении ТВЧ вызван:**

- 1) прохождением тока через деталь;
- 2) изменением величины напряжения;
- 3) постоянным магнитным полем на поверхности детали;
- 4) индуцированием вихревых токов в высокочастотном магнитном поле.

**23. На поверхности детали получается структура аустенита и феррита при следующем режиме нагрева ТВЧ:**

- 1) при нагреве выше  $A_{C3}$ ;
- 2) при нагреве ниже  $A_{C1}$ ;
- 3) при нагреве выше  $A_{C1}$ , но ниже  $A_{C3}$ ;
- 4) при нагреве ниже  $A_{Cm}$ .

**24. Содержание углерода в поверхностном слое детали при закалке с нагревом ТВЧ:**

- 1) не изменяется;
- 2) увеличивается, так как при нагреве происходит насыщение углеродом воздуха;
- 3) уменьшается, так как при длительном нагреве выгорает углерод;
- 4) зависит от конфигурации и толщины детали.

**25. Микроструктура поверхностного слоя стали после нагрева ТВЧ (до охлаждения) представляет собой:**

- 1) аустенит;
- 2) цементит и перлит;
- 3) перлит;
- 4) феррит и перлит.

**26. Для нагрева поверхности детали ТВЧ на глубину до 1 мм применяется следующее оборудование:**

- 1) тигельные печи сопротивления;
- 2) машинные генераторы;
- 3) тиристорные преобразователи;
- 4) муфельные печи.

**27. На толщину упрочненного слоя при закалке с нагревом ТВЧ влияет следующий основной фактор:**

- 1) напряжение тока на концах индуктора;
- 2) сила тока, проходящего через генератор;
- 3) частота тока, проходящего по индуктору;
- 4) толщина стенок и форма индуктора.

**28. Для поверхностной закалки с нагревом ТВЧ может применяться сталь следующей марки:**

- 1) 20;      2) 45;      3) У11;      4) СтЗкп.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА ДЛЯ СТУДЕНТОВ

### Основная литература

1. *Арзамасов, Б. Н.* Материаловедение : учебник для вузов / Б. Н. Арзамасов [и др.] ; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. – Изд. 8-е, стереотип. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 648 с.
2. *Андрушевич, А. А.* Материаловедение : учеб.-метод. комплекс / А. А. Андрушевич, Т. К. Романова. – Минск : БГАТУ, 2008. – 192 с.
3. *Андрушевич, А. А.* Материаловедение и технология конструкционных материалов. Материаловедение : лабораторный практикум / А. А. Андрушевич [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2009. – 180 с.
4. *Ржевская, С. В.* Материаловедение : учебник для вузов / С. В. Ржевская. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М. : Логос, 2004. – 424 с.
5. Материаловедение и технология металлов : учебник для вузов / Г. П. Фетисов [и др.]. – М. : Высшая школа, 2005. – 861 с.
6. Атлас микроструктур черных и цветных металлов : учебное наглядное пособие / сост.: А. А. Андрушевич [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2012. – 100 с.
7. *Лахтин, Ю. М.* Материаловедение : учебник для высших технических учебных заведений / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – 4-е изд. – М. : Альянс, 2009. – 528 с.
8. *Плошкин, В. В.* Материаловедение: учеб. пособие / В. В. Плошкин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во «Юрайт», 2011. – 463 с.
9. Материаловедение. Технология конструкционных материалов. Раздел «Материаловедение» : рабочая тетрадь / сост.: А. А. Андрушевич.. – Минск : БГАТУ, 2024. – 28 с.

### Дополнительная литература

1. Материаловедение и технология конструкционных материалов : метод. указания к лабораторным работам для студентов заочной формы обучения / В. М. Капцевич [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2008. – 105 с.
2. *Андрушевич, А. А.* Материаловедение : пособие / А. А. Андрушевич, Т. К. Романова. – Минск : БГАТУ, 2010. – 120 с.

3. Материаловедение : учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по техническим специальностям / И. М. Жарский [и др.]. – Минск : Вышэйшая школа, 2015. – 558 с.
4. Выбор и применение материалов : в 5 т. : учеб. пособие для студентов вузов по техническим специальностям. Т. 1 : Общие принципы выбора и применения материалов / Н. А. Свидуневич [и др.] ; под ред. Н. А. Свидуневича. – 2-е изд. – Минск : Беларуская навука, 2019. – 329 с.
5. Выбор и применение материалов : в 5 т. : учеб. пособие для студентов вузов по техническим специальностям. Т. 2 : Выбор и применение конструкционных сталей / Н. А. Свидуневич [и др.] ; под ред. Н. А. Свидуневича. – Минск : Беларуская навука, 2019. – 625 с.
6. ГОСТ 9012–59 (СТ СЭВ 468–77). Метод измерения твердости по Бринеллю. – М. : Издательство стандартов, 1987. – 40 с.
7. ГОСТ 9013–59 (СТ СЭВ 469–77, ИСО 6508–88). Метод измерения твердости по Роквеллу. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 11 с.
8. Энциклопедический справочник термиста-технолога : в 3 т. – М. : Наука и технологии, 2004. – 1704 с.
9. Тестовые задания по материаловедению и технологии конструкционных материалов : учебное пособие для студентов ВПО / под ред. А. А. Смолькина. – М. : Изд. центр «Академия», 2011. – 144 с.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

## РЕКОМЕНДАЦИИ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

По каждой выполненной работе студентом оформляется отчет в соответствии с требованиями:

- 1) титульный лист с названием лабораторной работы. Титульный лист выполняется с указанием соответствующих надписей и приведен в приложении 2;
- 2) цель лабораторной работы;
- 3) краткие сведения из теории по теме выполняемой работы, порядок проведения экспериментов;
- 4) оборудование, приборы и инструменты, используемые при проведении лабораторной работы;
- 5) характеристика образцов до испытания (форма и геометрические размеры, материал);
- 6) результаты испытаний (журнал наблюдений, характеристика образцов после испытаний и т. п.);
- 7) обработка результатов испытаний, расчет характеристик и их анализ;
- 8) выводы по выполненной лабораторной работе;
- 9) список использованной литературы.

Для оформления отчета по лабораторным работам можно использовать отдельную тетрадь или листы форматом 210×297 мм, сброшюрованные в общепринятой форме или вложенные в отдельный файл. В конце семестра отчеты по всем лабораторным работам сдаются преподавателю.

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**  
**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра технологии металлов  
Дисциплина «Материаловедение и ТКМ»  
Раздел «Материаловедение»

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ**

Отчет по лабораторной работе № 1

Исполнитель: студент группы 21 ТС  
Иванов И.А.

Преподаватель: Петрович А.В.

Минск 2024

Термины и пояснения к ним в соответствии с ГОСТ 1497–84

Т е р м и н ы	П о я с н е н и е
Начальная расчетная длина образца, $l_0$	Участок рабочей длины образца между нанесенными метками до испытания, на котором определяется удлинение
Конечная расчетная длина образца, $l_K$	Длина расчетной части образца после разрыва образца
Начальный диаметр образца, $d_0$	Диаметр рабочей части цилиндрического образца до испытания
Диаметр образца после разрыва, $d_K$	Минимальный диаметр рабочей части образца после разрыва
Начальная площадь поперечного сечения образца, $F_0$	Площадь поперечного сечения рабочей части образца до испытания
Площадь поперечного сечения образца после разрыва, $F_K$	Минимальная площадь поперечного сечения рабочей части образца после разрыва
Осевое растягивающее усилие, $P$	Усилие, действующее на образец в данный момент испытания
Напряжение, $\sigma$	Напряжение, определяемое отношением осевого растягивающего усилия $P$ к начальной площади поперечного сечения рабочей части образца $F_0$
Абсолютное удлинение образца, $\Delta l$	Приращение начальной расчетной длины образца в любой момент испытания
Предел пропорциональности, $\sigma_{\text{пц}}$	Напряжение, при котором отступление от линейной зависимости между усилием и удлинением достигает такой величины, что тангенс угла наклона, образованного касательной к кривой «усилие— удлинение» в точке $P_{\text{пц}}$ с осью усилий увеличивается на 50 % от своего значения на упругом (линейном) участке

### Окончание приложения 3

Т е р м и н ы	П о я с н е н и е
Модуль упругости, $E$	Отношение приращения напряжения к соответствующему приращению удлинения в пределах упругой деформации
Предел упругости, $\sigma_y$	Напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,05 % первоначальной расчетной длины образца
Предел текучести, $\sigma_T$	Наименьшее напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения растягивающего усилия, когда остаточное удлинение достигает 0,2 % расчетной длины образца
Временное сопротивление (предел прочности), $\sigma_B$	Напряжение, соответствующее наибольшему усилию $P_{\max}$ предшествующему разрыву образца
Относительное удлинение после разрыва, $\delta$	Отношение приращения расчетной длины образца ( $l_R - l_0$ ) после разрушения к начальной расчетной длине $l_0$ , выраженное в процентах
Относительное сужение после разрыва, $\psi$	Отношение разности $F_0$ и минимальной $F_K$ площади поперечного сечения образца после разрушения к начальной площади поперечного сечения образца $F_0$ , выраженное в процентах

Твердость по Бринеллю

Диаметр отпечатка в мм $d_{10}$ , или $2d_5$ , или $4d_{2,5}$	Число твердости при нагрузке $P$ в кг			Диаметр отпечатка в мм $d_{10}$ , или $2d_5$ , или $4d_{2,5}$	Число твердости при нагрузке $P$ в кг		
	$30 D^2$	$10 D^2$	$2,5 D^2$		$30 D^2$	$10 D^2$	$2,5 D^2$
$1$	$2$	$3$	$4$	$5$	$6$	$7$	$8$
2,90	444	-	-	4,50	179	59,5	14,9
2,95	429	-	-	4,55	174	58,1	14,5
3,0	415	-	34,6	4,60	170	56,8	14,2
3,05	401	-	33,4	4,65	167	55,5	13,9
3,10	388	129	32,3	4,70	163	54,3	13,6
3,15	375	125	31,3	4,75	159	53,0	13,3
3,20	368	121	30,3	4,80	156	51,9	13,0
3,25	352	117	29,3	4,85	152	50,7	12,7
3,30	341	114	28,4	4,90	149	49,6	12,4
3,35	331	110	27,6	4,95	146	48,6	12,2
3,40	321	107	26,7	5,00	143	47,5	11,9
3,45	311	104	25,9	5,05	140	46,5	11,6
3,50	302	101	25,2	5,10	137	45,5	11,4
3,55	293	97,7	24,5	5,15	134	44,6	11,2
3,60	285	95	23,7	5,20	131	43,7	10,9
3,65	277	92,8	23,1	5,25	128	42,8	10,7
3,70	269	89,7	22,4	5,30	126	41,9	10,5
3,75	262	87,2	21,8	5,35	123	41,0	10,3
3,80	255	84,9	21,2	5,40	121	40,2	10,1
3,85	248	82,6	20,7	5,45	118	39,4	9,86
3,90	241	80,4	20,1	5,50	116	38,6	9,66
3,95	235	78,3	19,6	5,55	114	37,9	9,46
4,0	229	76,3	19,1	5,60	111	37,4	9,27
4,05	223	74,3	18,6	5,65	109	36,4	9,10
4,10	217	72,4	18,4	5,70	107	35,7	8,93
4,15	212	70,6	17,6	5,75	105	35,0	8,76
4,20	207	68,8	17,2	5,80	103	34,3	8,59
4,25	201	67,1	16,8	5,85	101	33,7	8,43

#### Окончание приложения 4

Диаметр отпечатка в мм $d_{10}$ , или $2d_5$ , или $4d_{2,5}$	Число твердости при нагрузке $P$ в кг			Диаметр отпечатка в мм $d_{10}$ , или $2d_5$ , или $4d_{2,5}$	Число твердости при нагрузке $P$ в кг		
	$30 D^2$	$10 D^2$	$2,5 D^2$		$30 D^2$	$10 D^2$	$2,5 D^2$
4,30	197	65,5	16,4	5,90	99,2	33,1	8,26
4,35	192	63,9	16,0	5,95	97,3	32,4	8,11
4,40	187	62,4	15,6	6,00	95,5	31,8	
4,45	188	60,9	15,2				

Обозначения  $2d_5$  и  $4d_{2,5}$  указывают, что для отыскания по таблице числа твердости при испытании шариком диаметром 5 мм диаметр отпечатка надо умножить на 2, а при испытании шариком диаметром 2,5 мм — на 4. Например, для отпечатка диаметром 1,65 мм, полученного при испытании шариком диаметром 5 мм под нагрузкой 750 кг, число твердости следует искать в таблице для отпечатка 3,30 мм ( $2,165 = 3,30$ ); оно равно 341.

Приложение 5

Соотношение чисел твердости по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу

Твердость по Виккерсу	Твердость по Бринеллю, <i>HB</i> ( <i>D</i> = 10 мм; <i>P</i> = 3000 кг)		Твердость по Роквеллу, <i>HR</i> Шкала			Твердость по Виккерсу	Твердость по Бринеллю, <i>HB</i> ( <i>D</i> = 10 мм; <i>P</i> = 3000 кг)		Твердость по Роквеллу, <i>HR</i> Шкала		
	Диаметр отпечатка, мм	Число твердости	C (150 кг)	B (100 кг)	A (60 кг)		Диаметр отпечатка, мм	Число твердости	C (150 кг)	B (100 кг)	A (60 кг)
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>
1224	2,20	780	72	-	84	228	4,00	229	20	100	61
1116	2,25	745	70	-	83	222	4,05	223	19	99	60
1022	2,30	712	68	-	82	217	4,10	217	17	98	60
941	2,35	682	66	-	81	213	4,15	212	15	97	59
868	2,40	653	64	-	80	208	4,20	207	14	95	59
804	2,45	627	62	-	79	201	4,25	201	13	94	58
746	2,50	601	60	-	78	197	4,30	197	12	93	58
694	2,55	578	58	-	78	192	4,35	192	11	92	57
650	2,60	555	56	-	77	186	4,40	187	9	91	57
606	2,65	534	54	-	76	183	4,45	183	8	90	56
587	2,70	514	52	-	75	178	4,50	179	7	90	56
551	2,75	495	50	-	74	174	4,55	174	6	89	55
534	2,80	477	49	-	74	171	4,60	170	4	88	55
502	2,85	461	48	-	73	166	4,65	167	3	87	54
474	2,90	444	46	-	73	162	4,70	163	2	86	53
460	2,95	429	45	-	72	159	4,75	159	1	85	53
435	3,00	415	43	-	72	155	4,80	156	0	84	52
423	3,05	401	42	-	71	152	4,85	152	-	83	-
401	3,10	388	41	-	71	149	4,90	149	-	82	-
390	3,15	375	40	-	70	148	4,95	146	-	81	-
380	3,20	363	39	-	70	143	5,00	143	-	80	-
361	3,25	352	38	-	69	140	5,05	140	-	79	-
344	3,30	341	36	-	68	138	5,10	137	-	78	-

Твердость по Виккерсу	Твердость по Бринеллю, <i>HB</i> ( <i>D</i> = 10 мм; <i>P</i> = 3000 кг)		Твердость по Роквеллу, <i>HR</i> Шкала			Твердость по Виккерсу	Твердость по Бринеллю, <i>HB</i> ( <i>D</i> = 10 мм; <i>P</i> = 3000 кг)		Твердость по Роквеллу, <i>HR</i> Шкала		
	Диаметр отпечатка, мм	Число твердости	C (150 кг)	B (100 кг)	A (60 кг)		Диаметр отпечатка, мм	Число твердости	C (150 кг)	B (100 кг)	A (60 кг)
334	3,35	331	35	-	67	134	5,15	134	-	77	-
320	3,40	321	33	-	67	131	5,20	131	-	76	-
311	3,45	311	32	-	66	129	5,25	128	-	75	-
303	3,50	302	31	-	66	127	5,30	126	-	74	-
292	3,55	293	30	-	65	123	5,35	123	-	73	-
285	3,60	285	29	-	65	121	5,40	121	-	72	-
278	3,65	277	28	-	64	118	5,45	118	-	71	-
270	3,70	269	27	-	64	116	5,50	116	-	70	-
261	3,75	262	26	-	63	115	5,55	114	-	68	-
255	3,80	255	25	-	63	113	5,60	111	-	67	-
249	3,85	248	24	-	62	110	5,65	110	-	66	-
240	3,90	241	23	102	62	109	5,70	109	-	65	-
235	3,95	235	21	101	61	108	5,75	107	-	64	-

Учебное издание

**Андрушевич** Андрей Александрович,  
**Анисович** Анна Геннадиевна,  
**Шабуня** Виктория Васильевна

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.  
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебно-методическое пособие

Ответственный за выпуск *В. М. Капцевич*  
Редактор *Г. В. Анисимова*  
Корректор *Г. В. Анисимова*  
Компьютерная верстка *Д. А. Пекарского*  
Дизайн обложки *Д. О. Михеевой*

Подписано в печать 27.12.2024. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 8,60. Уч.-изд. л. 6,72. Тираж 99 экз. Заказ 509.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования  
«Белорусский государственный аграрный технический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий  
№ 1/359 от 09.06.2014.  
№ 2/151 от 11.06.2014.  
Пр-т Независимости, 99–1, 220012, Минск.