

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технология металлов»

# АТЛАС МИКРОСТРУКТУР ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением по образованию  
в области сельского хозяйства в качестве учебного наглядного  
пособия для студентов высших учебных заведений  
группы специальностей 74 06 Агроинженерия*

Минск  
БГАТУ  
2012

УДК 669.01:539.24  
ББК 34.23  
А 92

Рецензенты:

заведующая лабораторией ГНУ «Институт порошковой металлургии»  
НАН Беларуси, кандидат технических наук *И. В. Фомихина*;  
кандидат технических наук, заведующий лабораторией непрерывных  
процессов термической обработки ГНУ «Физико-технический институт»  
НАН Беларуси *В. В. Крылов-Олиференко*

Составители:

кандидат технических наук, доцент *А. А. Андрушевич*,  
доктор физико-математических наук, доцент *А. Г. Анисович*,  
кандидат технических наук, доцент *Т. К. Романова*,  
кандидат технических наук, доцент *Д. Г. Девойно*,  
ассистент *П. С. Чугаев*

А92 **Атлас микроструктур черных и цветных металлов** : учебное  
наглядное пособие / сост. : *А. А. Андрушевич [и др.]*. – Минск :  
БГАТУ, 2012. – 100 с.  
ISBN 978-985-519-445-4.

Настоящий атлас содержит микроструктуры черных и цветных металлов и их сплавов, выполненные преимущественно при помощи оптической металлографии, учебно-методические материалы для самостоятельного изучения структур железоуглеродистых и цветных сплавов в равновесном и неравновесном состояниях. Включает определения структурных составляющих, методические указания для подготовки и анализа структур на лабораторных работах, а также рекомендуемую литературу по всем рассмотренным вопросам.

Изложение соответствующих методических материалов осуществлено в соответствии с учебной программой и с учетом многолетнего опыта преподавания раздела «Материаловедение» дисциплины «Материаловедение. Технология конструкционных материалов» на кафедре «Технология металлов» Белорусского государственного аграрного технического университета.

Для студентов технических специальностей высших учебных заведений Республики Беларусь для использования при изучении теоретического курса и проведении лабораторных занятий по материаловедению.

УДК: 669.01: 539.24  
ББК 34.23

ISBN 978-985-519-445-4

© БГАТУ, 2012

## СОДЕРЖАНИЕ

---

ВВЕДЕНИЕ .....	5	6. МИКРОСТРУКТУРЫ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ .....	67
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ .....	7	6.1. Основные сведения об алюминиевых сплавах .....	67
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ		6.2. Микроструктуры алюминиевых сплавов .....	69
О МИКРОСТРУКТУРНОМ АНАЛИЗЕ .....	15	7. МИКРОСТРУКТУРЫ МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ.....	77
1.1. Характеристика микроанализа		7.1. Основные сведения	
и область применения .....	15	о медных сплавах.....	77
1.2. Методы оптической микроскопии .....	16	7.2. Микроструктуры медных сплавов .....	80
1.3. Металлографические микроскопы .....	18	8. МИКРОСТРУКТУРЫ	
1.4. Приготовление микрошлифов.....	24	ПОДШИПНИКОВЫХ СПЛАВОВ .....	84
1.5. Травление микрошлифов .....	25	8.1. Основные сведения	
1.6. Методы электронной микроскопии .....	26	о подшипниковых сплавах .....	84
2. МИКРОСТРУКТУРЫ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ		8.2. Микроструктуры баббитов.....	85
В РАВНОВЕСНОМ СОСТОЯНИИ.....	30	9. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ	
2.1. Структурные составляющие .....	30	МИКРОАНАЛИЗА .....	86
2.2. Микроструктуры углеродистых сталей .....	31	9.1. Изучение структуры	
3. МИКРОСТРУКТУРЫ ЧУГУНОВ		и фазового состава сталей и чугунов .....	86
В РАВНОВЕСНОМ СОСТОЯНИИ.....	38	9.2. Определение структуры	
3.1. Структурные составляющие чугунов.....	38	и фазового состава цветных металлов .....	87
3.2. Микроструктуры чугунов .....	40	9.3. Определение характера	
4. МИКРОСТРУКТУРЫ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ		обработки металлов.....	87
ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ.....	49	9.4. Определение величины зерна	
4.1. Структурные составляющие		металлов и сплавов .....	89
в термически обработанной стали .....	49	9.5. Определение содержание углерода	
4.2. Микроструктуры сталей		в углеродистых сталях .....	93
после термической обработки .....	51	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	96
5. МИКРОСТРУКТУРЫ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ			
ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ.....	56		
5.1. Классификация легированных сталей .....	56		
5.2. Микроструктуры легированных сталей и сплавов .....	57		

## ВВЕДЕНИЕ

---

Наибольшее применение в сельскохозяйственном машиностроении находят железоуглеродистые сплавы (*стали и чугуны*), цветные металлы и их сплавы (*алюминий, медь, свинец, сурьма и их сплавы*), свойства которых зависят от многих факторов: химического состава, способа выплавки, скорости охлаждения, наличия неметаллических включений, способа термической обработки и т. д. Свойства металлов и сплавов определяются их внутренним строением — *структурой*. Для изучения строения металлов и сплавов используют различные методы исследований: макроанализ, микроанализ, рентгеноструктурный анализ и др.

Наиболее распространенным методом является *микроструктурный анализ*, который заключается в исследовании структуры металлов и сплавов при помощи оптических микроскопов с различной разрешающей способностью. Он позволяет достаточно просто получить не только качественную, но и количественную оценку структурных составляющих и свойств металлов, а также определить, в какой степени изменяются их свойства при изменении химического состава, условий обработки и т. д.

Микроструктуры, наблюдаемые при микроанализе, являются основанием для осуществления необходимых технологических процессов с целью достижения требуемых физико-химических и эксплуатационных свойств металлов и сплавов, в частности, представленных в данном атласе.

Учебное наглядное пособие состоит из 9-и глав, которые содержат общие сведения о микроструктурном анализе, фотографии микроструктур черных и цветных металлов и их сплавов, описание представленных структур, а также основные практические задачи, решаемые с помощью микроскопического метода исследования структур сталей и чугунов. Кратко рассмотрены технические вопросы и оборудование для проведения микроструктурного анализа. Особое внимание уделено микроструктурам углеродистых и легированных сталей

и чугунов в равновесном состоянии и после термической обработки. В начале пособия указаны основные термины и определения, а в конце представлен список рекомендуемой литературы.

Учебное наглядное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений для использования при изучении теоретического курса и выполнении лабораторных работ по материаловедению по дисциплине «Материаловедение. Технология конструкционных материалов».

## ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

---

**АВИАЛЬ** — деформируемый (ковочный) сплав системы «алюминий – магний – кремний».

**АНИЗОТРОПИЯ** — различие свойств кристалла по различным кристаллографическим плоскостям.

**АУСТЕНИТ (А)** — твердый раствор внедрения углерода (С) в железе – Fe<sub>γ</sub>(С).

**АУСТЕНИТИЗАЦИЯ** — процесс превращения феррито-цементитной смеси (перлита) в аустенит при нагревании выше критических точек Ас<sub>1</sub> и Ас<sub>3</sub>.

**БАББИТ** — мягкий антифрикционный сплав на основе олова и свинца.

**БЕЙНИТ (Б)** — игольчатая микроструктура, представляющая мелкодисперсную смесь феррита и цементита, с твердостью 45–55 HRC.

**БРОНЗА** — сплав меди со всеми элементами, кроме цинка и никеля.

**ДИАГРАММА ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ (РАСПАДА) АУСТЕНИТА** — графическое изображение начала и конца превращения аустенита при различных скоростях охлаждения.

**ДИАГРАММА РАВНОВЕСНОГО СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ** — графическое изображение фазовых превращений в сплавах в условиях равновесия в зависимости от температуры и химического состава.

**ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ «АЛЮМИНИЙ – КРЕМНИЙ»** — стабильная диаграмма фазовых превращений в силуминах в зависимости от температуры и химического состава алюминиево-кремниевых сплавов.

**ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ «СВИНЕЦ – СУРЬМА»** — стабильная диаграмма фазовых превращений двойных сплавов с образованием эвтектики в зависимости от температуры и химического состава свинцово-сурь-мянистых сплавов.

**ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ «ЖЕЛЕЗО – ЦЕМЕНТИТ»** — метастабильная диаграмма фазовых превращений в сталях и белых чугунах в зависимости от температуры и химического состава железоуглеродистых сплавов.

**ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ «ЖЕЛЕЗО – ГРАФИТ»** — стабильная диаграмма фазовых превращений в серых чугунах в зависимости от температуры и химического состава железоуглеродистых сплавов.

**ДИСПЕРСНОСТЬ** — физическая величина, характеризующая размер зерен или фаз в металле или сплаве. Чем меньше размер частиц, тем больше дисперсность.

**ДУРАЛЮМИН** — деформируемый сплав системы «алюминий – медь – магний».

**ЗАКАЛИВАЕМОСТЬ** — способность стали приобретать в результате закалки высокую твердость.

**ЗАКАЛКА** — операция термической обработки, предназначенная для получения неравновесной структуры мартенсита высокой твердости и заключающаяся в нагреве стали выше критической температуры, выдержке при ней и последующем охлаждении со скоростью выше критической.

**ЗАКАЛКА С САМООТПУСКОМ** — поверхностная закалка изделия с кратковременным охлаждением в закалочной среде и последующим нагревом наружных слоев до температуры отпуска за счет тепла сердцевины.

**ЗЕРНО** — кристалл с правильным внутренним строением и искаженной внешней формой в поликристаллическом металле.

**КОМПОНЕНТ** — химический элемент, входящий в состав сплава.

**КРИВАЯ ОХЛАЖДЕНИЯ** — зависимость изменения температуры при охлаждении сплава данного состава от времени.

**КРИСТАЛЛ** — твердое тело, имеющее упорядоченное взаимное расположение образующих его частиц (атомов, ионов, молекул).

**КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ** — процесс фазового перехода металла из жидкого в твердое состояние.

**КРИСТАЛЛИТ** — монокристалл с неправильной внешней формой.

**КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ РЕШЕТКА** — присущее веществу в кристаллическом состоянии правильное расположение атомов (ионов, молекул), характеризующееся периодической повторяемостью в трех измерениях.

**КРИТИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ ЗАКАЛКИ ( $V_{кр}$ )** — наименьшая скорость охлаждения стали, при которой образуется мартенсит.

**КРИТИЧЕСКАЯ ТОЧКА (ТЕМПЕРАТУРА)** — температура сплава, при котором изменяется его фазовое состояние.

**ЛАТУНЬ** — сплав меди с цинком.

**ЛЕДЕБУРИТ (Л)** — эвтектическая смесь аустенита и цементита.

**МАКРОСТРУКТУРА** — структура металла, наблюдаемая при макроанализе.

**МАКРОШЛИФ (темплет)** — шлифованный и протравленный образец металла для исследования макроструктуры.

**МАКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ (МАКРОАНАЛИЗ)** — исследование строения металла невооруженным глазом или при небольших увеличениях (до 25 раз).

**МАРТЕНСИТ (М)** — пересыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе.

**МАРТЕНСИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ** — бездиффузионное превращение переохлажденного аустенита в мартенсит при очень быстром охлаждении стали.

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ** — наука, изучающая внутреннее строение и свойства материалов и устанавливающая связь между их химическим составом, строением и свойствами.

**МЕТАЛЛОГРАФИЯ** — раздел материаловедения, описывающий изменение структуры металлов и сплавов в зависимости от химического состава и условий их обработки.

**МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ** — наука, изучающая структуру и свойства металлов и устанавливающая связь между их химическим составом, структурой и свойствами.

**МЕТАЛЛИЗАЦИЯ** — диффузионное насыщение сталей металлами.

**МИКРОСКОПИЯ** — изучение структуры материалов при больших увеличениях с помощью микроскопов.

**Оптическая микроскопия** — изучение структуры материалов при увеличении с помощью оптических микроскопов

**Электронная микроскопия** — изучение структуры материалов при больших увеличениях с помощью электронных микроскопов.

**МИКРОСТРУКТУРА** — внутреннее строение металла, видимое при помощи оптического микроскопа.

**МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ (МИКРОАНАЛИЗ)** — исследование микроструктуры материалов при больших увеличениях

с помощью металлографических (50–2000 раз) или электронных (1000–500000 раз) микроскопов.

**МИКРОШЛИФ** — специально подготовленный образец с плоской зеркально полированной поверхностью для выявления микроструктуры.

**НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ** — поликристаллический материал с размерами кристаллов (зерен или частиц) менее 100 нм.

**НАНОСТРУКТУРА** — структура, имеющая составляющие с размерами менее 100 нм.

**НЕПОЛНАЯ ЗАКАЛКА** — закалка, при которой сталь нагревается до температуры выше  $A_{c1}$  на 30–50 °С, выдерживается при этой температуре и охлаждается со скоростью выше критической (для заэвтектоидных сталей), имеет структуру мартенсита и феррита.

**НИТРОЦЕМЕНТАЦИЯ** — одновременное насыщение сталей углеродом и азотом в газовых средах.

**НОРМАЛИЗАЦИЯ** — операция термической обработки, при которой стали, нагретые до определенных температур выше критических, охлаждаются на воздухе (структура равновесная, более мелкозернистая по сравнению со структурой, получаемой после отжига).

**ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЕ** — снижение содержания углерода в поверхностных слоях стальной детали при нагреве.

**ОБЪЕМНАЯ ЗАКАЛКА** — закалка стального изделия с пригревом по всему сечению.

**ОТЖИГ** — операция термической обработки с нагревом до определенных температур, выдержкой и с последующим медленным охлаждением, предназначенная для снижения твердости, повышения однородности структуры и снятия внутренних напряжений.

**ОТПУСК** — вид термической обработки, заключающейся в нагреве закаленного сплава ниже нижней критической точки, выдержке и последующем охлаждении.

**Низкий отпуск** — нагрев закаленной стали до температуры 150–200 °С, выдержка в течение 2,5–3,0 часов с последующим охлаждением на воздухе.

**Средний отпуск** — нагрев закаленной стали до температуры 300–500 °С, выдержка в течение 1,0–2,0 часов с последующим охлаждением на воздухе.

**Высокий отпуск** — нагрев закаленной стали до температуры 500–650 °С, выдержка в течение 0,5–1,0 часа с последующим охлаждением на воздухе.

**ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ (фазовая)** — нагрев сплава с неоднородной структурой выше температуры фазовых превращений с последующим медленным охлаждением для перевода сплава в более равновесное состояние.

**ПЕРЛИТ (П)** — эвтектоидная смесь феррита и цементита с твердостью 15...20 HRC.

**ПЕРЛИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ** — диффузионное превращение переохлажденного аустенита в перлит.

**ПОЛИМОРФИЗМ** — способность некоторых веществ в зависимости от температуры и давления существовать в состояниях с различными кристаллическими решетками.

**ПОЛНАЯ ЗАКАЛКА** — закалка, при которой сталь нагревается до температуры выше  $A_{c3}$  на 30–50 °С, выдерживается при этой температуре и охлаждается со скоростью выше критической (для доэвтектоидных и эвтектоидных сталей), имеет структуру мартенсита и остаточного аустенита.

**ПОВЕРХНОСТНАЯ ЗАКАЛКА** — нагрев поверхностного слоя стали выше критических точек с последующей закалкой.

**ПРОКАЛИВАЕМОСТЬ** — способность стали приобретать при закалке мартенситную структуру в слое определенной глубины.

**РАСКИСЛЕНИЕ** — процесс удаления из расплавленных металлов растворенного в них кислорода.

**САМООТПУСК** — отпуск за счет тепла, оставшегося в изделии после закалки.

**СИЛУМИН** — литейный сплав системы «алюминий – кремний».

**СКОРОСТЬ ОХЛАЖДЕНИЯ КРИТИЧЕСКАЯ ( $V_{кр}$ )** — минимальная скорость охлаждения, при которой весь аустенит переохлаждается до линии мартенситного превращения и превращается в мартенсит.

**СОРБИТ (С)** — ферритно-цементитная структура средней дисперсности с твердостью 30...35 HRC, обладающая высокой вязкостью, умеренной прочностью.

**СПЛАВ** — соединение двух или более компонентов, полученное сплавлением (спеканием).

**СТАЛЬ** — сплав железа с углеродом, содержащий от 0,02 до 2,14 % углерода, а также ряд других элементов.

**Высококачественная сталь** — сталь с низким содержанием вредных примесей (обычно фосфора не более 0,025 % и серы не более 0,025 %), обладающая повышенными механическими свойствами.

**Высокоуглеродистая сталь** — сталь, содержащая более 0,7 % углерода.

**Инструментальная сталь** — сталь, применяемая для обработки материалов резанием или давлением, а также для изготовления измерительного инструмента; обладает высокой твердостью, прочностью, износостойкостью.

**Качественная сталь** — сталь с регламентированным содержанием вредных примесей (обычно фосфора и серы не более 0,035 % каждого).

**Кипящая сталь** — сталь, раскисленная марганцем.

**Конструкционная сталь** — сталь, предназначенная для изготовления различных деталей машин, механизмов и конструкций в машиностроении, строительстве и обладающая необходимым комплексом механических, физических и химических свойств.

**Легирующая сталь** — сталь со специально введенным одним или более легирующим элементом.

**Низколегирующая сталь** — легирующая сталь, в которой сумма легирующих элементов не превышает 2,5 %.

**Низкоуглеродистая сталь** — углеродистая сталь с содержанием углерода до 0,25 %.

**Полуспокойная сталь** — сталь, полученная при раскислении жидкого металла марганцем и алюминием.

**Спокойная сталь** — сталь, раскисленная марганцем, кремнием и алюминием.

**Среднелегирующая сталь** — легирующая сталь, в которой сумма легирующих элементов составляет от 2,5 до 10,0 %.

**Среднеуглеродистая сталь** — углеродистая сталь, содержащая от 0,25 до 0,7 % углерода.

**Сталь пониженной прокаливаемости** — углеродистая сталь с малым содержанием примесей (менее 0,5 %) или небольшим количеством легирующих элементов, отличающаяся слабой прокаливаемостью.

**Сталь повышенной прокаливаемости** — сталь с содержанием легирующих элементов 1–3 %, которая прокаливается на глубину 80–100 мм.

**Углеродистая сталь** — сталь, не содержащая специально введенных легирующих элементов, кроме углерода.

**СТАРЕНИЕ** — технологическая операция, заключающаяся в нагреве закаленного сплава с целью повышения его механических свойств за счет образования упрочняющих фаз.

**СТЕПЕНЬ ПЕРЕГРЕВА** — разность между фактической температурой при нагревании вещества и температурой перехода вещества в другое агрегатное состояние (или кристаллическую модификацию).

**СТЕПЕНЬ ПЕРЕОХЛАЖДЕНИЯ** — разность между температурой перехода вещества в другое агрегатное состояние (или кристаллическую модификацию) и его фактической температурой при охлаждении.

**СТРУКТУРА** — внутреннее строение металла.

**СТРУКТУРНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ** — часть микроструктуры сплава, характеризующаяся одинаковым средним химическим составом и однообразным расположением и формой зерен образующих ее фаз.

**ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА (ТО)** — совокупность операций теплового воздействия на металлы и сплавы с целью изменения их структуры и свойств.

**ТЕОРИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ (ТТО)** — описание процессов формирования структур, а также структурного состояния сплавов при их термической обработке.

**ТРООСТИТ (Т)** — тонкодисперсная ферритно-цементитная структура с твердостью 40..45 HRC, обладающая высокой упругостью, достаточной прочностью и твердостью.

**ФАЗА** - однородная часть сплава (системы), имеющая одинаковый состав, свойства, кристаллическую решетку, ограниченная поверхностью раздела.

**ФЕРРИТ (Ф)** — твердый раствор внедрения углерода (С) в  $\alpha$ -железе —  $Fe_{\alpha}(C)$ .

**ФРАКТОГРАФИЯ** — изучение поверхностей излома материала после механического разрушения образца или детали под оптическим или электронным микроскопом.

**ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА (ХТО)** — химическое и термическое воздействия на стальное изделие с целью изменения химического состава, структуры и свойств поверхностных слоев.

**ЧУГУН** — сплав железа с углеродом, содержащий более 2,14 % углерода, постоянные примеси, а также ряд других элементов.

**Белый чугун** — чугун, в котором углерод находится в виде цементита в связанном состоянии.

**Высокопрочный чугун** — чугун, в котором углерод находится в виде графита шаровидной формы.

**Ковкий чугун** — чугун, в котором углерод находится в виде графита хлопьевидной формы.

**Литейный чугун** — чугун, который используется для получения отливок в литейном производстве.

**Половинчатый чугун** — чугун, в котором углерод находится в виде графита и цементита.

**Серый чугун** — чугун, в котором углерод находится в виде графита, в свободном состоянии.

**ЦЕМЕНТАЦИЯ (НАУГЛЕРОЖИВАНИЕ)** — насыщение низкоуглеродистых сталей углеродом.

**ЦЕМЕНТИТ (Ц)** — химическое соединение железа с углеродом  $Fe_3C$  (карбид железа) с твердостью до 800 НВ.

**ЦИАНИРОВАНИЕ** — одновременное насыщение сталей углеродом и азотом в жидких средах.

**ЭВТЕКТИКА** — механическая смесь двух (или более) видов кристаллов, одновременно закристаллизовавшихся из расплава при постоянной температуре.

**ЭВТЕКТОИД** — эвтектика, образующаяся при охлаждении твердого раствора.

## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МИКРОСТРУКТУРНОМ АНАЛИЗЕ

---

### 1.1. Характеристика микроанализа и области применения

Исследование внутреннего строения металлов и сплавов – их структуры осуществляется как прямыми, так и косвенными методами.

К *прямым методам* относятся:

1) исследование структуры невооруженным глазом или при небольших увеличениях до 25 раз (макроструктурный анализ);

2) исследование микроструктуры при помощи микроскопов со сравнительно большим увеличением (микроструктурный анализ):

– оптического микроскопа с увеличением до 1500–2000 раз для изучения строения зерен и фаз металлов и сплавов;

– электронного микроскопа с увеличением от 5000 до 800000 раз для выявления структуры металлов внутри зерна, которая неразличима для оптической микроскопии.

К *косвенным методам* исследований относят дилатометрический, магнитный, термический, электромагнитный и другие методы, которые необходимы для более подробного изучения металлов и сплавов.

**Макроскопический анализ** (макроанализ) заключается в изучении строения сплавов невооруженным глазом или при небольших увеличениях с помощью лупы, до 25 раз. 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 распределения зон кристаллизации, усадочных раковин, пористости, трещин и т. д.;

– химическую неоднородность, получаемую в процессе кристаллизации;

– неоднородность состава и структуры, созданной термической или химико-термической обработкой;

– строение металла после горячей обработки давлением (проката, штамповки,ковки и т. д.);

– характер излома металла или сплава.

**Микроструктурный анализ** (микроанализ) заключается в исследовании *микроструктуры* материалов при больших увеличениях с помощью металлографических или электронных микроскопов.

На электронных микроскопах изучают очень тонкие пленки или реплики, при помощи которых точно воспроизводят отпечаток микрорельефного строения приготовленного микрошлифа.

Техника микроанализа состоит из следующих этапов: отбор образцов металлов, приготовление шлифов, травление и исследование микрошлифов под микроскопом.

### 1.2. Методы оптической микроскопии

Исследование структуры металлов методами оптической (световой) микроскопии, предложенное П. П. Аносовым в 1831 году, широко используется для изучения их внутреннего строения и контроля качества. Это объясняется тем, что между структурой металла, видимой в оптическом микроскопе, и многими его свойствами существует определенная связь. Микроанализ позволяет во многих случаях выявить причины изменения свойств металлов и их сплавов в результате изменения химического состава и условий обработки.

Во многих случаях микроанализ проводят параллельно с макроанализом.

Методы оптической микроскопии позволяют определить:

1) характер строения металла или сплава в литых деталях или слитках, какой предварительной обработке они подвергались и т. п.;

2) фазовый состав и структуры сплавов в равновесных условиях;

3) количество и величину включений или зерен отдельных фаз, присутствующих в сплавах;

4) микроструктуры сплавов в неравновесном состоянии;

5) неоднородность состава и структуры, созданной термической или химико-термической обработкой.

Выбор увеличения при оптической микроскопии решается в зависимости от структуры сплавов. В некоторых случаях нецелесообразно применять большие увеличения; для других сплавов изучение структуры при большом увеличении является необходимым.



Как правило, микроанализ проводят сначала при небольшом увеличении, а затем — при больших увеличениях, просматривая ряд участков в зависимости от поставленной цели и строения исследуемой структуры.

Изучение образца целесообразно начинать с рассмотрения его в нетравленном виде.

Рассмотрение микрошлифа после полирования (до травления) при увеличении под микроскопом выявляет светлое поле, на котором иногда заметны темные участки (серые или черные). Эти участки являются неметаллическими включениями в виде шлаков, оксидов, сульфидов и т.д. При изучении нетравленного шлифа обнаруживается также *микropopистость* — дефект, встречающийся чаще всего в литых заготовках и ухудшающих их свойства. На нетравленных шлифах изучают также включения графита в серых чугунах. Если микрошлиф был приготовлен некачественно, то могут быть заметны царапины и другие дефекты его приготовления. Выявленные при микроанализе неметаллические включения, их размеры и форму, количество и характер распределения, например, в стали, оценивают по шкале баллов (ГОСТ 1778-70). Далее делают вывод о пригодности стали для изготовления определенных изделий.

Для дальнейшего исследования микроструктуры железоуглеродистых сплавов и выявления отдельных структурных составляющих проводят травление микрошлифа различными реактивами, неодинаково воздействующими на отдельные составляющие. Подобным же образом проводят изучение микроструктуры цветных металлов и их сплавов, выявление отдельных структурных составляющих путем рассмотрения под микроскопом протравленного микрошлифа.

При рассмотрении микрошлифа, например, из стали, после травления выявляется ее структура. При этом зерна различных фаз выглядят по-разному.

Зерна твердых растворов (феррит, аустенит) протравливаются равномерно. Луч света, падая на ровную поверхность зерна, отражается равномерно и, проходя в объектив, обеспечивает светлый вид зерен однофазной структуры. Границы между зернами имеют повышенное содержание примесей и травятся (растворяются) быстрее, вследствие чего образуются углубления (канавки). Свет, попадающий на них, будет частично рассеиваться, и в результате они будут выглядеть более темными.

В зернах, состоящих из неоднородных составляющих (двух или более фаз, например, механические смеси: перлит, ледебурит и т. п.),

сильнее всего растравливается граница между фазами. Поэтому при анализе перлита мы видим полосы феррита и цементита. При недостаточной разрешающей способности объектива или малом увеличении полосы в составе перлита не различаются, он выглядит темным.

Изучение протравленного шлифа при анализе микроструктуры позволяет решить ряд следующих задач:

- 1) определение размера зерна, кинетику его роста и склонность к росту;
- 2) определение структуры сплава в равновесном и неравновесном состояниях;
- 3) определение технологических параметров процессов термической обработки (температура нагрева, продолжительность выдержки);
- 4) наличие поверхностных упрочненных зон в стальной или чугунной детали, их толщину, примерное содержание насыщающего элемента (поверхностная закалка ТВЧ, химико-термическая обработка и др.).

Методами количественной металлографии с помощью окуляра-микрометра производится измерение, например, размеров зерна, диффузионного упрочненного слоя и т. д. Определив цену деления окуляра-микрометра при выбранном объективе, находят средний размер зерна — средний размер случайных сечений зерен в плоскости микрошлифа различными способами в соответствии с ГОСТ 5639-82.

Для оценки основных элементов микроструктуры сталей (перлита, мартенсита, троостита, карбидов, нитридов) путем визуального сравнения с эталонными шкалами используется ГОСТ 8233-56, который позволяет провести их всесторонний количественный металлографический анализ.

### 1.3. Металлографические микроскопы

Металлографический микроскоп позволяет рассматривать поверхность непрозрачных тел при увеличении в отраженном свете. По устройству различают микроскопы вертикальные и горизонтальные.

В настоящее время используются оптические (световые) микроскопы: МИМ-7, МИМ-8, ММУ-3, Neophot-21 и других моделей, в т. ч. оснащенные цифровыми фото- и видеокамерами с непосредственной передачей изображения на компьютер. Все эти микроскопы различных поколений сконструированы по одному базовому принципу: освещение объекта световым лучом и изучение его в отраженном

свете. Недостатком оптической микроскопии является предельное разрешение элементов структуры не более 0,2–0,3 мкм.

Металлографические оптические микроскопы предназначены для визуального наблюдения и фотографирования непрозрачных объектов в светлом поле при прямом освещении, в темном поле, при косом освещении и поляризованном свете при общем увеличении от 50 до 2000 раз. Основными характеристиками оптического микроскопа являются его разрешающая способность, полезное и общее увеличение.

**Разрешающая способность** микроскопа характеризуется минимальным расстоянием между двумя точками, при котором они различаются раздельно.

Разрешающая способность оптического микроскопа для белого цвета с учетом дифракции определяется уравнением:

$$d = \frac{\lambda}{2A} = \frac{0,6}{2 \cdot 0,95} \approx 0,3 \text{ мкм}, \quad (1)$$

где  $d$  — разрешающая способность, мкм;

$\lambda$  — длина световой волны в ангстремах (для белого света 0,6 мкм);

$A$  — числовая апертура объектива.

Числовая апертура объектива определяется уравнением:

$$A = h \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (2)$$

где  $h$  — коэффициент преломления среды между исследуемым предметом и объективом;

$\alpha$  — отверстие угол объектива.

Поскольку коэффициент преломления лучей света в воздухе  $h = 1$ , то наибольшее значение числовой апертуры при оптимальном значении отверстие угла объектива  $\alpha = 144^\circ$  будет:

$$A = h \cdot \sin \frac{\alpha}{2} = 1 \cdot 0,95 = 0,95.$$

**Общее увеличение** оптического микроскопа на практике определяется по формуле:

$$V_M = V_{ок} \cdot V_{об}, \quad (3)$$

где  $V_{ок}$  и  $V_{об}$  — увеличения окуляра и объектива соответственно.

Увеличение обозначается цифрой и крестиком, который ставится перед цифрой или позади нее в надстрочной позиции как показатель степени, цифра показывает во сколько раз увеличено изображение. Например:  $\times 100$  или  $100\times$ , что означает, что увеличение изображения структуры в 100 раз.

Наиболее используемым для учебных целей является металлографический микроскоп МИМ-7 (вертикальный) с увеличением от 60 до 1440 крат (рис. 1.1). Он состоит из следующих основных частей: оптической, осветительной, регистрирующей с фотографической аппаратурой и механической систем.

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

В осветительную систему микроскопа входят источник света, набор линз, светофильтров и диафрагм. Источником света является электрическая лампа, включаемая в сеть через понижающий трансформатор.

Механическая система включает устройства для макро- и микрофокусировки. Перемещение предметного столика в горизонтальных направлениях для просмотра всей поверхности шлифа проводится двумя винтами, расположенными на его боковой поверхности. Около этих винтов на столике нанесены шкалы отсчета с ценой деления 1 мм.

Четкость изображения структур достигается при правильном подборе (комбинации) увеличений объектива и окуляра. В таблице 1.1 содержатся характеристики объективов и окуляров МИМ-7 и их сочетание для получения необходимого увеличения.

Увеличения микроскопа МИМ-7

Объективы ( $F$ – фокусное расстояние; $A$ – числовая апертура)	Окуляры						
	При визуальном наблюдении				При фотографировании		
	7*	10*	15*	20*	7*	10*	15*
$F = 23,17; A = 0,17$	60	90	130	170	70	120	160
$F = 13,89; A = 0,30$	100	140	200	300	115	200	270
$F = 8,16; A = 0,37$	170	240	360	500	200	340	450
$F = 6,16; A = 0,65$	-	320	500	650	-	440	600
$F = 2,77; A = 1,25$	500	720	1080	1440	575	1000	1350

Металлографический микроскоп МИМ-8 горизонтального типа имеет оптическую систему с увеличением при визуальном наблюдении от  $\times 100$  до  $\times 1350$  и от  $\times 45$  до  $\times 2000$  — при фотографировании.

В БГАТУ микроскоп МИМ-8 оборудован специализированной цифровой видеокамерой «DCM310», работающей совместно с персональным компьютером. Кроме того, он оснащен многофункциональным спектральным телевизионным комплексом компьютерной микроскопии «Контраст-2005 ИМС-У», включающим спектральный осветитель высокого контраста ОС-16 ЦОМ с устройством управления режимами осветителя (рис. 1.2). Модернизированный микроскоп позволяет выполнять количественный анализ микроструктур различных металлов и сплавов.



Рис. 1.1. Общий вид микроскопа МИМ-7



Рис. 1.2. Общий вид модернизированного микроскопа МИМ-8

Четкость изображения структур достигается подбором увеличений используемых объективов с учетом разрешающей способности экрана дисплея. Увеличение микрообъектов, наблюдаемое на экране дисплея, приведено в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Увеличения модернизированного микроскопа МИМ-8  
при расширении экрана дисплея 1204×768

Объективы ( $F$ – фокусное расстояние; $A$ – числовая апертура)	Увеличение
$F = 4,3; A = 0,95$	×1430
$F = 6,2; A = 0,65$	×1000
$F = 8,4; A = 0,65$	×740
$F = 13,9; A = 0,30$	×440
$F = 15,7; A = 0,30$	×400
$F = 23,7; A = 0,17$	×260

На рисунке 1.3 представлен современный оптический микроскоп модели «Микро-200» белорусского производства фирмы «Планар», обеспечивающий увеличение до  $\times 2000$  и оснащенный компьютерным комплексом для проведения автоматизированного количественного микроанализа металлов.



Рис. 1.3. Микроскоп «Микро-2000» фирмы «Планар»

Для удобства рассмотрения структур и количественной оценки размеров структурных составляющих на фотографиях микроструктур компьютерным способом ставится линейка, соответствующая определенному увеличению.

#### 1.4. Приготовление микрошлифов

Для микроструктурного метода исследований необходимо приготовить образец исследуемого металла. *Микрошлифом* называется образец металла, поверхность которого специально подготовлена для микроанализа.

Подготовка микрошлифа состоит в получении плоского среза в нужном месте поверхности образца металла. Заготовку для микрошлифа отрезают ножовкой или зачищают плоский участок на наждачном круге.

Материалы, обладающие большей твердостью, разрезают вулканитовыми, карборундовыми, алмазными кругами или электроэрозионным способом. При этом образец не должен разогреваться, так как значительный нагрев может вызывать изменение структуры. Затем производится грубая шлифовка в три перехода на наждачных шкурках с номером зерна 63–50, 40–28 и 25–12 (ГОСТ 13344-79). *Шлифовка* ведется до исчезновения рисок от предыдущей обработки. Для этого при переходе на шлифовальную шкурку с меньшим номером зерна образец поворачивают на  $90^\circ$ . Тонкая шлифовка ведется в два перехода последовательно на микрошкурках M28–M20 и M14–M10. После этого образец шлифуют алмазной пастой.

**Полировка** производится на вращающемся фетровом круге. Поверхность фетра периодически смачивается суспензией абразива. В качестве абразива используются оксид хрома или оксид алюминия. Полировка ведется до исчезновения рисок, видимых под микроскопом при увеличении в  $\times 100$ .

После полировки микрошлиф промывается в струе проточной воды и обезжиривается спиртом (смачиванием поверхности микрошлифа тампоном). Промытый и обезжиренный микрошлиф сушится фильтровальной бумагой. Полученная поверхность микрошлифа должна быть идеально чистой, без признаков загрязнения и следов влаги.

## 1.5. Травление микрошлифов

Травление микрошлифов сталей и чугунов, в основном, производится четырехпроцентным раствором азотной кислоты в этиловом спирте погружением или смачиванием тампоном, втиранием. Длительность травления составляет от 5 до 30 с. После травления производится промывка водой, а затем сушка фильтровальной бумагой. Степень травления определяется визуально до равномерного потускнения поверхности.

Основные виды реактивов, применяемых для травления железоуглеродистых сплавов, приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Реактивы для травления микрошлифов железа и его сплавов		
Наименование	Состав	Применение
Спиртовой раствор азотной кислоты	Азотная кислота (плотность 1,4), 1–5 мл; этиловый спирт, 100 мл	Окрашивает перлит в темный цвет, выявляет границы зерен феррита, структуры мартенсита и продуктов отпуска
Царская водка	Соляная кислота (плотность 1,19), 3 части; азотная кислота (плотность 1,4), 1 часть	Выявляет структуры нержавеющей сталей и сплавов
Спиртовой раствор пикриновой кислоты	Пикриновая кислота кристаллическая, 4 г; этиловый спирт 100 мл	Выявляет структуры азотированной и цементованной стали. Скорость травления возрастает с увеличением содержания количества азотной кислоты
Раствор азотной и соляной кислот в глицерине	Азотная кислота (плотность 1,4), 10 мл; соляная кислота (плотность 1,19), 20–30мл; глицерин, 30 мл	Выявляет структуры быстрорежущей, высокохромистой и аустенитной марганцевистой сталей после закалки с попеременным травлением и полированием

Травление микрошлифов алюминия и его сплавов в основном производится реактивом Келлера погружением или смачиванием тампоном. Длительность травления составляет от 5 до 20 с. После травления производится промывка их водой, а затем сушка фильтровальной бумагой с визуальным контролем до равномерного потускнения поверхности.

Травление микрошлифов меди и ее сплавов, в основном, производится реактивами на основе различных солей погружением или смачиванием тампоном. Длительность травления составляет от 5 до 20 с.

Основные составы травителей, применяемых для травления цветных металлов и их сплавов, приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4

Реактивы для травления микрошлифов цветных металлов и сплавов		
Наименование	Состав	Применение
Спиртовой раствор плавиковой кислоты	Плавиковая кислота (плотность 1,6), 1–1,5 мл; этиловый спирт, 100 мл	Выявляет границы зерен $\alpha$ -твердого раствора в алюминиевых сплавах, структуры эвтектического и первичного кремния в силуминах
Раствор хлорида меди в аммиаке	$\text{CuCl}_2$ , 4 г; $\text{NH}_4\text{OH}$ , 50 мл	Выявляет границы зерен в медных сплавах
Раствор хлорида железа в соляной кислоте	$\text{FeCl}_2$ (насыщенный раствор в воде), 15 мл; $\text{H}_2\text{O}$ , 30 мл; $\text{HCl}$ , 30 мл	Выявляет границы зерен в медных сплавах
Раствор хромпика в серной кислоте	$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ , 2 г; $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 8 мл; $\text{NaCl}$ (насыщенный раствор в воде), 4 мл	Выявляет границы зерен в медных сплавах

## 1.6. Электронная микроскопия

**Электронный микроскоп (ЭМ)** — прибор, позволяющий получать изображение объектов с максимальным увеличением до  $10^6$  раз благодаря использованию вместо светового потока пучка электронов с энергиями  $30\div 200$  КэВ и более. Разрешающая способность ЭМ в  $1000\div 10000$  раз превосходит разрешение оптического микроскопа, для лучших современных приборов может составлять несколько наномет-

ров (1 нанометр =  $10^{-9}$  м). Для получения изображения в электронном микроскопе используются специальные магнитные линзы, управляющие движением электронов.

Появление электронного микроскопа стало возможным после ряда физических открытий конца XIX — начала XX веков: открытия электрона (Дж. Томсон в 1897 году) и обнаружение волновых свойств электрона (К. Дэвиссон, Л. Гермер в 1926 году). В 1926 году немецкий физик Х. Буш создал магнитную линзу, позволяющую фокусировать электронные лучи, что послужило предпосылкой для создания первого электронного микроскопа.

Наиболее широкое распространение в настоящее время получили *просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ)* и *растровый электронный микроскоп (РЭМ)*.

Использование просвечивающего электронного микроскопа для научных исследований было начато в конце 30-х годов XX века с созданием первого прибора фирмы «Siemens» (Германия).

В конце 1930-х — начале 1940-х годов появились первые растровые электронные микроскопы, формирующие изображение объекта при последовательном перемещении электронного зонда малого сечения по объекту. Массовое применение этих приборов в научных исследованиях началось в 60-х годах, когда они достигли значительного технического совершенства.

*Просвечивающий электронный микроскоп* — это прибор, в котором изображение от ультратонкого объекта (толщиной порядка 0,1 мкм) формируется в результате взаимодействия пучка электронов с веществом образца с последующим увеличением магнитными линзами (объектив) и регистрацией на флуоресцентном экране.

Теоретически максимально возможное разрешение в оптическом микроскопе ограничено длиной волны фотонов (видимый свет), используемых для освещения образца, и угловой апертурой оптической системы. Для преодоления ограничений относительно большой длины волны видимого света (400–700 нанометров) было предложено использование электронного пучка. Электроны имеют волновые и корпускулярные свойства (установлено Луи де Бройлем). Их волновые свойства означают, что электронный пучок может вести себя подобно лучу электромагнитного излучения. Электроны эмитируются в электронном микроскопе посредством термоэлектронной эмиссии из нити накаливания (вольфрамовая проволока) как в обычной лампе накаливания, либо посредством полевой эмиссии. Затем электроны ускоряются высокой разностью потенциалов и фокусируются на образце электромагнитными (или реже — электростатическими) линзами. Прощедший через образец луч содержит информацию об электронной

плотности, фазе и периодичности, которые используются при формировании изображения. Примеры субструктур углеродистой стали при разном увеличении приведены на рисунке 1.4.

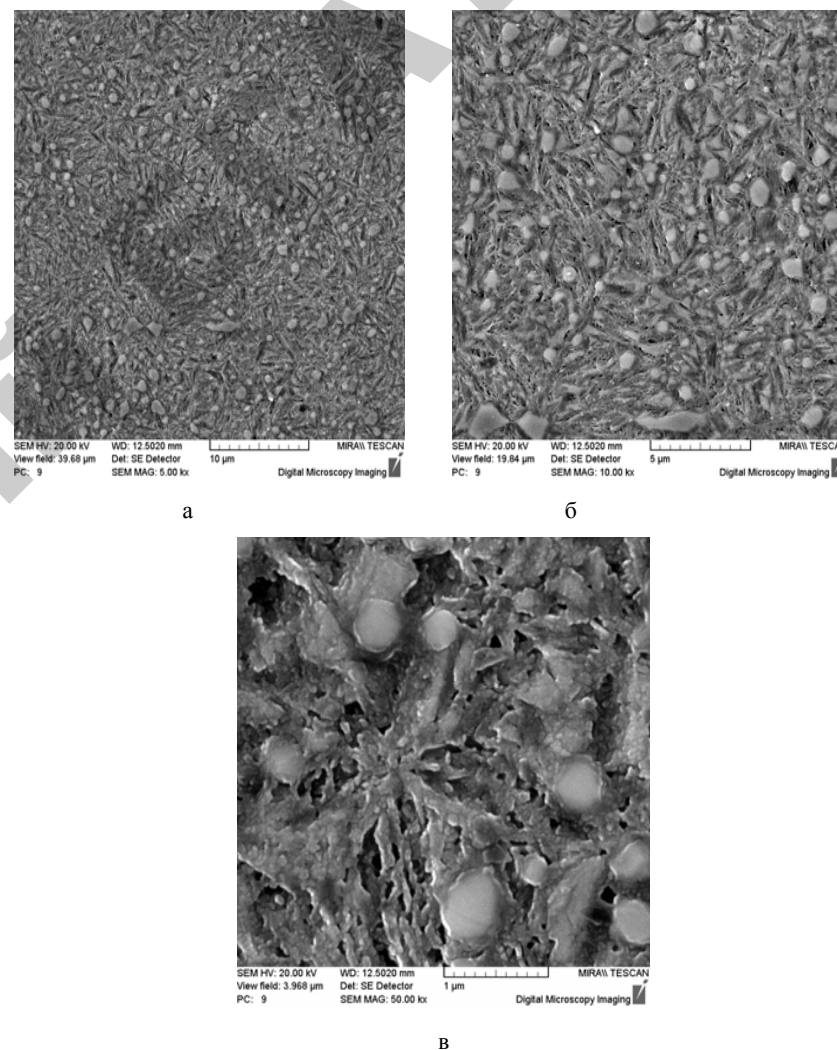


Рис. 1.4. Изображения микроструктур мелкоигльчатого мартенсита, полученных на ПЭМ, в закаленной углеродистой стали при увеличении: а)  $\times 5000$ ; б)  $\times 10000$ ; в)  $\times 50000$

*Растровый электронный микроскоп* (англ. *Scanning Electron Microscope, SEM*) — прибор, основанный на принципе взаимодействия электронного пучка с веществом, предназначенный для получения изображения поверхности объекта с высоким пространственным разрешением (несколько нанометров), а также информации о составе, строении и некоторых других свойствах приповерхностных слоев.

Принцип работы РЭМ заключается в сканировании поверхности образца сфокусированным электронным пучком, анализе отраженных от поверхности электронов и рентгеновского излучения, возникающего в результате взаимодействия электронов с веществом. Пучок электронов, отраженных поверхностью образца, позволяет получать информацию о рельефе поверхности и кристаллической структуре приповерхностных слоев. Анализ рентгеновского излучения, возникающего в процессе взаимодействия пучка электронов с образцом, дает возможность качественно и количественно охарактеризовать химический состав приповерхностных слоев.

Современный РЭМ позволяет работать в широком диапазоне увеличений приблизительно от  $\times 10$  (эквивалентно увеличению сильной ручной линзы) до  $\times 1000000$ , что приблизительно в 500 раз превышает предел увеличения лучших оптических микроскопов.

Сегодня возможности растровой электронной микроскопии используются практически во всех областях науки и промышленности — от биологии до наук о материалах. Примеры структуры поверхности различных объектов, полученных при помощи РЭМ, приведены на рисунке 1.5.

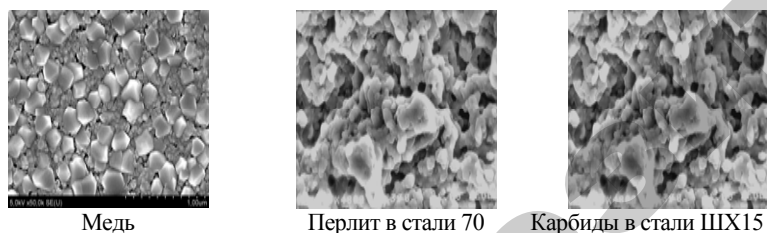


Рис. 1.5. Изображения структур, полученных на РЭМ при увеличении  $\times 20000$

## 2. МИКРОСТРУКТУРЫ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ В РАВНОВЕСНОМ СОСТОЯНИИ

### 2.1. Структурные составляющие

В железоуглеродистых сплавах в твердом состоянии при нагревании и охлаждении образуются следующие структурные составляющие: твердые растворы, химические соединения и механические смеси.

Основные структурные составляющие в углеродистых сталях: феррит, аустенит, цементит, перлит.

В сталях углерод может находиться в виде химического соединения — *цементита*.

С помощью диаграммы состояния объясняют превращения в углеродистых сталях и белых чугунах и осуществляют выбор оптимальных режимов термической обработки.

#### *Твердые растворы*

*Феррит* ( $\Phi$ ) — твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железе. Максимальное содержание углерода — 0,02 % при температуре 727 °С. При комнатной температуре содержание углерода в феррите составляет 0,006 %.

Микроструктура феррита состоит из светлых зерен (рис. 2.1). Феррит — мягкая, пластичная структура со следующими механическими свойствами:  $\sigma_s = 250$  МПа;  $HB = 800$  МПа;  $\delta = 40$  %.

*Аустенит* ( $A$ ) — твердый раствор внедрения углерода в  $\gamma$ -железе. Максимальное содержание углерода — 2,14 % при температуре равной 1147 °С. Аустенит существует выше температуры 727 °С. Ниже 727 °С аустенит распадается на механи-

ческую смесь феррита и цементита. Микроструктура аустенита состоит из светлых зерен многоугольной формы с характерными двойниками внутри (рис. 2.2). Аустенит тверже и прочнее феррита,  $\sigma_s = 600$  МПа;  $HB = 1800\text{--}2000$  МПа.

### **Химическое соединение**

*Цементит (Ц)* — химическое соединение  $Fe_3C$  (карбид железа). Цементит содержит 6,67 % углерода. Цементит имеет белый цвет и при травлении обычным реактивом слабо вытравливается ввиду большей химической стойкости, чем у феррита. Наблюдается в виде пластинок, располагающихся вокруг зерен феррита, в виде игл или в форме отдельных выделений (например, в белых чугунах, рис. 3.2–3.4). Эта фаза очень твердая и хрупкая:  $HB = 8000$  МПа;  $\delta = 0$  %.

### **Механическая смесь**

*Перлит (П)* — механическая эвтектоидная смесь феррита и цементита ( $\Phi + Ц$ ), которая формируется в результате эвтектоидного распада аустенита при постоянной температуре  $727$  °С. Содержание углерода в перлите — 0,8 %. Эта структурная составляющая наблюдается при небольших увеличениях ( $\times 200$ ) в виде темных зерен. Различают пластинчатый перлит, представляющий собой пластинки феррита и цементита (рис. 2.3), и зернистый перлит — округлые зернышки цементита в зернах феррита (рис. 2.8, 2.10). Механические свойства перлита:  $\sigma_s = 650$  МПа;  $HB = 2000$  МПа;  $\delta = 16\text{--}20$  %.

## **2.2. Микроструктуры углеродистых сталей**

Микроструктуры технически чистого железа и углеродистых сталей в равновесном состоянии характеризуются левой нижней частью диаграммы состояния сплавов системы «железо – цементит». Сплавы с содержанием до 0,02 % углерода относятся к технически чистому железу, от 0,02 до 0,8 % С — к доэвтектоидным сталям, с содержанием 0,8 % С — к эвтектоид-

ной стали, с содержанием от 0,8 до 2 % С — к заэвтектоидным сталям.

Микроструктура технически чистого железа состоит из зерен феррита (рис. 2.1).

Микроструктура доэвтектоидной стали в равновесном состоянии состоит из феррита и перлита (рис. 2.4–2.7). В доэвтектоидной стали после травления феррит выявляется в виде светлых зерен, а перлит — в виде темных зерен полосчатого строения. С увеличением содержания углерода количество перлита возрастает.

Микроструктура эвтектоидной стали, состоит только из перлита (рис. 2.8).

Заэвтектоидная сталь имеет микроструктуру, состоящую из перлита и вторичного цементита (рис. 2.9). В результате медленного охлаждения образуются темные зерна перлита и светлая блестящая сетка цементита, вокруг перлитных зерен. Чем больше углерода в заэвтектоидной стали, тем более широкой получается цементитная сетка.

Механические свойства стали зависят от формы и размера цементитных включений. Можно добиться образования зернистого перлита специальным отжигом. Зернистый перлит (рис. 2.10) может быть получен как для эвтектоидной, так и для заэвтектоидной сталей.

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



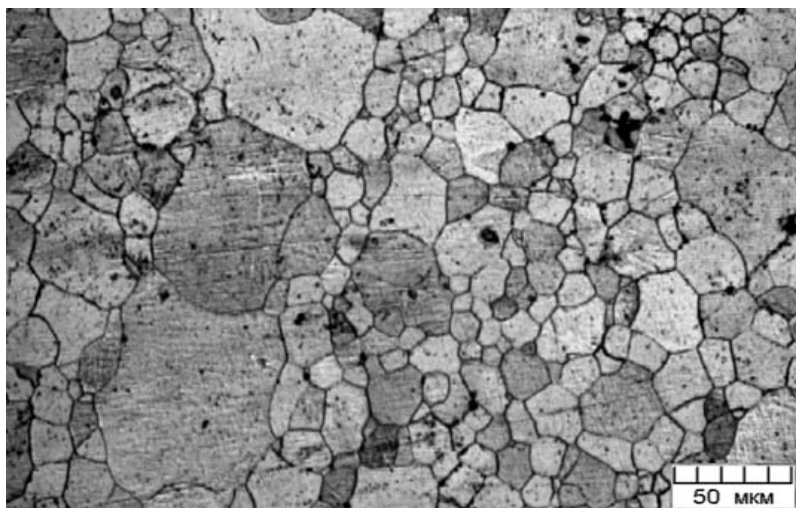


Рис. 2.1. Микроструктура феррита в технически чистом железе

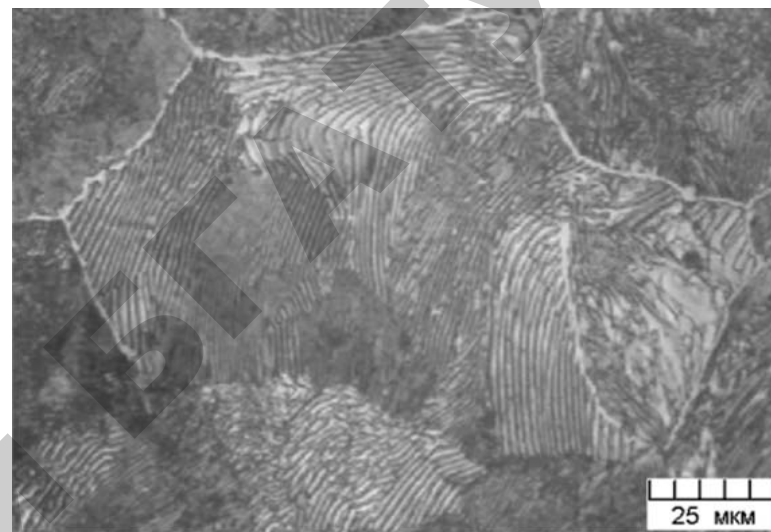


Рис. 2.3. Микроструктура пластинчатого перлита в стали с содержанием 0,8 % углерода

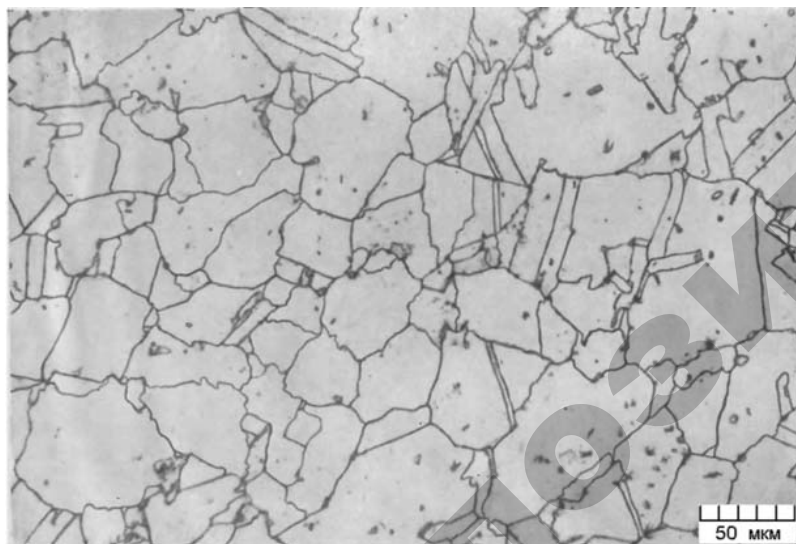


Рис. 2.2. Микроструктура аустенита в стали после отжига

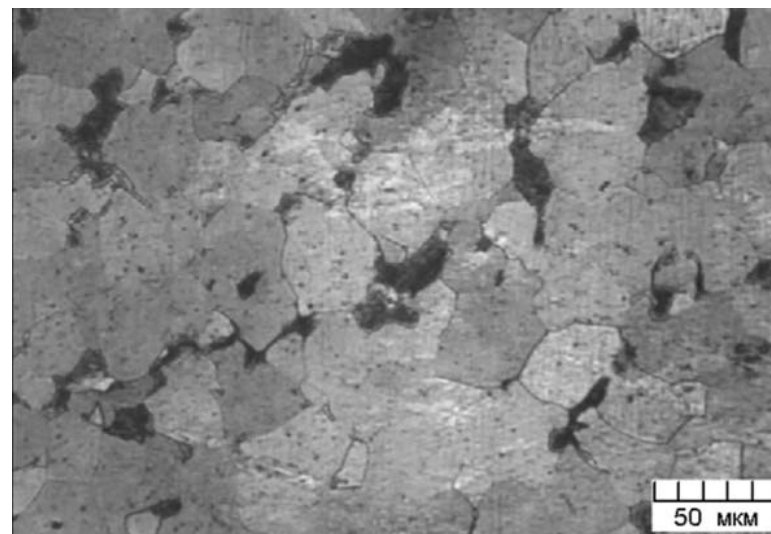


Рис. 2.4. Микроструктура доэвтектоидной стали 15 с содержанием углерода 0,15%. Феррит – светлые участки; перлит – темные участки

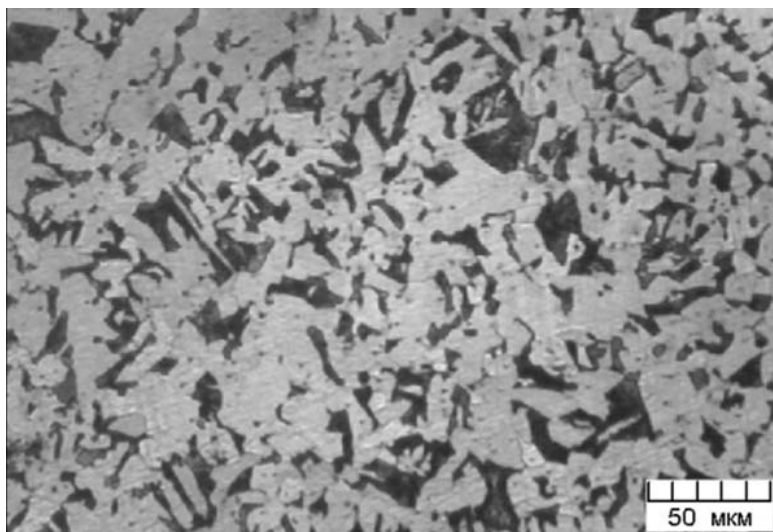


Рис. 2.5. Микроструктура доэвтектоидной стали 30 с содержанием углерода 0,30 %. Феррит – светлые участки; перлит – темные участки

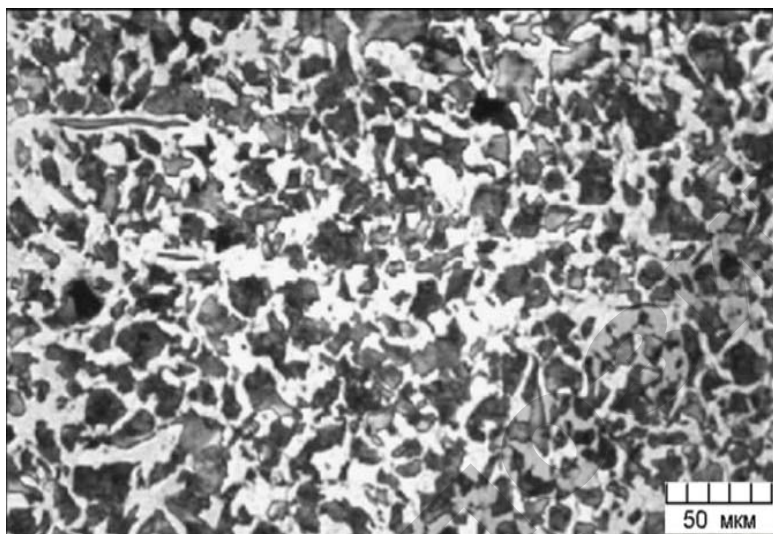


Рис. 2.6. Микроструктура доэвтектоидной стали 45 с содержанием углерода 0,45 %. Феррит – светлые участки; перлит – темные участки

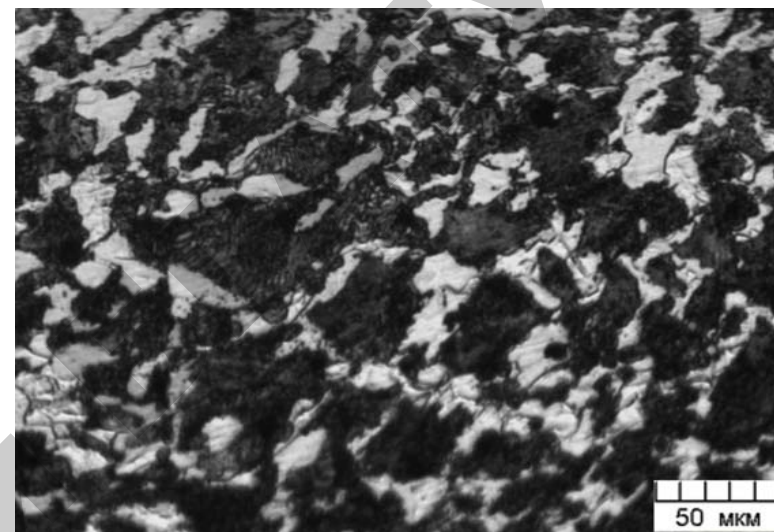


Рис. 2.7. Микроструктура доэвтектоидной стали 60 с содержанием углерода 0,60 %. Феррит – светлые участки; перлит – темные участки



Рис. 2.8. Микроструктура эвтектоидной стали У8 с содержанием углерода 0,8 % после отжига. Структура – зернистый перлит



Рис. 2.9. Микроструктура заэвтектоидной стали У10 с содержанием углерода 1,0% после нормализации. Перлит пластинчатый и цементит вторичный в виде тонкой сетки

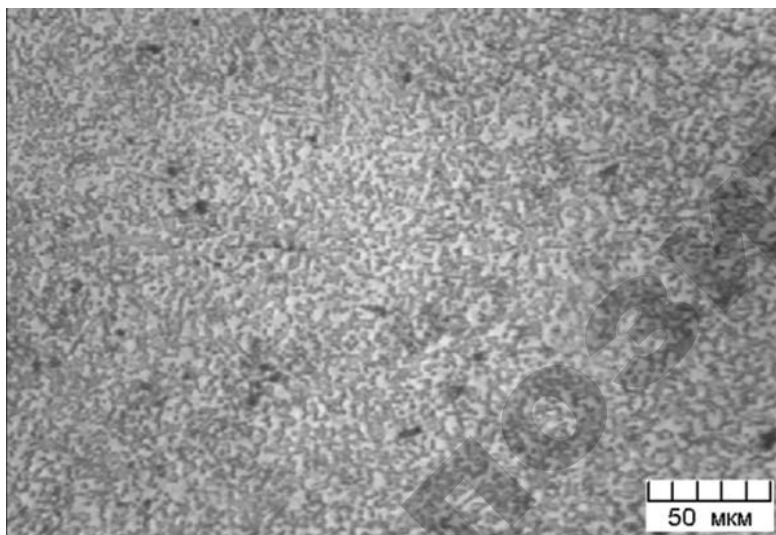


Рис. 2.10. Микроструктура заэвтектоидной стали У10 с содержанием углерода 1,0% после отжига. Структура – зернистый перлит

### 3. МИКРОСТРУКТУРЫ ЧУГУНОВ В РАВНОВЕСНОМ СОСТОЯНИИ

#### 3.1. Структурные составляющие чугунов

Чугуны в зависимости от того, в каком виде присутствует углерод, разделяют на: *белые* — углерод находится в связанном состоянии (в виде химического соединения цементита  $Fe_3C$ ); *серые* — углерод находится в свободном состоянии (в виде элементарного графита); *половинчатые* (отбеленные) — углерод может быть в виде графита и цементита.

В белых чугунах существуют те же структурные составляющие, что и в углеродистых сталях (аустенит, феррит, цементит, перлит), приведенные в разделе 2, и ледебурит. Для их описания также используется метастабильная диаграмма состояния «железо – цементит».

Серые чугуны характеризуются стабильной диаграммой состояния «железо – углерод». Их основные структурные составляющие при комнатной температуре: феррит, графит, перлит и ледебурит.

На структурообразование чугуна влияет скорость охлаждения и количество легирующих элементов, способствующих *графитизации* — процессу образования графитных включений.

*Графит (Gr)* — кристаллическая модификация углерода, имеющая гексагональную решетку. Графит обладает очень низкими твердостью, прочностью, пластичностью. Плотность —  $2,2 \text{ г/см}^3$ , температура плавления —  $3800 \text{ }^\circ\text{C}$ . Он образуется в высокоуглеродистых сплавах при малых скоростях охлаждения.

Графит может иметь пластинчатую (лепестковую), вермикулярную шаровидную или хлопьевидную формы (рис. 3.1). Самые низкие механические свойства у чугунов с пластинчатой формой графита.

Серые чугуны по форме включений графита подразделяют на *серый* обычный с пластинчатым графитом (СЧ), *высокопрочный* с шаровидным графитом (ВЧ), *ковкий* с хлопьевидным графитом (КЧ) и чугуны с вермикулярным графитом (ЧВГ).

### *Механические смеси*

*Перлит (П)* — механическая смесь феррита и цементита или феррита и графита, в зависимости от состояния углерода.

Первый тип перлита — механическая эвтектоидная смесь феррита и цементита ( $\Phi + \text{Ц}$ ), которая формируется в результате эвтектоидного распада аустенита при постоянной температуре  $727^\circ\text{C}$ , содержание углерода в перлите — 0,8 %. Характерен для сталей и белых чугунов.

Второй тип перлита — механическая эвтектоидная смесь феррита и графита ( $\Phi + \text{Гр}$ ), которая кристаллизуется из аустенита при постоянной температуре  $738^\circ\text{C}$ , содержание углерода в ней — 0,7 %. Микроструктура представляет собой равномерно распределенные включения графита в ферритной основе серого цвета.

*Ледебурит (Л)* — механическая смесь аустенита и цементита или аустенита и графита, в зависимости от состояния углерода.

Первый тип ледебурита — механическая смесь аустенита и цементита ( $\text{А} + \text{Ц}$ ), которая кристаллизуется из жидкого сплава с концентрацией 4,3 % углерода при постоянной температуре  $1147^\circ\text{C}$ . Она состоит из аустенита и цементита при температуре выше  $\text{A}_1$ , а ниже  $\text{A}_1$  — из перлита и цементита (рис. 3.3). Ледебурит имеет грубую структуру, в которой на светлом поле цементита расположены серые зерна перлита овальной формы. Ледебурит — эвтектическая смесь, твердая и хрупкая:  $HV = 5000\text{--}6000$  МПа;  $\delta = 1\text{--}2\%$ .

Второй тип ледебурита — графитная эвтектика, т. е. механическая смесь аустенита и графита ( $\text{А} + \text{Гр}$ ), которая кристаллизуется из жидкого сплава с концентрацией 4,26 % при постоянной температуре  $1153^\circ\text{C}$ . Она состоит из аустенита и графита при температуре выше  $\text{A}_1$ , а ниже  $\text{A}_1$  — из перлита и графита, имеет более высокую прочность, чем перлит. При микроструктурном анализе выявляется в форме зерен, у которых на светлом поле феррита расположены серые включения зерен перлита.

## 3.2. Микроструктуры чугунов

Белые чугуны по структуре подразделяются на доэвтектические (рис. 3.2, перлит + цементит + ледебурит), эвтектические (рис. 3.3, ледебурит), заэвтектические (рис. 3.4, цементит + ледебурит). Процесс структурообразования при кристаллизации эвтектического и заэвтектического чугуна начинается с формирования крупных пластин первичного цементита.

В серых чугунах графитовые включения находятся в металлической основе (матрице). Их можно рассмотреть до травления микрошлифов (рис. 3.1). После травления микроструктура матрицы может быть ферритной, ферритно-перлитной, перлитной в зависимости от содержания углерода и условий кристаллизации отливок (рис. 3.5, 3.6).

*Серый обычный чугун* имеет графитные включения пластинчатой формы. Из-за меньшей в сравнении со сталью температуры плавления и наличием в структуре графита, он обладает лучшими литейными свойствами. Он имеет хорошую жидкотекучесть и малую усадку.

Механические свойства чугуна определяются количественным соотношением структурных составляющих, главным образом, феррита, перлита и графита. 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 чугун с пластинчатым графитом имеет очень низкую пластичность, которая практически не зависит от характера металлической основы. Чугун с перлитной основой (рис. 3.5) более прочен и износостойчив. Феррит несколько снижает механические свойства серого чугуна, особенно его твердость и износостойкость.

Серый обычный чугун является основным конструкционным материалом для изготовления базовых отливок, работающих в условиях знакопеременных нагрузок и вибраций.

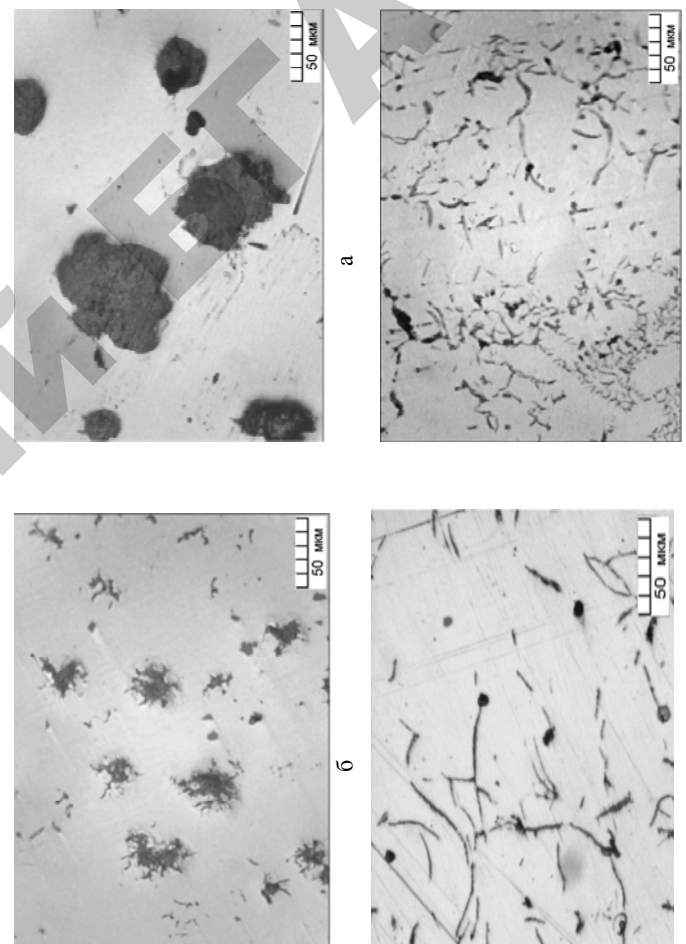
В структуре серого чугуна возможно образование большого числа мелких, очень твердых включений цементита (рис. 3.7), которые снижают его обрабатываемость резанием. Крупные выделения цементита делают чугун еще более твердым и препятствуют обработке резанием. Такие чугуны называют *половинчатыми*.

*Высокопрочным* является чугун с шаровидной формой графита (рис. 3.8). Его получают введением в жидкий расплав обычного чугуна модификаторов (*Mg, Ce, Li* и др.). Матрица высокопрочного чугуна может быть ферритной, ферритно-перлитной и перлитной (рис. 3.9, 3.10).

Ферритные чугуны характеризуются умеренной прочностью и высокой пластичностью. Ферритно-перлитные чугуны имеют более высокую прочность, но существенно меньшую пластичность. Требуемые свойства чугунов этих двух классов получают непосредственно в литом состоянии без термической обработки. Перлитные чугуны при значительно более высокой прочности имеют практически равную пластичность.

*Ковкий* чугун с хлопьевидным или компактным графитом (рис. 3.11) получают путем отжига белого чугуна определенного химического состава. Матрица может быть перлитная, ферритная, перлито-ферритная. Наименьшей прочностью и более высокой пластичностью обладают ковкие чугуны с ферритной основой (рис. 3.12). Рекомендуемый химический состав ковких чугунов отличается пониженным содержанием графитизирующих элементов, углерода (2,4...2,9 %) и кремния (1,0...1,6 %). Это объясняется необходимостью получения в литом состоянии полностью отбеленного чугуна по всему сечению отливки.

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



а – шаровидная; б – хлопьевидная; в – вермикулярная; г – пластинчатая  
Рис. 3.1. Формы графита в серых чугунах (до травления)

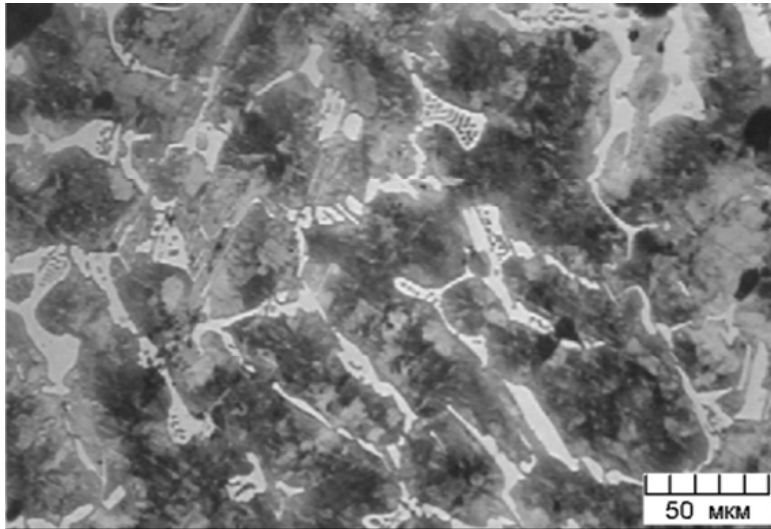


Рис. 3.2. Микроструктура доэвтектического белого чугуна. Структура: перлит – темные включения; цементит – светлые включения; ледебурит – зерна в крапинку

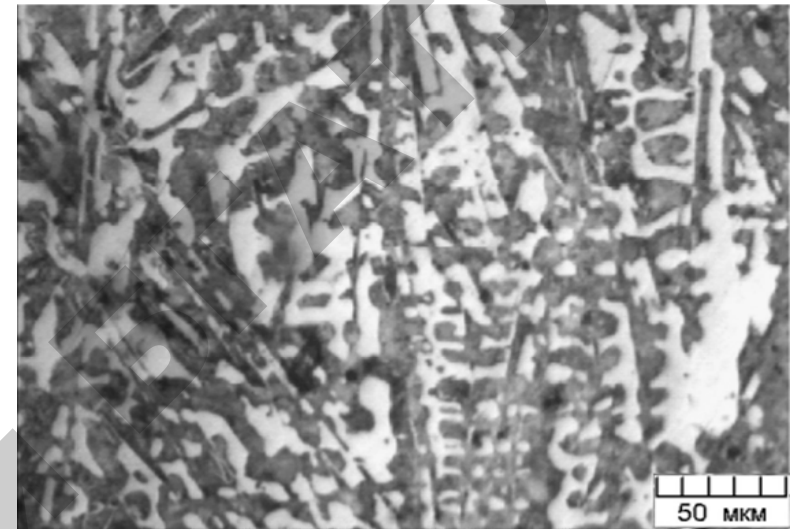


Рис. 3.4. Микроструктура заэвтектического белого чугуна. Структура – ледебурит и цементит первичный (крупные пластинки)

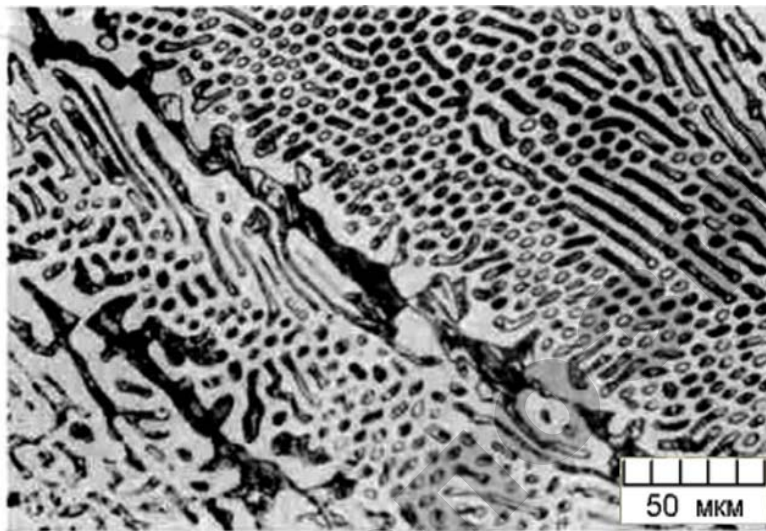


Рис. 3.3. Микроструктура эвтектического белого чугуна. Структура – ледебурит

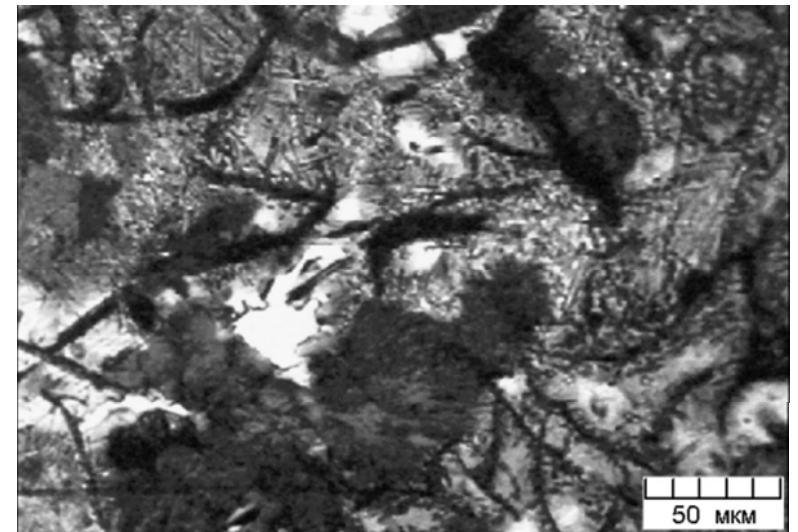


Рис. 3.5. Микроструктура серого ферритно-перлитного чугуна СЧ20 после травления. Графит – черные пластинки, перлит (серые зерна) и феррит (светлые зерна)

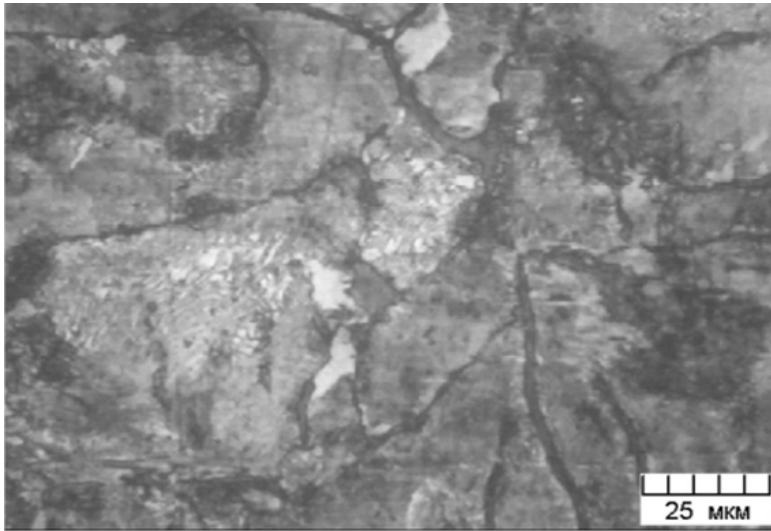


Рис. 3.6. Микроструктура перлитного серого чугуна СЧ30 после травления.  
Графит – черные пластинки на сером фоне перлита.



Рис. 3.7. Микроструктура половинчатого чугуна после травления.  
Графит – черные пластинки, перлит и цементит (белые пластинки)

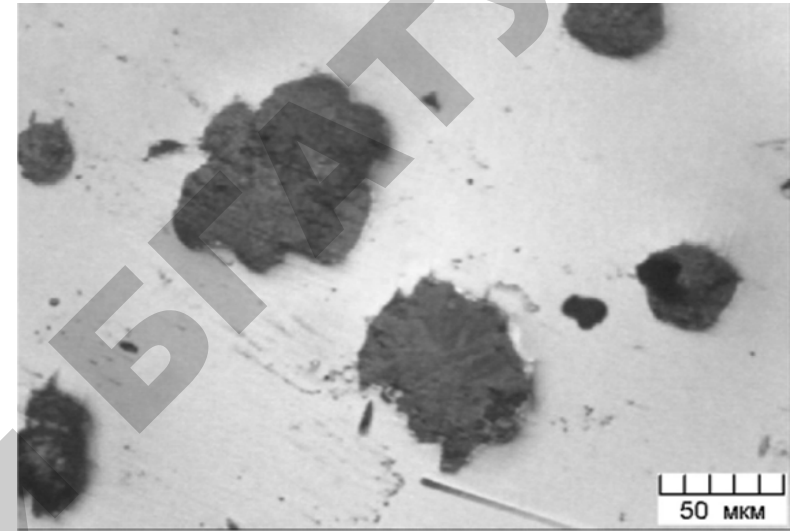


Рис. 3.8. Микроструктура высокопрочного чугуна до травления.  
Графит шаровидный и металлическая основа

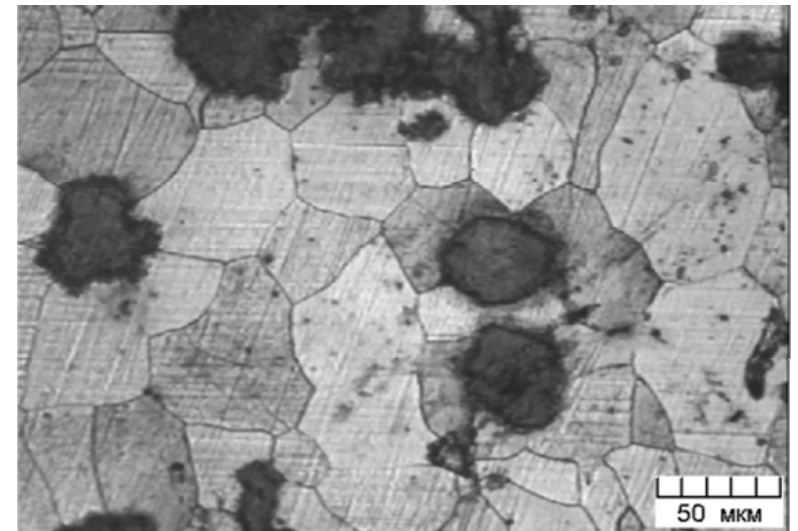
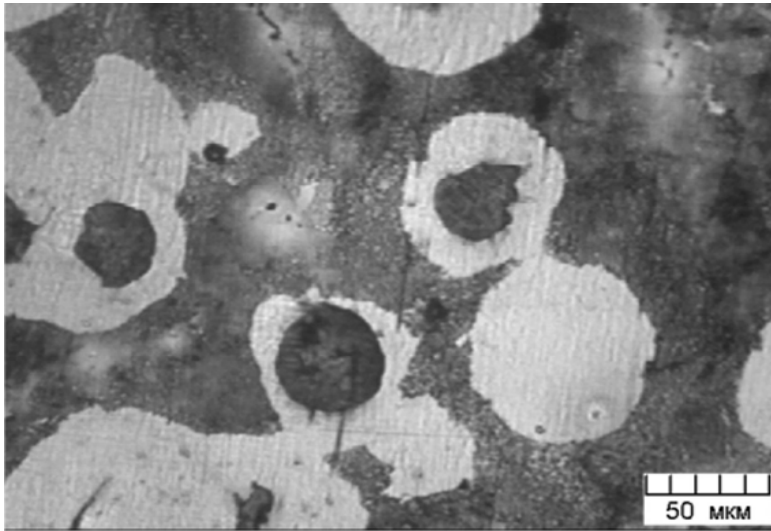
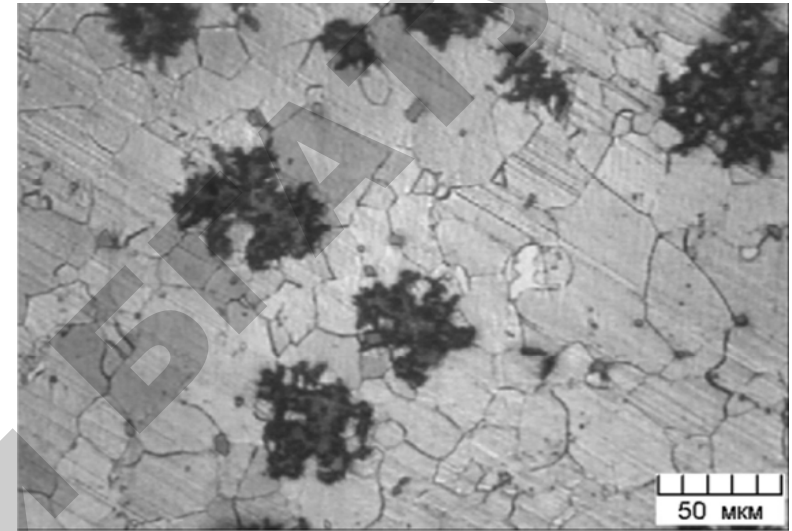


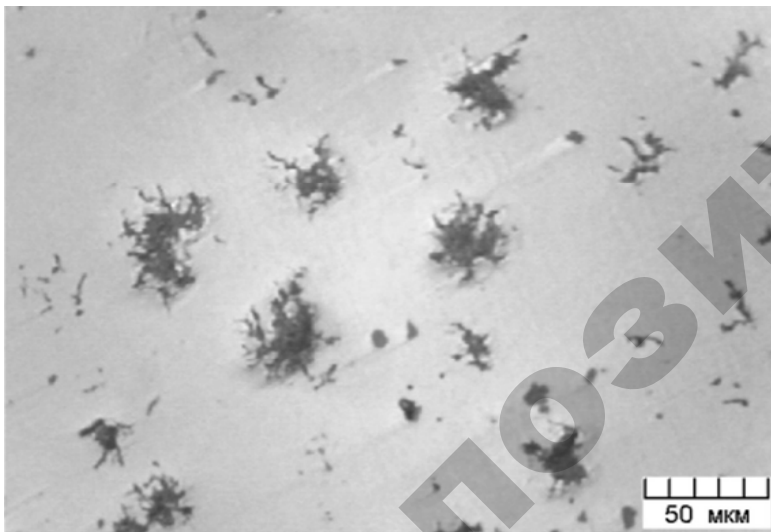
Рис. 3.9. Микроструктура высокопрочного ферритного чугуна ВЧ 45  
после травления. Графит шаровидный и ферритная матрица



*Рис. 3.10.* Микроструктура высокопрочного ферритно-перлитного чугуна ВЧ 60 после травления. Графит шаровидный, феррит – белая оторочка вокруг графита и темные участки перлита



*Рис. 3.12.* Микроструктура ферритного ковкого чугуна КЧ 30-6. Графит хлопьевидный – черные включения, феррит – светлые зерна



*Рис. 3.11.* Микроструктура ковкого чугуна до травления. Графит хлопьевидный и металлическая основа



## 4. МИКРОСТРУКТУРЫ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

---

### 4.1. Структурные составляющие в термически обработанной стали

**Термическая обработка** — совокупность операций теплового воздействия на металлы и сплавы с целью изменения их структуры и свойств. Цель термической обработки стали — изменение ее структуры, приводящее к изменению свойств в заданном направлении (твердости, прочности, пластичности, износостойкости, обрабатываемости резанием и т. д.). Основными видами термической обработки сталей являются отжиг, закалка и отпуск.

Феррито-перлитная структура в доэвтектоидной, перлитная — в эвтектоидной и перлитно-цементитная в заэвтектоидной углеродистых сталях образуются при их достаточно медленном охлаждении от температур выше критических  $A_{c3}$  и  $A_{cm}$  (рис. 2.4–2.9). Условия превращения (распада) аустенита при отжиге или нормализации близки к равновесным состояниям.

При больших скоростях охлаждения фазовые превращения совершаются при более низких температурах с формированием структур, отличных от равновесных. Если скорости охлаждения не превышают критической, то стали после термической обработки будут иметь структуры *перлита*, *сорбита*, *троостита*, т. е. феррито-цементитной смеси различной степени дисперсности.

*Пластинчатый перлит* (рис. 2.3) образуется при достаточно медленном охлаждении углеродистой стали, вместе с печью. Образование *сорбита* в сталях происходит при охлаждении на воздухе при не-

больших степенях переохлаждения с изотермической выдержкой (рис. 4.1). Еще большая степень дисперсности феррито-цементитной смеси достигается при охлаждении в масле с образованием *троостита* (рис. 4.2).

*Бейнит* — микроструктура стали в виде феррито-цементитной смеси игольчатого типа, получаемая в результате промежуточного превращения при достаточно большой степени переохлаждения аустенита до 450–550 °С (рис. 4.3). Такая структура обеспечивает получение хорошего сочетания механических свойств стали.

При скорости охлаждения равной или выше критической сталь приобретает структуру *мартенсита* с некоторым количеством остаточного *аустенита*. Его количество зависит от содержания углерода в углеродистых сталях (остаточного аустенита тем больше, чем выше содержание углерода).

*Мартенсит закалки* — микроструктура закаленной стали, представляющая собой пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железе с тетрагональной кристаллической решеткой. Под микроскопом мартенсит наблюдается в виде игл, располагающихся под углом 60 или 120° (рис. 4.4). Содержание углерода в мартенсите такое же, что и в аустените, может достигать 2,14 %. Чем мельче иглы мартенсита, тем выше механические свойства стали.

*Мартенсит отпуска*. Микроструктура мартенсита отпуска похожа на его микроструктуру до отпуска, однако в ней игольчатость кристаллов проявляется не так сильно (рис. 4.5). В отличие от мартенсита закалки, она представляет собой механическую смесь малоуглеродистого мартенсита и мелких частиц карбидов  $Fe_2C$ , которая является *отпущенным мартенситом* или *мартенситом отпуска*. Твердость стали сохраняется максимальной, которая получилась при закалке.

*Троостит отпуска* — микроструктура, получаемая в результате отпуска мартенсита при нагреве закаленной стали от 300 до 500 °С. Это механическая смесь, состоящая из мелких округлых зерен или коротких пластинок карбида в ферритной основе (рис. 4.6). Для структуры троостита характерны потемнение при травлении и сохранение остатков игольчатости.

*Сорбит отпуска* — механическая смесь, состоящая из карбида и феррита средней степени дисперсности (рис. 4.7). Эта структура образуется в результате отпуска мартенсита при 500–600 °С. Она на вид светлее, чем троостит отпуска.

*Аустенит остаточный.* В микроструктуре высокоуглеродистой стали после закалки остаточный аустенит проявляется в виде светлых участков небольших размеров на фоне мартенсита (темных участков игольчатого типа) (рис. 4.4).

## 4.2. Микроструктуры углеродистых сталей после термической обработки

Микроструктура углеродистой стали после полной закалки состоит из мартенсита. На рисунке 4.4 показана структура конструкционной стали 45 после закалки в воду с 840 °С.

Микроструктура доэвтектоидной углеродистой стали, нагретой выше критической точки  $A_{c1}$ , но ниже  $A_{c3}$ , когда феррит полностью превратился в аустенит, после закалки состоит из мартенсита (темных участков игольчатого типа) и светлых участков феррита.

Заэвтектоидная углеродистая сталь, нагретая под закалку выше критической точки  $A_{c1}$ , но ниже  $A_{cm}$ , после быстрого охлаждения имеет в структуре, кроме мартенсита, белую сетку цементита.

Микроструктура углеродистой стали 45 после изотермической закалки или со скоростью охлаждения несколько меньшей критической состоит из темных полей троостита и светлых полей игольчатого мартенсита (рис. 4.6). При больших увеличениях (при рассмотрении под электронным микроскопом) троостит имеет ясно выраженную структуру тонкодисперсного пластинчатого перлита.

Микроструктуры углеродистой конструкционной стали 45 после закалки в воду от 840 °С с последующим низким, средним и высоким отпуском представлены соответственно на рисунках 4.5–4.7.

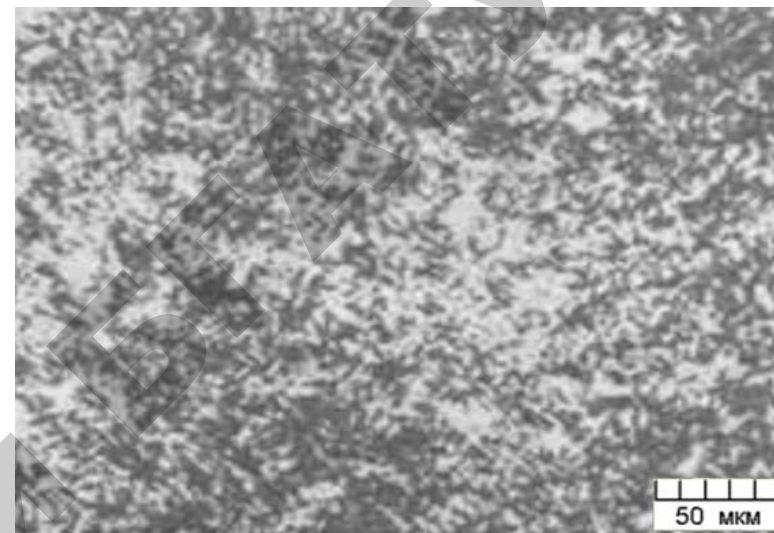


Рис. 4.1. Микроструктура стали 45 после охлаждения на воздухе – сорбит

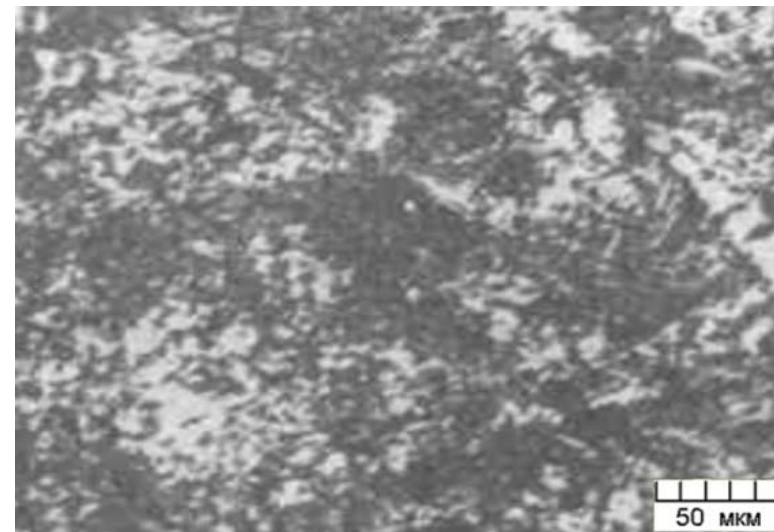
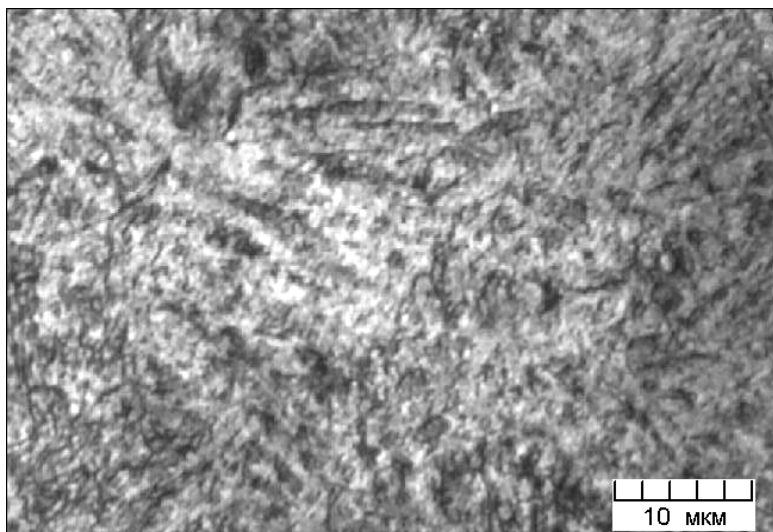
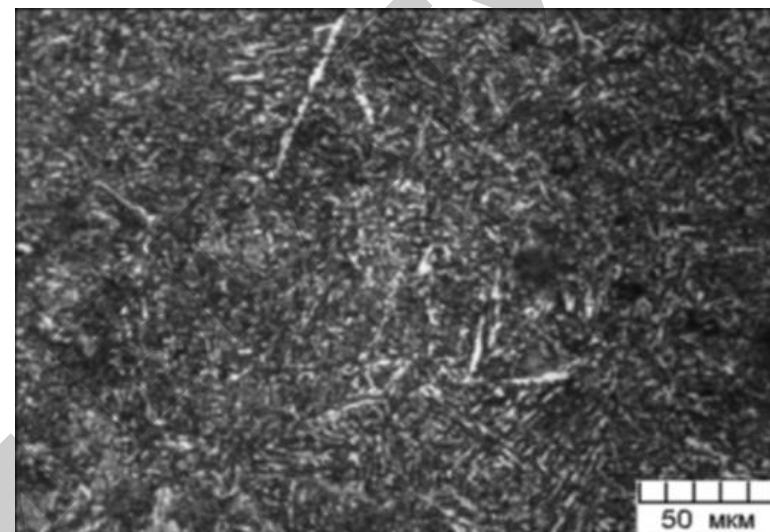


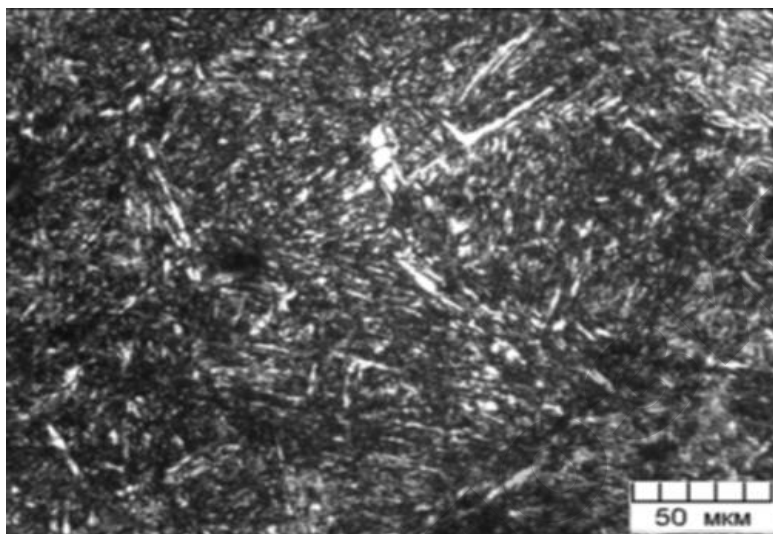
Рис. 4.2. Микроструктура стали 45 после охлаждения в масле – троостит



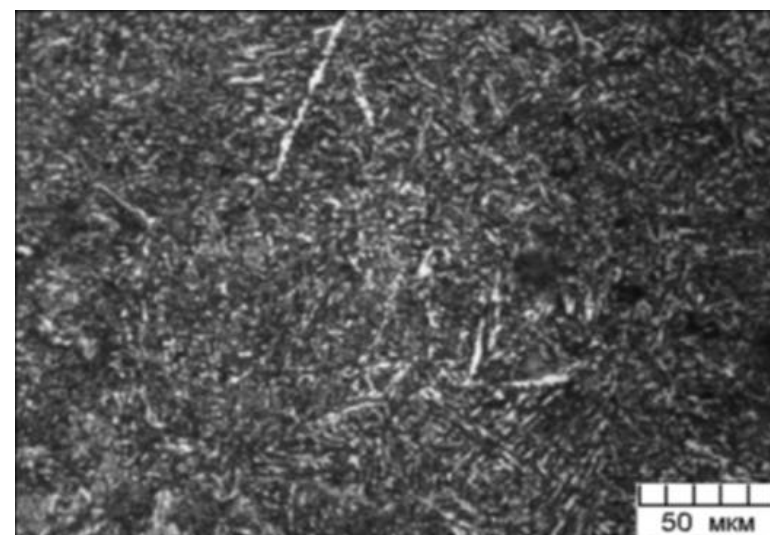
*Рис. 4.3.* Микроструктура стали 45 после охлаждения с высокой степенью переохлаждения до 450–550 °С – бейнит



*Рис. 4.5.* Микроструктура стали 45 после закалки и низкого отпуска. Структура – мартенсит отпуска



*Рис. 4.4.* Микроструктура стали 45 после полной закалки. Структура: мартенсит закалки (темные участки игольчатого типа), остаточный аустенит (светлые участки)



*Рис. 4.6.* Микроструктура стали 45 после закалки и среднего отпуска. Структура тросто-мартенсит: тростит (мельчайшие темные округлые зерна), мартенсит (светлые иглы)

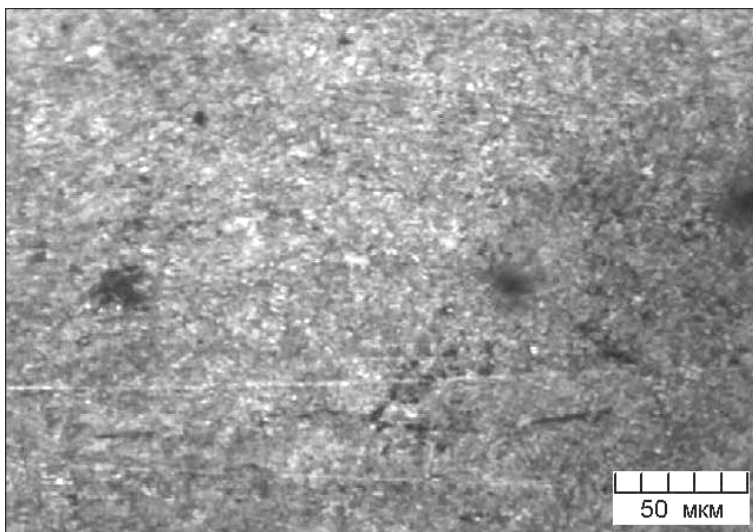


Рис. 4.7. Микроструктура стали 45 после закалки и высокого отпуска.  
Структура – сорбит отпуска

## 5. МИКРОСТРУКТУРЫ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

### 5.1. Классификация легированных сталей

Легированные стали по равновесной структуре подразделяют на следующие классы:

- 1) доэвтектоидные стали (менее 0,8 % С), содержащие избыточный феррит;
- 2) эвтектоидные стали (0,8 % С), содержащие перлит;
- 3) заэвтектоидные стали (0,8 – 2,0 % С), содержащие избыточные (вторичные) карбиды;
- 4) ледебуритные (карбидные) стали, содержащие первичные карбиды (кристаллизующиеся из жидкого расплава) более 2,0 % С.

Кроме четырех вышеперечисленных классов могут быть еще легированные стали ферритного и аустенитного классов.

По структуре, получаемой после охлаждения на спокойном воздухе образцов небольшой толщины, выделяют три основных класса сталей: 1) перлитный; 2) мартенситный; 3) аустенитный.

Стали перлитного класса содержат небольшое количество легирующих элементов, мартенситного — более значительное. Стали аустенитного класса имеют высокое содержание легирующих элементов.

В сталях перлитного класса после охлаждения на воздухе различают основные структуры — перлит, сорбит, троостит. В мартенситных сталях — мартенсит.

У сталей аустенитного класса температура мартенситного превращения лежит в области отрицательных температур, при комнатной температуре их структура — аустенит.

По химическому составу (классификационный признак — наличие тех или иных легирующих элементов) стали подразделяют на никелевые, хромистые, хромоникелевые, хромоникельмолибденовые и др.

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

Конструкционные легированные стали, идущие на изготовление деталей и механизмов машин, разделяют на машиностроительные (детали машин) и строительные (металлоконструкции). Они должны обладать высоким комплексом механических свойств. Машиностроительные стали, как правило, подвергают термической обработке. Для обеспечения поверхностного упрочнения при сохранении вязкой сердцевины применяют цементуемые (низкоуглеродистые 0,10–0,25 % С) стали после химико-термической обработки, закалки и низкого отпуска. Улучшаемые (среднеуглеродистые) легированные стали применяют для изготовления деталей, работающих при высоких нагрузках, после закалки и высокого отпуска.

К конструкционным легированным сталям также относят пружинные стали с особыми упругими свойствами и шарикоподшипниковые стали высокой прочности и износостойкости.

Инструментальные легированные стали, идущие на изготовление различных типов инструмента, классифицируют по двум основным признакам: назначению и свойствам, в основном, прокаливаемости и теплостойкости: для режущих и измерительных инструментов, быстрорежущие и штамповые стали и т. д.

Легированные стали и сплавы специального назначения характеризуются особыми физико-химическими свойствами: нержавеющие, износостойкие, жаростойкие, с особыми электромагнитными свойствами и др.

## 5.2. Микроструктуры легированных сталей и сплавов

*Конструкционные легированные стали* машиностроительного назначения. К цементуемым машиностроительным сталям относят высокопрочную сталь 12ХНЗА (рис. 5.1), значительно упрочняемую при термической обработке (после цементации — закалка в масло от 800 °С и низкий отпуск при 200 °С). Структура стали — малоуглеродистый мартенсит с отдельными включениями карбидов.

Улучшаемые стали (перлитного класса) содержат 0,3–0,4 % С и разное количество легирующих элементов. Микроструктура типичного представителя — стали 40Х после обычной термической обработки (закалки в масло и высокого отпуска при 550–600 °С) представлена на рисунке 5.2. Конструкционные леги-

рованные стали имеют приблизительно одинаковую структуру, состоящую из сорбита и отдельных включений троостита.

*Пружинные стали.* Предназначены для изготовления пружин, рессор, упругих элементов и имеют высокие пределы упругости, выносливости и релаксационной стойкости. В них при больших нагрузках не допускается остаточная деформация. Этим требованиям отвечают стали перлитного класса с повышенным содержанием углерода (0,5–0,7 % С), которые подвергают закалке и среднему отпуску при температуре 400–500 °С. Получаемая структура троостита отличается стабильностью и обеспечивает релаксационную стойкость.

На рисунке 5.3 представлена микроструктура стали 65Г после закалки от 830 °С в масло с последующим отпуском при 450 °С, которая вследствие низкой прокаливаемости применяется для изготовления пружин небольшого сечения.

Легированная пружинная сталь 50ХГФА после закалки в масло с 870 °С и отпуска при 520 °С приобретает структуру мелкозернистого троостита (рис. 5.4), что обеспечивает ее повышенную теплостойкость и вязкость. Она используется для изготовления пружин ответственного назначения при эксплуатации до 300 °С.

*Шарикоподшипниковые стали.* Предназначены для изготовления деталей подшипников — шариков, роликов, колец, работающих в условиях интенсивного изнашивания при высоких контактных нагрузках. Повышенное содержание углерода (до 1 %) и легирование хромом обеспечивают прокаливаемость стали и (после термической обработки) высокую равномерную твердость, устойчивость против истирания и достаточную вязкость. Микроструктура шарикоподшипниковой стали ШХ15 после закалки в масло с 830–840 °С и низкого отпуска при 150–160 °С показана на рисунке 5.5. Структура представляет собой отпущенный мелкоигольчатый мартенсит с равномерно распределенными избыточными карбидами. Она обеспечивает твердость не менее 62 HRC.

*Износостойкие стали.* Примером таких сталей является аустенитная марганцовистая сталь Г13 (сталь Гадфильда, С — 1,28–1,30 %, Mn — 12–13 %), которая обладает высокой износостойкостью при низкой твердости. Термообработка: закалка в воде с 1050 °С. Ее структура представляет собой аустенит с двойника-

ми (рис. 5.6). Выделение цементита только начинается на границах зерен.

*Инструментальные легированные стали и твердые сплавы.* Инструментальные стали повышенной прокаливаемости содержат 1–3 % легирующих элементов, являются полутеплостойкими и должны обеспечивать высокую твердость. Применяются для изготовления измерительного и режущего инструмента, штампов холодного деформирования. Повышение твердости и износостойкости достигается путем сочетания закалки и низкого отпуска. На рисунке 5.7 представлена структура инструментальной стали ХГТ (С — 1,3–1,5 %, Mn — 0,7–1,0 %, Ti — 0,8–1,5 %) после закалки в масло с 820–830 °С и низкого отпуска при 150–160 °С для получения твердости 61–64 HRC. Структура стали состоит из мартенсита отпуска с включениями светлой карбидной фазы (цементита, легированного хромом, марганцем, титаном).

*Быстрорежущие стали.* Предназначены для изготовления режущего инструмента, работающего при высоких скоростях резания, и обладают высокой теплостойкостью. Микроструктура таких сталей после отжига состоит из карбидов хрома, вольфрама, ванадия (до 25 %), равномерно распределенных по легированному ферриту (структура типа зернистого перлита). Относятся к карбидному классу. На рисунке 5.8 представлена структура быстрорежущей стали P2M1 (W — 1,9–2,1 %, Mo — 0,9–1,1 %, V — 1,1–1,2 %, C — 0,8–1,0 %) в исходном состоянии — зернистый перлит с мелкими и более крупными частицами карбидов вольфрама, ванадия, молибдена.

Для придания быстрорежущей стали наилучших режущих характеристик необходимо обеспечить перевод большего количества легирующих элементов из карбидов в аустенит, что достигается при нагреве под закалку. После закалки структура быстрорежущей стали состоит из мартенсита, карбидов и остаточного аустенита (до 20–30 %). Такая сталь непригодна для эксплуатации без отпуска, поскольку разогрев инструмента до 300–500 °С приводит к снижению твердости и преждевременному выходу из строя. С целью превращения остаточного аустенита в мартенсит отпуска и повышения теплостойкости быстрорежущую сталь подвергают двух- или трехкратному отпуску.

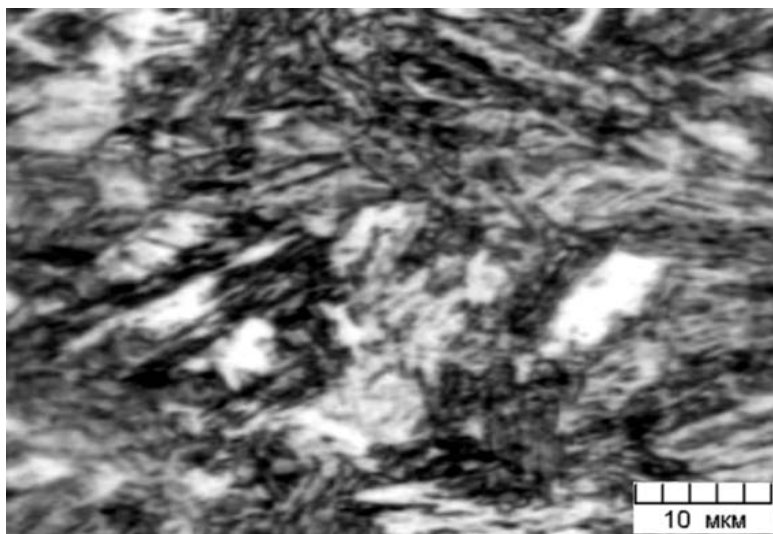
После однократного отпуска при оптимальной температуре 560 °С для быстрорежущей стали P18 (W — 17,5–19,0 %, Mo — 0,98 %, V — 1,0–4,0 %, Cr — 3,8–4,4 %, C — 0,7–0,8 %) количество остаточного аустенита снижается примерно до 10 % (рис. 5.9). Повторный отпуск уменьшает содержание остаточного аустенита до 5–7 %, а третий — до 2–3 %. В результате закалки и трехкратного отпуска твердость стали P18 повышается с 63 до 65 HRC (за счет распада остаточного аустенита и выпадения дисперсных карбидных частиц), теплостойкость повышается до 600 °С.

*Твердые сплавы.* Структура твердых сплавов, получаемых методами порошковой металлургии, представляет собой частицы карбидов вольфрама, титана и тантала, связанные кобальтом. Микроструктура твердого сплава BK15 состоит из мелких светлых угловатых и прямоугольных частиц карбида вольфрама и темных связующих включений кобальта (рис. 5.10). Допустимая скорость резания твердыми сплавами в 3–5 раз выше, чем быстрорежущими сталями.

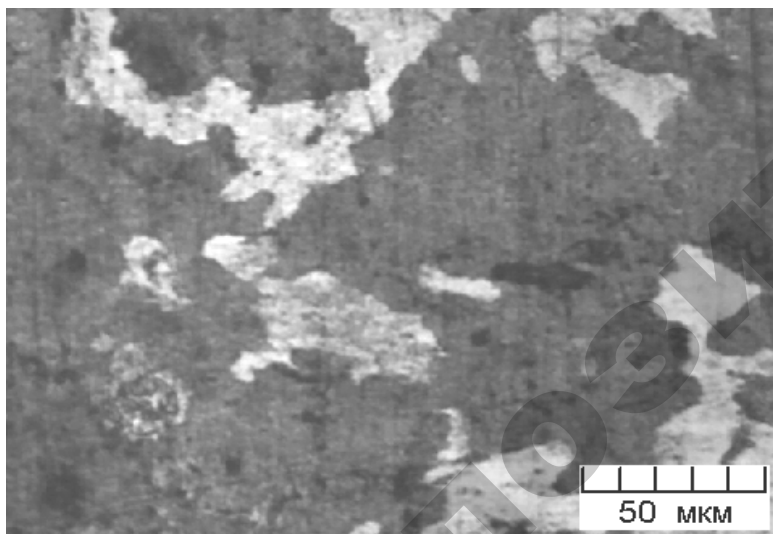
*Нержавеющие стали.* Нержавеющие (коррозионно-стойкие) стали относят к легированным сталям специального назначения с повышенным содержанием хрома (более 12 %), никеля, титана, которые не ржавеют и не окисляются на воздухе, в воде, в ряде кислот, солей, щелочей.

Наибольшее распространение в промышленности, строительстве, изделиях широкого потребления получили хромоникелевые стали аустенитного класса. Типичная структура нержавеющей стали 12X18H9T (с 0,12 % C, 18 % Cr, 8–10 Ni %, 0,6–0,8 Ti %) — аустенит после нормализации приведена на рисунке 5.11.

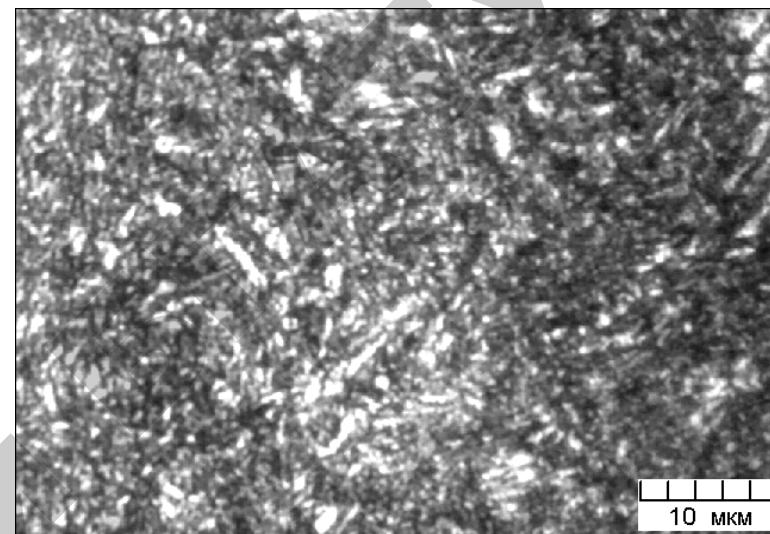
С целью снижения предела текучести и повышения пластичности, нержавеющие стали подвергают закалке в воду с 1050–1100 °С (рис. 5.12, микроструктура нержавеющей стали 12X18H8 с 0,12 % C, 18 % хрома и 8 % никеля). Аустенит представлен в виде зерен, имеющих правильные полигональные границы. Нагрев до температур закалки вызывает растворение карбидов хрома, а быстрое охлаждение фиксирует пересыщенный твердый раствор.



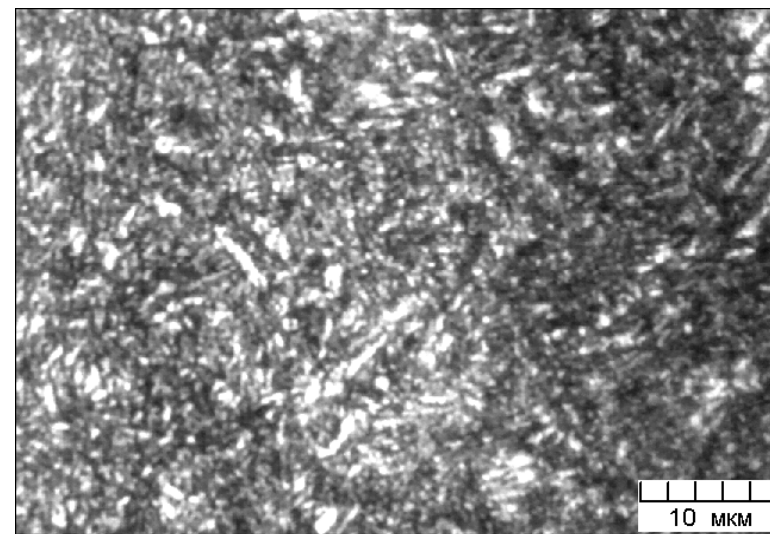
*Рис. 5.1.* Микроструктура конструкционной стали 12ХН3А после цементации, закалки и низкого отпуска.  
Структура: малоуглеродистый мартенсит отпуска и включения карбидов



*Рис. 5.2.* Микроструктура стали 40X поле закалки и высокого отпуска. Структура: троостит (отдельные светлые включения) и сорбит отпуска (темные включения)



*Рис. 5.3.* Микроструктура пружинной стали 65Г после закалки и среднего отпуска. Структура – зернистый троостит



*Рис. 5.4.* Микроструктура легированной пружинной стали 50 ХГФА после закалки и среднего отпуска. Структура – троостит отпуска

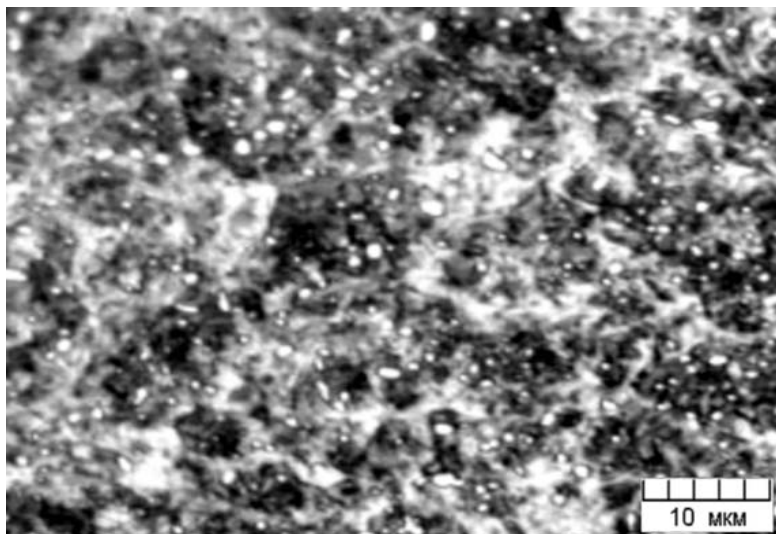


Рис. 5.5. Микроструктура шарикоподшипниковой стали ШХ15 после закалки и низкого отпуска. Структура: мартенсит мелкоигльчатый и частицы карбидов (светлые включения)

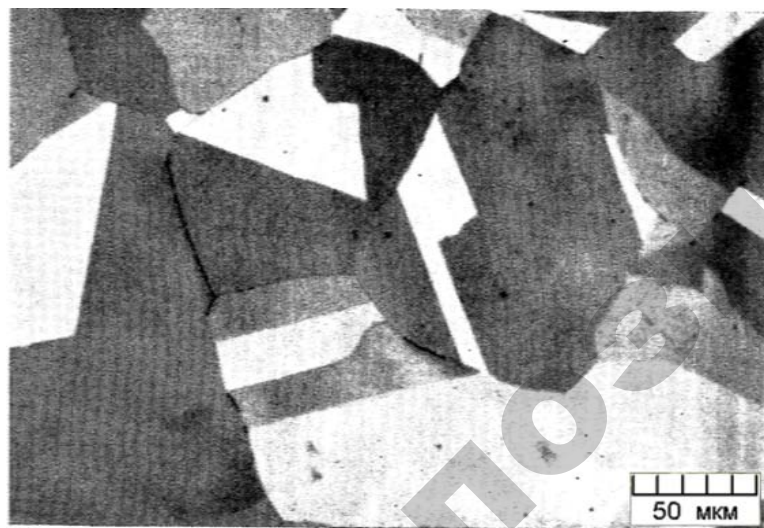


Рис. 5.6. Микроструктура аустенитной марганцевистой стали Г13 после закалки в воду с 1050 °С. Структура – аустенит с двойниками

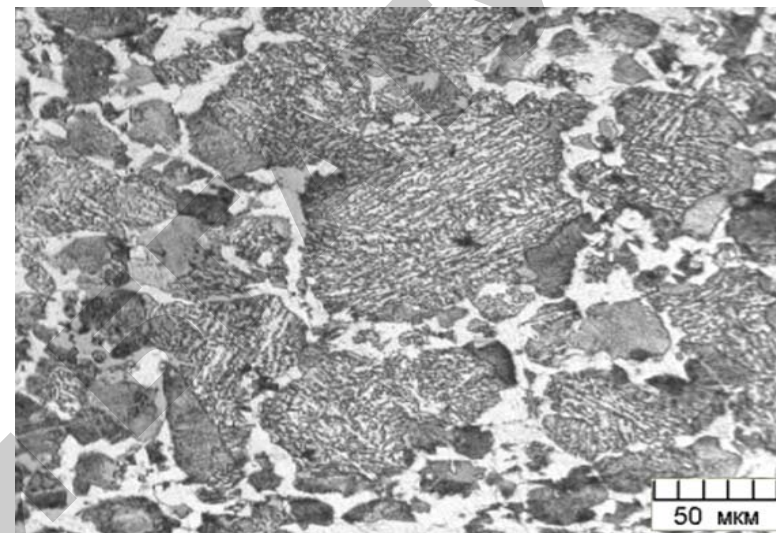


Рис. 5.7. Микроструктура инструментальной стали ХГТ после закалки и низкого отпуска. Структура: мартенсит отпуска и легированный цементит (светлая сетка)

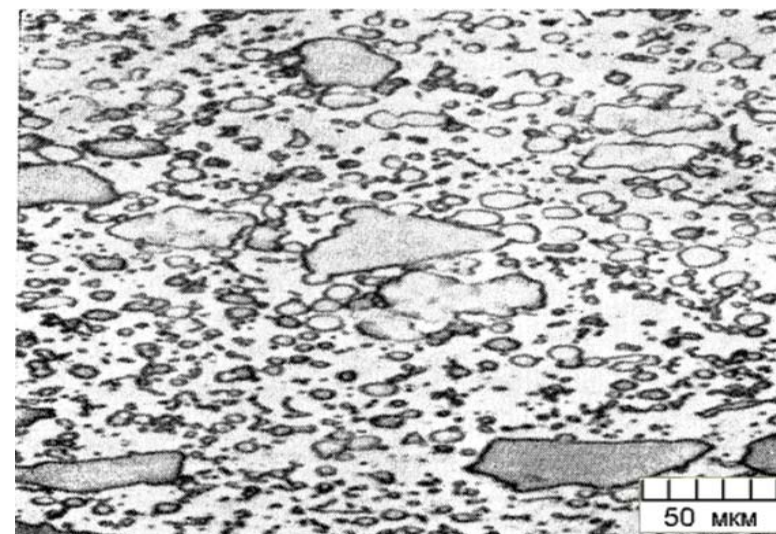


Рис. 5.8. Быстрорежущая сталь P2M1 в исходном состоянии после отжига. Структура – зернистый перлит с мелкими и более крупными частицами карбидов вольфрама, ванадия, молибдена



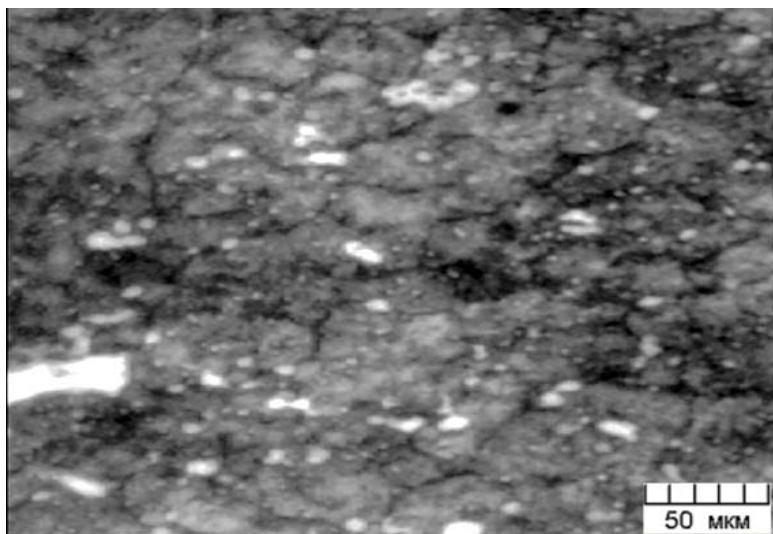


Рис. 5.9. Микроструктура стали P18 после закалки и однократного высокого отпуска. Структура: мартенсит отпуска, карбиды и аустенит остаточный (крупные светлые включения)

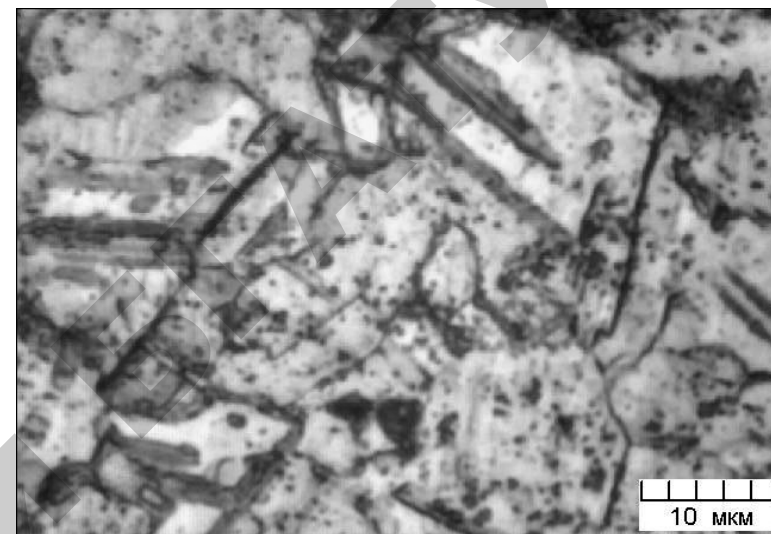


Рис. 5.11. Микроструктура стали 12X18H9T после нормализации. Структура – аустенит



Рис. 5.10. Микроструктура твердого сплава BK15. Структура: светлые частицы карбида вольфрама и темная основа связующего кобальта

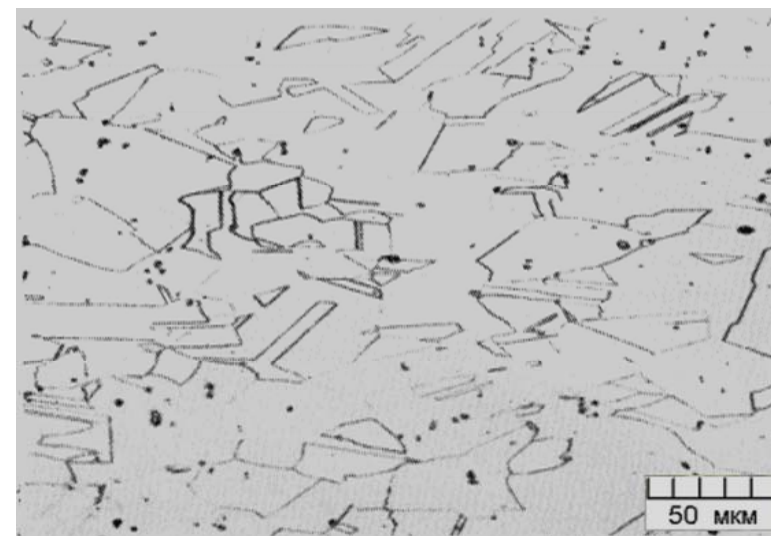


Рис. 5.12. Нержавеющая сталь 12X18H8 после закалки с 1100 °С. Структура – аустенит в виде зерен полигональной формы

## 6. МИКРОСТРУКТУРЫ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ

---

Сплавы на основе алюминия широко применяются в машиностроительном и агропромышленном комплексе при изготовлении различных видов техники.

### 6.1. Основные сведения об алюминиевых сплавах

*Алюминий* — самый распространенный металл в природе. Он широко применяется в чистом виде, а также является основой многих легких сплавов.

Алюминий обладает ценными физико-химическими свойствами. Его кристаллическая решетка — ГЦК, температура плавления — 660 °С, плотность — 2,7 г/см<sup>3</sup>, предел прочности  $\sigma_b = 60$  МПа,  $HV = 250\text{--}300$  МПа,  $\delta = 35\text{--}40$  %,  $\psi = 80$  %. Алюминий характеризуется низкой плотностью, высокой тепло- и электропроводностью, хорошей коррозионной стойкостью во многих средах за счет образования на поверхности металла плотной оксидной пленки  $Al_2O_3$ .

По ГОСТ 11069-01 алюминий высокой чистоты маркируется А999 и содержит 99,995 % алюминия и 0,005 % примесей. Алюминий технической чистоты маркируется, например, А8 (99,9 % Al), А7 (99,7 % Al), А6 (99,6 % Al), А5 (99,5 % Al), А0 (99,0 % Al). Поскольку технический алюминий имеет низкую прочность, то как конструкционный материал его не применяют. Высокая пластичность, коррозионная стойкость и электропроводность позволяют эффективно использовать алюминий для производства изделий штамповкой и вытяжкой (например, алюминиевая фольга), проводов, для защиты от коррозии и производства коррозионно-стойких изделий.

Технический отожженный алюминий АДМ (М — мягкий;  $\sigma_b = 80$  МПа,  $\delta = 35$  %) упрочняется холодной пластической деформацией. Алюминий после деформации и отжига имеет однородную зернистую структуру с отдельными темными включениями в виде соединения  $FeAl_3$  и сероватыми включениями кремния.

*Основные легирующие элементы в алюминиевых сплавах.* Более высокими механическими и технологическими свойствами обладают сплавы на основе алюминия. Cu, Zn, Mg, Ni, Si, Mn — элементы, формирующие упрочняющие зоны и фазы. Марганец одновременно повышает коррозионную стойкость. Кремний является основным легирующим элементом в ряде литейных алюминиевых сплавов (силуминов), поскольку он участвует в образовании эвтектики.

Ni, Ti, Cr повышают жаропрочность сплавов, затормаживая процессы диффузии и образуя стабильные сложнoleгированные упрочняющие фазы. Литий в сплавах способствует возрастанию их модуля упругости. Вместе с тем, магний и марганец снижают тепло- и электропроводность алюминия. Железо является вредной примесью в алюминиевых сплавах.

На основании диаграмм состояния алюминиевые сплавы условно разделяют на *деформируемые* и *литейные*, где границей между ними является предел насыщения твердого раствора алюминия другими компонентами при температуре эвтектики.

Сплавы с содержанием компонента меньше предела растворимости при высокой температуре обладают наибольшей пластичностью и наименьшей прочностью, хорошо обрабатываются давлением с последующей термической обработкой.

Наличие эвтектической составляющей резко уменьшает пластичность, способность прессоваться, коваться, прокатываться. При некотором содержании эвтектики такая обработка уже неосуществима.

Сплавы, кристаллизующиеся при постоянной температуре (эвтектические сплавы), обладают наилучшей *жидкотекучестью*. При переходе за пределы растворимости жидкотекучесть резко возрастает. Вместе с тем литейные сплавы не должны содержать много эвтектики (больше 25 %) во избежание ухудшения механических и технологических свойств. Все литейные сплавы могут упрочняться в результате термической обработки,

но степень упрочнения тем меньше, чем больше сплав легирован, т. е. чем больше в структуре эвтектики.

## 6.2. Микроструктуры алюминиевых сплавов

*Деформируемые алюминиевые сплавы* (ГОСТ 4784-97). Из них самыми распространенными являются *дуралюмины* — сплавы системы Al – Cu – Mg с добавками марганца (Д1, Д16, Д18, Д19, ВД17 и др.). Они упрочняются термической обработкой, хорошо свариваются точечной сваркой, удовлетворительно обрабатываются резанием (в термоупрочненном состоянии); однако склонны к межкристаллитной коррозии после нагрева (особенно Д1, Д16 и В65). В авиации дуралюмины применяют для изготовления лопастей воздушных винтов (Д1), элементов конструкций самолетов (Д16, Д19), заклепок (В65, Д18) и др. Структуру сплавов определяют согласно тройной диаграмме состояния Al – Cu – Mg. Микроструктура дуралюминов характеризуется сложным фазовым составом. Нерастворимыми фазами являются марганцовистые соединения, а также химические соединения железа и кремния.

Структура дуралюмина после отжига состоит из зерен пересыщенного  $\alpha$ -твердого раствора легирующих элементов сплава в алюминии, растворимых упрочняющих фаз  $\text{CuAl}_2$  ( $\theta$ -фаза) и  $\text{Al}_2\text{MgCu}$  (S-фаза), и нерастворимых темных частиц марганцовистых и железокремниевых фаз (рис. 6.1). Обе фазы обладают высокой твердостью, прочностью и упрочняют дуралюминий.

Деформируемые сплавы системы Al – Mg – Mn – Cu (АВ, АК6 и АК8) — *авиали* обладают высокой пластичностью при горячей обработке давлением, удовлетворительно свариваются, хорошо обрабатываются резанием. Из этих сплавов изготавливают ковкой и штамповкой детали самолетов, работающие под нагрузкой (рамы, пояса лонжеронов, крепежные детали).

Микроструктура сплава АВ представлена на рисунке 6.2. Она состоит из вытянутых светлых зерен пересыщенного твердого раствора алюминия и нерастворившихся темных включений железосодержащих фаз.

*Литейные алюминиевые сплавы* (ГОСТ 1583-93). Основные требования, предъявляемые к этим сплавам, — это сочетание хороших литейных свойств (высокой жидкотекучести, небольшой усадки, малой склонности к образованию горячих трещин и пористости) с оптимальными механическими и химическими свойствами. Лучшими литейными свойствами обладают сплавы эвтектического состава. Больше всего распространены сплавы на основе систем Al – Si, Al – Si – Cu, Al – Cu и др. (5 основных групп).

*Силумины* — конструкционные сплавы на основе систем Al – Si (АК12) и Al – Si – Mg (АК9, АК8, АК7). Сплав АК12 близок к эвтектическому составу (10...13 % Si) и обладает высокими литейными свойствами, коррозионной стойкостью, большой плотностью отливок.

Микроструктура сплава АК12 в литом состоянии представляет собой грубую эвтектику, состоящую из  $\alpha$ -твердого раствора и кремния игольчатого строения с отдельными включениями кристаллов первичного кремния (рис. 6.3, а). Она не обеспечивает требуемых механических свойств. Повышение пластичности сплава за счет изменения структуры (измельчение эвтектики, дендритов  $\alpha$ -твердого раствора) достигается модифицированием АК12 натрием (0,065 %) посредством введения в расплав смеси солей (67 % NaF + 33 % NaCl) (рис. 6.3, б). Термической обработкой сплав АК12 не упрочняется. Легированные силумины упрочняются термической обработкой. Сплав АК12 используют для изготовления мелких, а АК9 и АК7 — средних и крупных литых деталей (корпусов компрессоров, картеров двигателей внутреннего сгорания). Сплав АК8 применяется для отливок, получаемых литьем под давлением (блоков цилиндров двигателей), и отличается хорошим комплексом технологических свойств.

Для изготовления поршней, работающих при повышенных температурах и в условиях интенсивного износа, применяют заэвтектические двойные силумины, например, АК18. Микроструктура литейного сплава АК18 в исходном литом состоянии до модифицирования состоит из грубой игольчатой эвтектики  $\alpha + \text{Si}$  с включениями кристаллов избыточного первичного кремния (рис. 6.4).

*Высокопрочные и жаропрочные литейные сплавы.* В эту группу входят сплавы систем Al – Cu – Mn (AM5), Al – Si – Cu – Mg (AK5M2, AK5M) и Al – Cu – Mn – Ni (AK6MцH).

Сплав AM5 широко используется для литья крупногабаритных отливок в песчаные формы, он упрочняется термообработкой. В литом состоянии микроструктура сплава состоит из зерен твердого раствора, представляющих ветви дендритов, по границам которых расположены ободки хрупких интерметаллидов эвтектической фазы  $\text{CuAl}_2$  (рис. 6.5). Они обуславливают пониженную пластичность этих сплавов, которая устраняется путем гомогенизирующего отжига.

Сплавы AK5M2 и AK6MцH используются для изготовления корпусов приборов, головок цилиндров двигателей, работающих при повышенных температурах (250–270 °С). Микроструктуры сплава AK5M2 в исходном литом состоянии (литье в кокиль) и после модифицирующей обработки приведены на рисунке 6.6. До модифицирования она представляет собой дендриты легированного твердого раствора на основе алюминия с небольшим количеством игольчатой эвтектики (рис. 6.6, а). После модифицирования эвтектика измельчается (рис. 6.6, б).

Особую группу литейных алюминиевых сплавов представляют заэвтектические легированные силумины, отличающиеся высокой жаропрочностью и износостойкостью, низким коэффициентом термического расширения. Это обуславливает их применение для поршней форсированных двигателей с рабочей температурой 300–320 °С. Микроструктура заэвтектических легированных силуминов, например, сплава AK21M2,5H2,5, характеризуется наличием первичных кристаллов кремния (рис. 6.7). Эти кристаллы могут быть больших размеров, что сильно снижает прочностные и технологические свойства сплава (рис. 6.7, а). Размеры включений первичного кремния уменьшаются после специальной модифицирующей обработки расплава фосфористой медью (рис. 6.7, б). Заэвтектические силумины с повышенным содержанием меди и никеля имеют в структуре значительное количество сложных интерметаллических соединений, преимущественно алюминидов и силицидов, приводящих к увеличению жаропрочности.

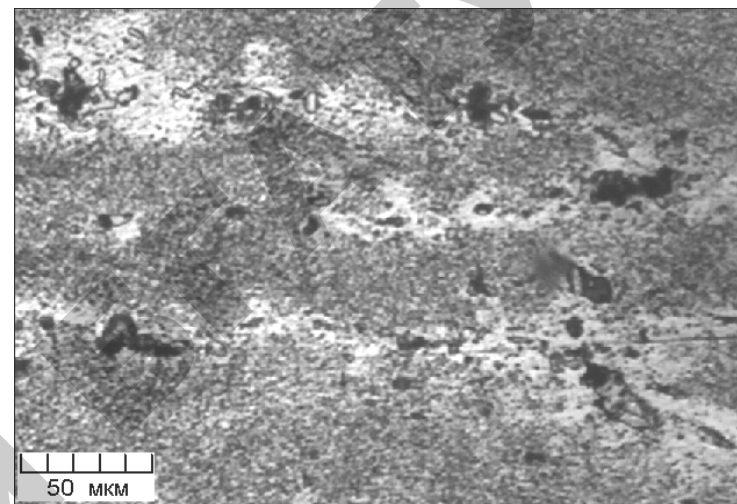


Рис. 6.1. Микроструктура дуралюмина Д16: пересыщенный  $\alpha$ -твердый раствор и включения фаз  $\text{CuAl}_2$  и  $\text{Al}_2\text{MgCu}$  по границам зерен (светлое поле); нерастворившиеся частицы соединений железа, марганца и кремния (темные включения)

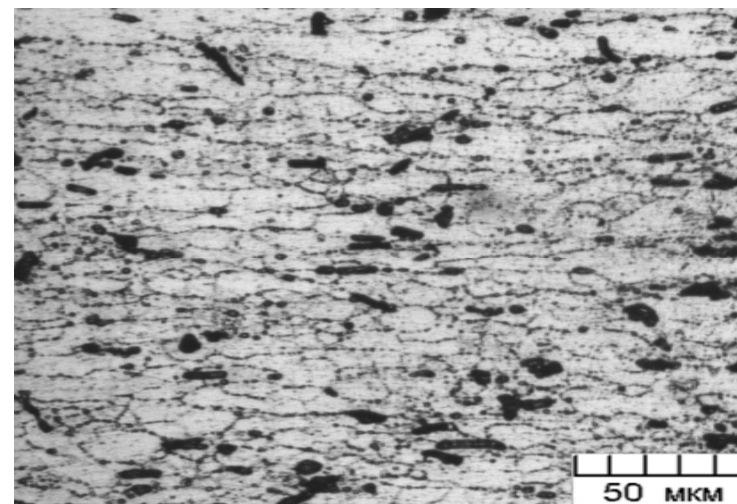
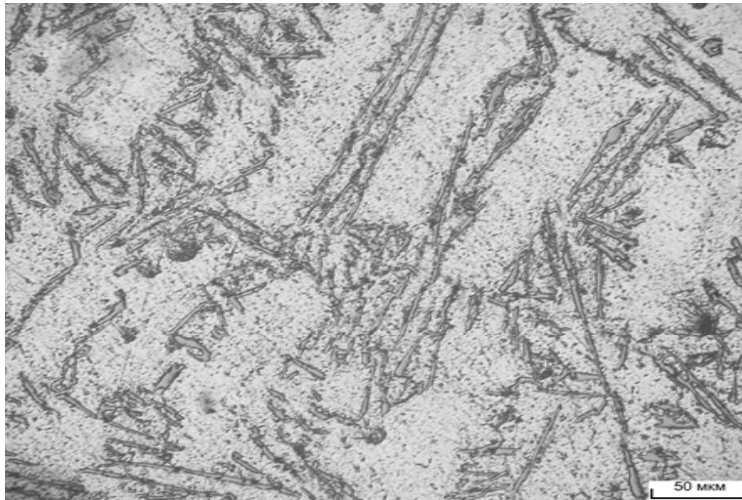
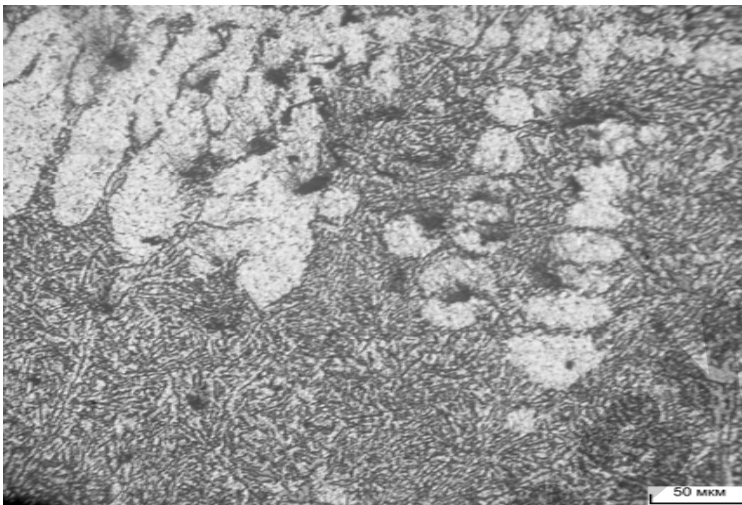


Рис. 6.2. Микроструктура сплава авиаль АВ: пересыщенный  $\alpha$ -твердый раствор и включения фаз  $\text{CuAl}_2$  и  $\text{Al}_2\text{MgCu}$  по границам (светлые вытянутые зерна); нерастворившиеся частицы соединений железа (темные зерна)



а) в исходном состоянии



б) в модифицированном состоянии

Рис. 6.3. Микроструктура силумина АК12,  $\times 400$ : а) в исходном литом состоянии до модифицирования грубая игольчатая эвтектика  $\alpha + \text{Si}$  с отдельными кристаллами избыточного кремния; б) после модифицирования структура – мелкозернистая эвтектика и включения первичных дендритов  $\alpha$ -твердого раствора (светлые зерна)

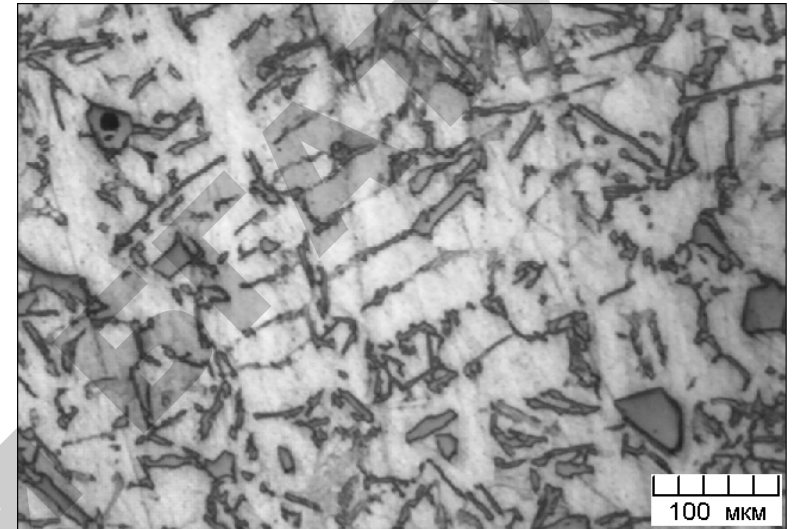


Рис. 6.4. Микроструктура литейного сплава АК18,  $\times 200$  в исходном литом состоянии – грубая игольчатая эвтектика  $\alpha + \text{Si}$  с кристаллами первичного кремния

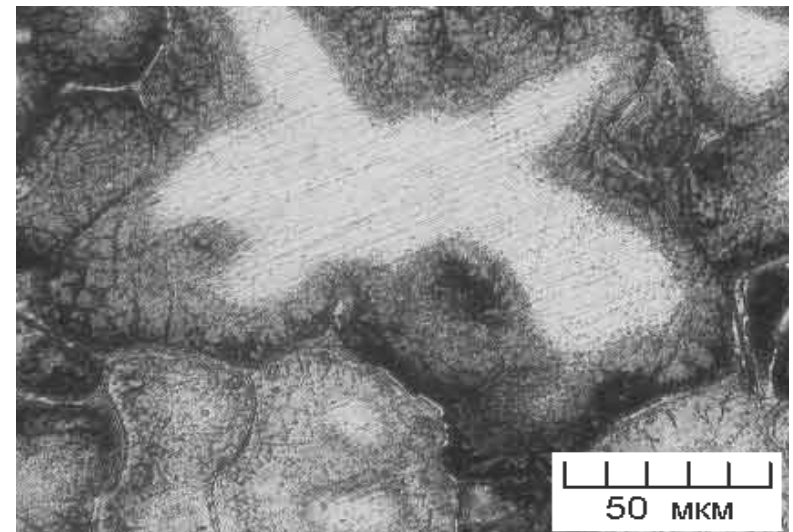
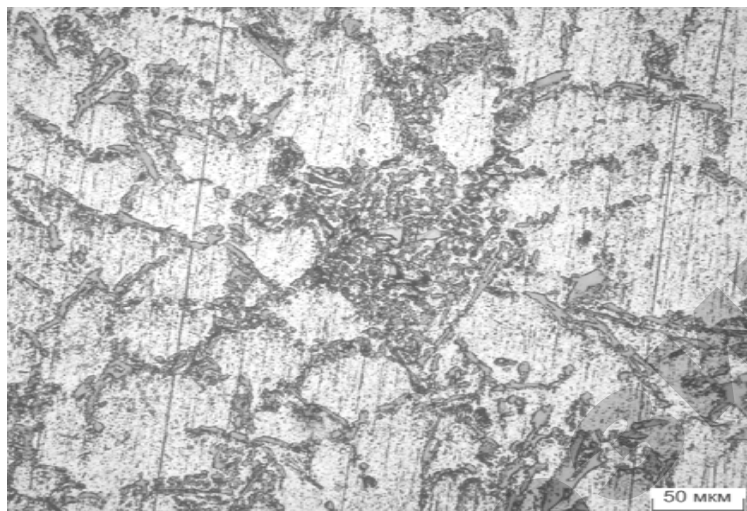


Рис. 6.5. Микроструктура литого сплава АМ5: зерна твердого раствора-ветви дендритов, по границам ободки хрупких интерметаллидов эвтектической фазы  $\text{Al}_2\text{Cu}$

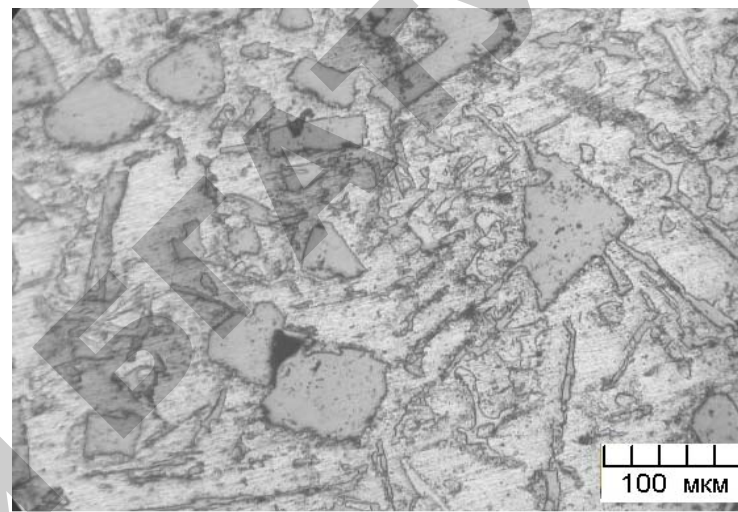


а) в исходном состоянии

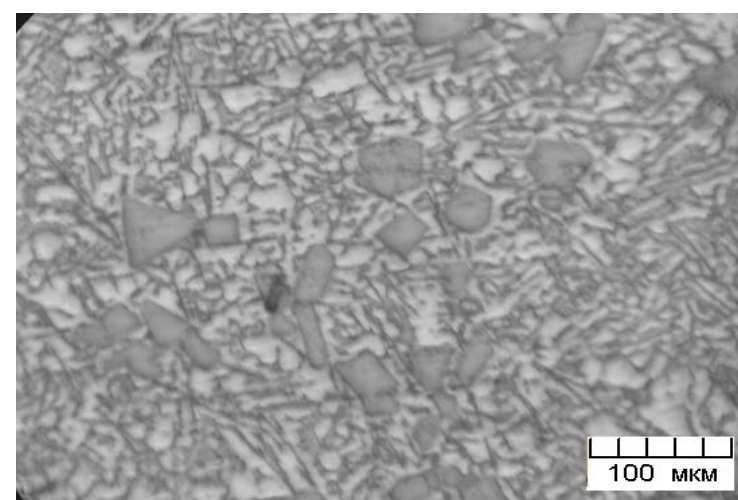


б) в модифицированном

Рис. 6.6. Микроструктура силумина АК5М2,  $\times 400$ : а) в исходном состоянии до модифицирования на поле эвтектики расположены иглы кремния; б) после модифицирования структура – мелкозернистая эвтектика и включения первичных дендритов  $\alpha$ -твердого раствора (светлые зерна)



а) в исходном состоянии



б) в модифицированном (фосфористой медью) состоянии

Рис. 6.7. Микроструктура силумина АК21М2,5Н2,5,  $\times 200$ : а) в исходном состоянии до модифицирования на поле эвтектики расположены крупные частицы первичного кремния и иглы эвтектического кремния; б) после модифицирования структура – эвтектика и включения кристаллов первичного кремния

## 7. МИКРОСТРУКТУРЫ МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ

### 7.1. Основные сведения о медных сплавах

*Медь* — металл красного, а в изломе — розового цвета, температура плавления — 1083 °С, плотность — 8,9 г/см<sup>3</sup>. Она имеет ГЦК-решетку. Нашей промышленностью производится 11 марок меди с различным содержанием примесей. В электронике применяют бескислородную медь марок М000 (99,99 % Cu) и М00 (99,97 % Cu), в электротехнике и металлургии — М0 (99,95 % Cu), М1 (99,9 % Cu), М2 (99,7 % Cu) и др.

Механические свойства меди в литом состоянии:  $HB = 160$  МПа,  $\sigma_b = 150$  МПа,  $\delta = 25$  %; после деформации и отжига —  $HB = 240$  МПа,  $\sigma_b = 250$ –270 МПа,  $\delta = 45$  %.

По характеру взаимодействия с медью легирующие элементы и примеси разделяют на три группы.

1. Элементы (Ag, Al, As, Au, Cd, Fe, Ni, Pt, P, Sb, Sn, Zn), взаимодействуя с медью, образуют твердые растворы. Они повышают ее прочность, но при этом существенно уменьшают тепло- и электропроводность.

2. Элементы (Bi, Pb) практически нерастворимые в меди в твердом состоянии образуют с ней легкоплавкие эвтектики. Возникновение эвтектик по границам зерен приводит к разрушению слитков меди в процессе их горячей прокатки (явление красноломкости).

3. Элементы (Se, S, O, Te и др.), образуют с медью хрупкие химические соединения (например, Cu<sub>2</sub>O, Cu<sub>2</sub>S). Увеличение содержания серы в меди, с одной стороны, обеспечивает повышение качества ее механической обработки (резанием), с другой стороны, вызывает хладноломкость меди. Присутствие кислорода в меди является причиной ее «водородной болезни», проявляющейся в образовании микротрещин и разрушении при отжиге (температура выше 400 °С) в водо-

родсодержащей среде. В данном случае водород, активно диффундирующий в металл, отнимает кислород у окиси меди Cu<sub>2</sub>O с образованием паров воды. В металле возникают области с высоким давлением, вызывающим разрушение материала.

Медь обладает ценными техническими и технологическими свойствами: высокими электро- и теплопроводностью, достаточной коррозионной стойкостью, хорошо обрабатывается давлением, сваривается всеми видами сварки, легко поддается пайке, прекрасно полируется. Недостатками меди являются ее высокая стоимость, значительная плотность, большая усадка при литье, горячеломкость, сложность обработки резанием.

*Латуни* — сплавы меди с цинком. Они маркируются буквой Л и цифрой, указывающей содержание меди в сплаве в %, остальное — цинк. Если латунь легирована другими элементами, то после буквы Л ставят обозначение этих элементов: С — свинец, О — олово; Ж — железо, А — алюминий, К — кремний, Мц — марганец, Н — никель. Числа после букв показывают содержание легирующих элементов в процентах. Например, Л96 — латунь, которая содержит 96 % меди, а остальное — цинк; ЛАН59-3-2 — латунь, содержащая 59 % меди, 3 % алюминия, 2 % никеля, а остальное — цинк.

Латуни бывают деформируемые и литейные. Латуни по структуре подразделяются на однофазные и двухфазные. Практическое применение находят однофазные латуни с содержанием цинка до 39 % ( $\alpha$ -латуни) и двухфазные с содержанием цинка от 39 до 45 % ( $\alpha + \beta'$  латуни).

Однофазные латуни пластичны, хорошо паяются, свариваются и обрабатываются давлением (прокатка, волочение, высадка и др.) в горячем и холодном состояниях.

Изделия из двухфазных латуней (проволока, трубы, прутки, листы, ленты) изготавливаются холодной штамповкой и глубокой вытяжкой.

Основным видом термической обработки латуней является смягчающий отжиг перед пластическим деформированием при 600...700 °С с медленным охлаждением. Если требуется повышение твердости и прочности, то охлаждение ведут ускоренно (на воздухе, в воде).

*Бронзы* — сплавы меди со всеми элементами, кроме цинка и никеля. В бронзах может находиться цинк, но при наличии других легирующих элементов. Маркируются бронзы буквами Бр, затем

следуют буквы, указывающие легирующий элемент, и цифры, показывающие содержание этих элементов в процентах. Обозначение элементов в бронзах то же, что и при маркировке латуней: Ф – фосфор, Ц — цинк, Х — хром, Б — бериллий (ГОСТ 613-97). Например, БрОФ6,5-0,4 содержит 6,5 % олова, 0,4 % фосфора, а остальное — медь.

Бронзы бывают деформируемые и литейные.

Различают оловянистые, алюминиевые, бериллиевые, свинцовистые, оловянно-фосфорные и другие бронзы. Фазовый состав их описывается диаграммами состояния двух основных элементов, например, для БрОФ 10-1 диаграммой Cu – Sn. Структура и свойства бронз изменяются в зависимости от скорости охлаждения при кристаллизации, вида термической обработки и характера обработки давлением. Бронзы немагнитны, коррозионно-стойки, имеют высокие коэффициенты тепло- и электропроводности. Для улучшения свойств их подвергают термообработке: отжигу, закалке и старению или пластическому деформированию с целью наклепа.

*Оловянистые бронзы* содержат до 12 % олова, с повышением количества которого увеличиваются их твердость и прочность. Эти бронзы характеризуются высокими антифрикционными и упругими свойствами. Применяются для изготовления деталей, работающих в коррозионной среде: подшипники, уплотняющие втулки, клапаны.

*Алюминиевые бронзы*, например, БрА5, БрА7 и другие (5...11 % Al), являются дешевыми заменителями оловянистых. Эти бронзы очень пластичные и их используют для изготовления проката различного профиля и других изделий. Алюминиевые бронзы пластически деформируются как в холодном, так и горячем состоянии, коррозионно-стойки, обладают высокими механическими свойствами. Они имеют хорошие литейные свойства. Многокомпонентные алюминиевые бронзы упрочняются закалкой с последующим старением, при этом твердость этих бронз повышается в 2 раза. Высокопрочные алюминиевые бронзы применяют для изготовления шестерен, втулок, подшипников, пружин, деталей электрооборудования.

*Свинцовистые бронзы*, например, БрС30, содержат 27...33 % свинца. Свинец практически не растворяется в меди в жидком состоянии, и после охлаждения наблюдается структура, состоящая из зерен меди и эвтектики Cu + Pb, в которой 99,98 % Pb, расположенной по границам

зерен Cu в виде крупных скоплений. Эти бронзы используют для изготовления подшипников качения, работающих при высоких удельных нагрузках и больших скоростях.

*Бериллиевые бронзы*, например, БрБ2, содержат 1,8...2,5 % бериллия. Они обладают высокими упругими свойствами, стойкостью против коррозии, хорошо свариваются. Бериллиевые бронзы упрочняются закалкой с последующим старением, при этом в 3 раза повышается предел их прочности. Применяются для изготовления деталей точного приборостроения: упругие элементы электронных приборов и устройств, мембраны.

## 7.2. Микроструктуры медных сплавов

Микроструктура меди после пластической деформации и рекристаллизационного отжига представлена на рисунке 7.1. Она состоит из зерен меди внутри которых присутствуют двойники.

Микроструктура  $\alpha$ -латуни ( $\alpha$ -твердый раствор Zn в Cu) в литом состоянии имеет дендритное строение. Микроструктура деформированной и отожженной  $\alpha$ -латуни (рис. 7.2) имеет зернистое строение внутри зерен наблюдаются полосы двойникования. Вследствие различной ориентировки зерен они травятся с разной интенсивностью, поэтому получают различную окраску.

Двухфазные латуни, например, ЛС59-1 имеют структуру  $\alpha + \beta$  (рис. 7.3), где  $\alpha$ -фаза — светлые зерна,  $\beta$  — темные. Фаза  $\beta$  является твердым раствором на базе соединения CuZn и имеет упорядоченное строение, что придает ей повышенную хрупкость.

Микроструктура литой бронзы состоит из дендритов  $\alpha$ -твердого раствора олова в меди (рис. 7.4). Микроструктура этой бронзы после деформации и отжига представляет однородные по составу зерна твердого  $\alpha$ -раствора.

Микроструктура бериллиевой бронзы состоит из дендритов  $\alpha$ -твердого раствора бериллия и олова в меди (рис. 7.5). После горячей деформации и отжига представляет собой однородные по составу зерна твердого  $\alpha$ -раствора.



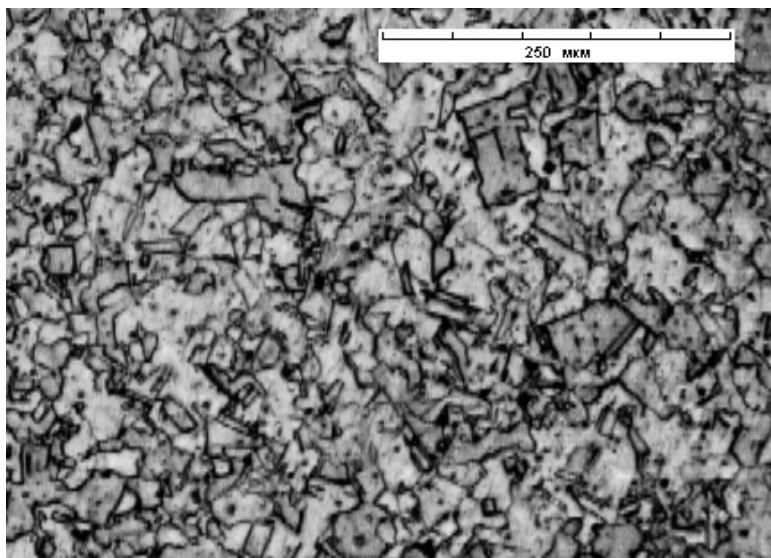


Рис. 7.1. Медь деформированная (экструзия) после рекристаллизационного отжига



Рис. 7.3. Латунь ЛС 59-1 деформированная

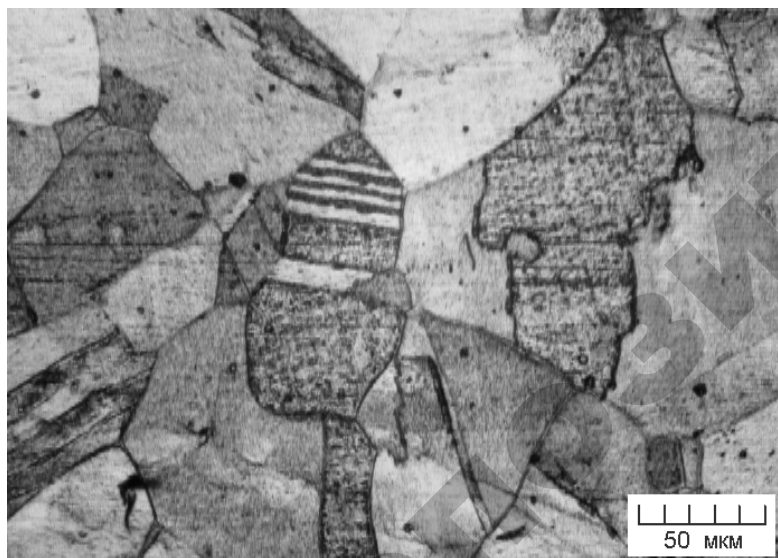


Рис. 7.2. Латунь Л80 деформированная

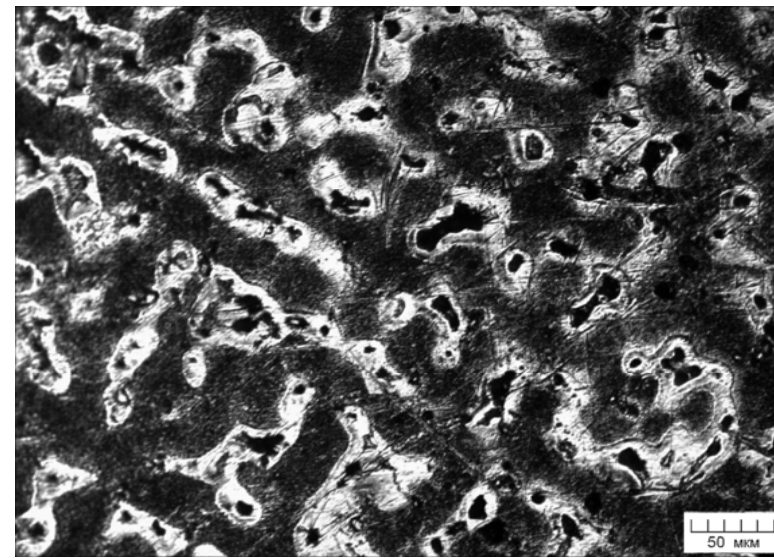


Рис. 7.4. Бронза БрОФ10-1 литая после деформации и отжига

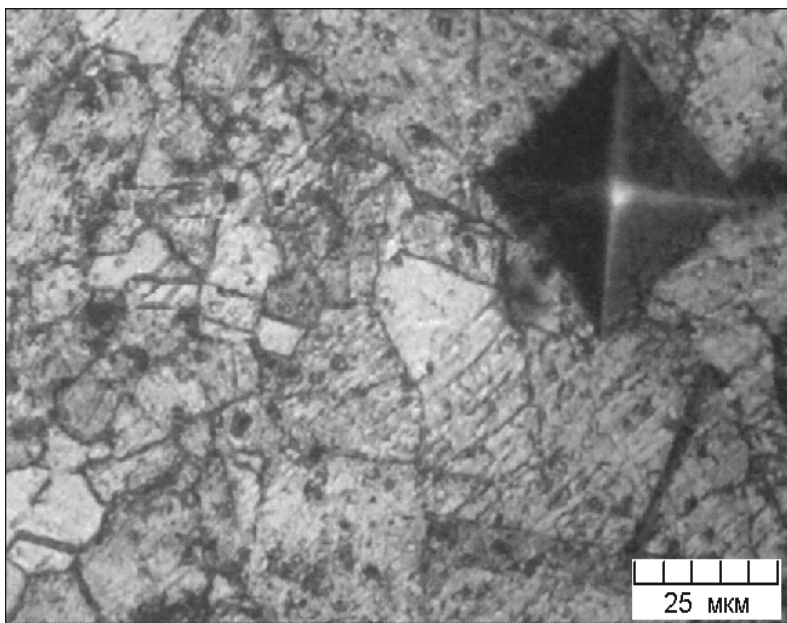


Рис. 7.5. Бронза БрБ2 после горячей деформации и отжига

## 8. МИКРОСТРУКТУРЫ ПОДШИПНИКОВЫХ СПЛАВОВ

---

### 8.1. Основные сведения о подшипниковых сплавах

В машиностроении для изготовления подшипников скольжения широкое применение получили *антифрикционные материалы* — сплавы на основе алюминия, меди, свинца, олова, которые называют *подшипниковыми сплавами*.

*Антифрикционность* — способность материала обеспечивать низкие коэффициент трения скольжения и потери на трение, невысокую скорость изнашивания (пара «вал – вкладыш»). Антифрикционные материалы должны обеспечивать: 1) достаточную твердость; 2) пластичность; 3) удержание смазки; 4) малый коэффициент трения; 5) хорошую теплопроводность; 6) невысокую температуру плавления; 7) устойчивость против коррозии.

Для создания необходимых свойств подшипниковые сплавы должны иметь гетерогенную структуру, состоящую из мягкой и пластичной основы с твердыми включениями.

*Баббиты*. Легкоплавкие мягкие сплавы на основе свинца, сурьмы, олова, цинка или алюминия (твердость до 30НВ), применяемые для изготовления подшипников скольжения, называют баббитами. Из подшипниковых сплавов применяют баббиты систем Pb – Sb, Sb – Sn, Pb – Sn – Sb, а также сплавы на основе цинка (с добавками меди и алюминия) и алюминия (с добавками меди, никеля, сурьмы). Они обладают хорошими антифрикционными свойствами, хорошо прирабатываются, но имеют низкое сопротивление усталости. Распространенными баббитами на основе олова являются сплавы Б83, Б88. Применяются в подшипниках турбонасосов, тяжело нагруженных машин.

Свинцовые баббиты Б16, БН, БС6 используются в машинах средней нагруженности.

## 8.2. Микроструктуры баббитов

Микроструктура оловянистых баббитов состоит из мягкой основы (раствора сурьмы в олове) и равномерно распределенных в ней твердых частиц химического соединения SnSb (рис. 8.1, 8.2). Сурьма упрочняет мягкую основу баббитов и создает включения высокой твердости. Добавка меди дополнительно увеличивает твердость оловянистых баббитов за счет образования твердых включений  $Cu_5Sn_5$ .

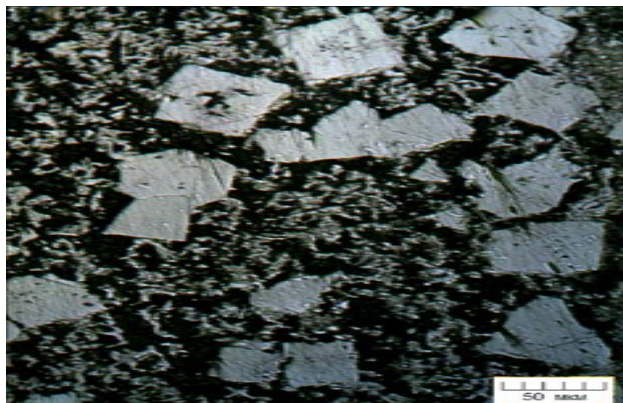


Рис. 8.1. Микроструктура баббита Б83 (нетравленная): мягкая основа (раствор сурьмы в олове) и равномерно распределенные в ней твердые частицы химического соединения SnSb

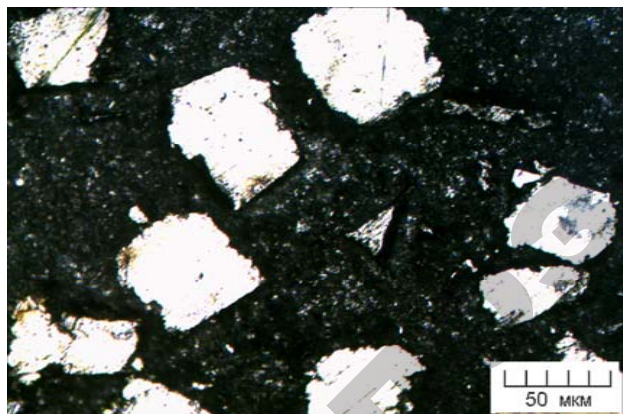


Рис. 8.2. Микроструктура баббита Б83 (после травления): мягкая темная основа (раствор сурьмы в олове) и равномерно распределенные в ней светлые твердые частицы химического соединения SnSb

## 9. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ МИКРОАНАЛИЗА

Изучение микроструктуры черных и цветных металлов и их сплавов предполагает выполнение ряда практических задач микроструктурного анализа (определение величины зерна, количества углерода и т. д.).

### 9.1. Изучение структуры и фазового состава сталей и чугунов

С помощью микроструктурного анализа можно определить в равновесном или в неравновесном состоянии находится железоуглеродистый сплав. Структура сталей и чугунов в равновесном состоянии определяется содержанием углерода согласно диаграмме состояния сплавов «железо-углерод». При содержании углерода в железоуглеродистых сплавах до 0,025 % микроструктура представляет собой феррит (технически чистое железо) в виде светлых зерен с темными границами. При увеличении содержания углерода свыше 0,025 % в стали образуется перлит. Количество перлита возрастает пропорционально увеличению содержания углерода, а количество феррита уменьшается (рис. 2.1, 2.4–2.7). При воздействии травящего реактива на поверхность микрошлифа зерна перлита травятся интенсивнее, чем зерна феррита. Поэтому при рассмотрении перлит имеет вид темных включений неоднородного строения. Вследствие значительной дисперсности строение перлита можно различить при увеличении более, чем в  $\times 500$ .

В стали перлит, в основном, имеет пластинчатое строение (рис. 2.3). Существует перлит зернистого строения, получаемый в результате отжига стали на зернистый перлит (рис. 2.8). При содержании углерода свыше 0,8 % структура стали состоит из перлита и цементита (рис. 2.9).

При изучении микроструктур выбор увеличения производится в зависимости от конкретной структуры железоуглеродистых сплавов. Если в стали присутствуют мелкие карбиды, просмотр микро-

структуры при увеличении в  $\times 100$  дает отчетливое представление о характере их распределения (карбидной полосчатости). Увеличение до  $\times 500$  позволяет определить размеры и форму отдельных карбидных включений.

Микроанализ выявляет структуры сплавов в неравновесном состоянии. С помощью этого метода отчетливо фиксируются структурные составляющие, образующиеся в результате фазовых превращений, например, при нагреве выше критических температур и быстром охлаждении сталей. При выявлении после закалки в структуре сталей мелко- и крупнокристаллического мартенсита необходимы большие увеличения (от  $\times 1000$  и более).

## 9.2. Определение структуры и фазового состава цветных металлов

Структура цветных металлов в равновесном состоянии определяется согласно диаграммам состояния изучаемых сплавов соответствующего состава.

При изучении микроструктур выбор увеличения производится в зависимости от конкретной структуры сплавов.

В технически чистых металлах и однофазных сплавах после пластической деформации и последующего отжига микроструктура состоит из одинаковых по форме зерен (равноосных полиэдров, например, однофазные латуни, рис. 7.2).

В равновесном состоянии в многофазных сплавах наряду с эвтектикой можно выявить избыточные фазы. Избыточная фаза, кристаллизующаяся из жидкого расплава, имеет форму крупных включений, что связано с особенностями роста избыточной фазы в процессе затвердевания сплава (рис. 6.3).

Избыточные фазы, выделяющиеся из твердого раствора, имеют разнообразную форму, например, игольчатую полиэдрическую, зернистую или в виде сетки по границам зерен.

## 9.3. Определение характера обработки металлов

Способ обработки металлов значительно влияет на их микроструктуру и свойства. Во многих случаях микроанализ проводят одновременно с макроструктурным анализом. Последний характеризует

строение сплава на больших участках, а микроструктурный анализ выявляет только подробности структуры.

Посредством микроанализа можно определить, каким образом получен изучаемый сплав (или деталь), какой предварительной обработке подвергался. В частности, он позволяет выявить, находится ли железоуглеродистый сплав в литом состоянии или подвергался обработке давлением, термической обработке. В литом состоянии технически чистое железо и однофазные сплавы (твердые растворы) имеют характерную дендритную структуру.

После пластической деформации и последующего отжига микроструктура состоит из одинаковых по форме зерен (равноосных полиэдров, например, однофазные аустенитные стали, рис. 2.2).

Если фазы и зерна имеют не вытянутую форму, а округленные очертания, то железоуглеродистый сплав находится в литом состоянии. В том случае, когда участки перлита и феррита оказываются вытянутыми, это является признаком предварительной деформации стали.

Литые цветные металлы и однофазные сплавы (твердые растворы) имеют также характерную дендритную структуру (рис. 6.4). Многофазные, например, двухфазные, сплавы имеют более сложную структуру, состоящую из различного сочетания фаз в виде эвтектики, эвтектоида и т. д. В сплавах, не соответствующих по химическому составу эвтектической концентрации, появляются избыточные фазы.

При наличии неметаллических включений их округленная форма является признаком отсутствия предварительной деформации металла, т. е. он получен литьем. При вытянутой форме зерен и неметаллических включений — сплав подвергался холодной пластической деформации.

При помощи микроанализа во многих случаях можно определить, какой термической обработке подвергался сплав. Для этого сравнивают изучаемую микроструктуру с той, которой должен он обладать согласно диаграмме состояния. Если сплав подвергали дополнительной термической обработке, то у него будет структура отличающаяся от равновесной.

Значительное повышение температуры нагрева стали под закалку приводит к росту аустенитного зерна, что усиливает ее хрупкость. Укрупнение зерна стали, происходящее при высокотемпературном нагреве, вызывает также увеличение размеров кристаллов мартенсита, который образуется в процессе закалочного охлаждения.

Микроанализ позволяет также определить скорость охлаждения при закалке сталей по образующейся структуре.

В промышленности широко применяются процессы химико-термической обработки, изменяющие химический состав поверхностного

слоя стали путем насыщения его углеродом (цементация), азотом (азотирование) или металлами (диффузионная металлизация). Микроанализ позволяет определить глубину диффузионного слоя и примерную концентрацию насыщающего элемента в отдельных слоях.

#### 9.4. Определение величины зерна металлов и сплавов

Сплавы, имеющие более мелкие зерна, обладают лучшими механическими свойствами прочностью, твердостью, пластичностью и вязкостью. Размеры зерна зависят от состава и технологических процессов изготовления сплава (условий выплавки, разливки, обработки давлением, термической обработки и т. п.) и могут отличаться даже в разных плавках одного и того же химического состава. Поэтому во многих случаях необходимо экспериментальное определение их размеров.

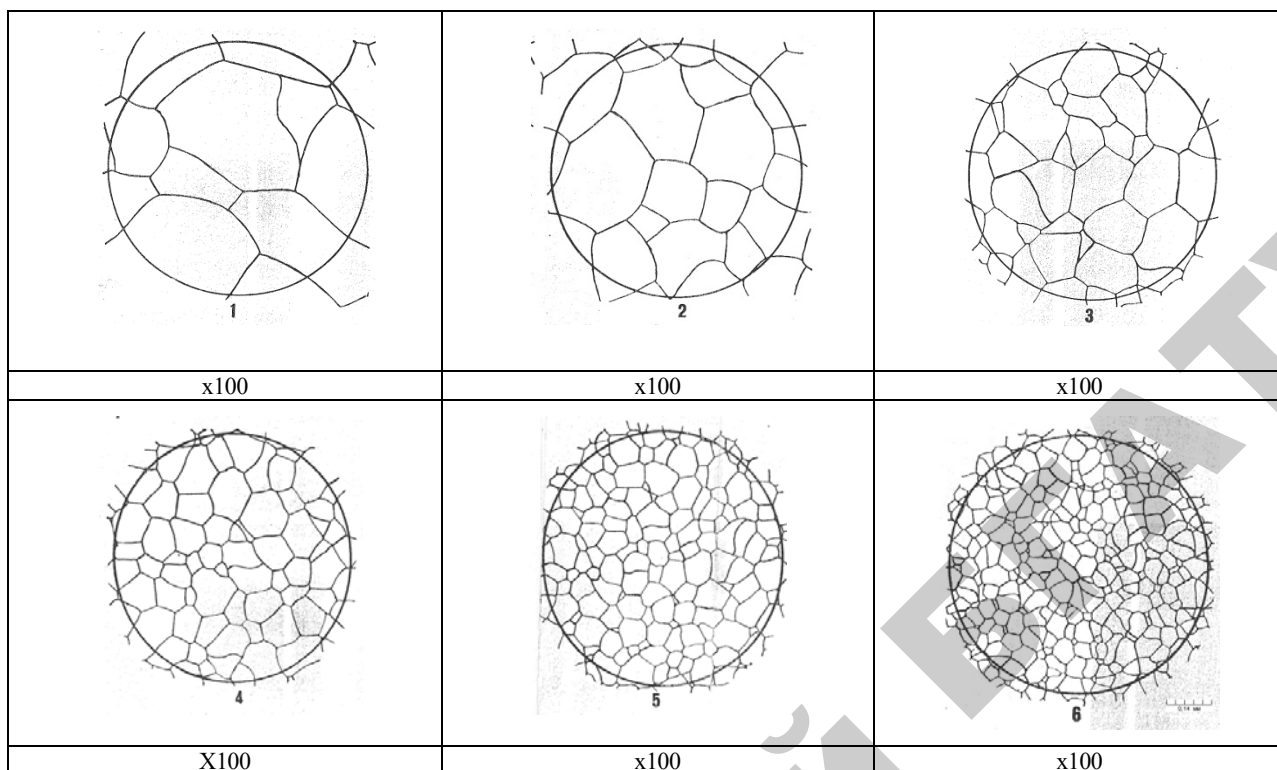
В соответствии с ГОСТ 5639-82 «Методы выявления и определения величины зерна» величину зерна определяют при увеличении  $\times 100$ . После просмотра всей площади шлифа выбирают несколько типичных мест и визуально сравнивают с эталонами. Эталоны приведены в виде круга диаметром 79,8 мм, что соответствует площади 5000 мм<sup>2</sup> или натуральной площади на шлифе 0,5 мм<sup>2</sup> (рис. 9.1). Шкалы ГОСТ 5639-82 «Методы выявления и определения величины зерна» используются для оценки величины зерна во всех сталях и сплавах. Указанный метод применяется для оценки величины зерна, имеющего форму, близкую к равноосной.

Фотографию структуры исследуемого образца сравнивают с эталонными структурами (ГОСТ 5639-82). При сравнении можно определить номер балла зерна, который однозначно определяет среднюю величину зерна.

Для примера на рисунке 9.2 приведено визуальное сравнение образцов стали ферритного класса со шкалой ГОСТ 5639-82. Для этого представлена структура образцов при  $\times 100$  и фрагменты шкал ГОСТ 5639-82 в натуральную величину. В таблице 9.1 приведены результаты определения балла зерна в исследуемой стали, полученные методом визуального сравнения.

Стандартные шкалы ГОСТ 5639-82 «Методы выявления и определения величины зерна»

06



16

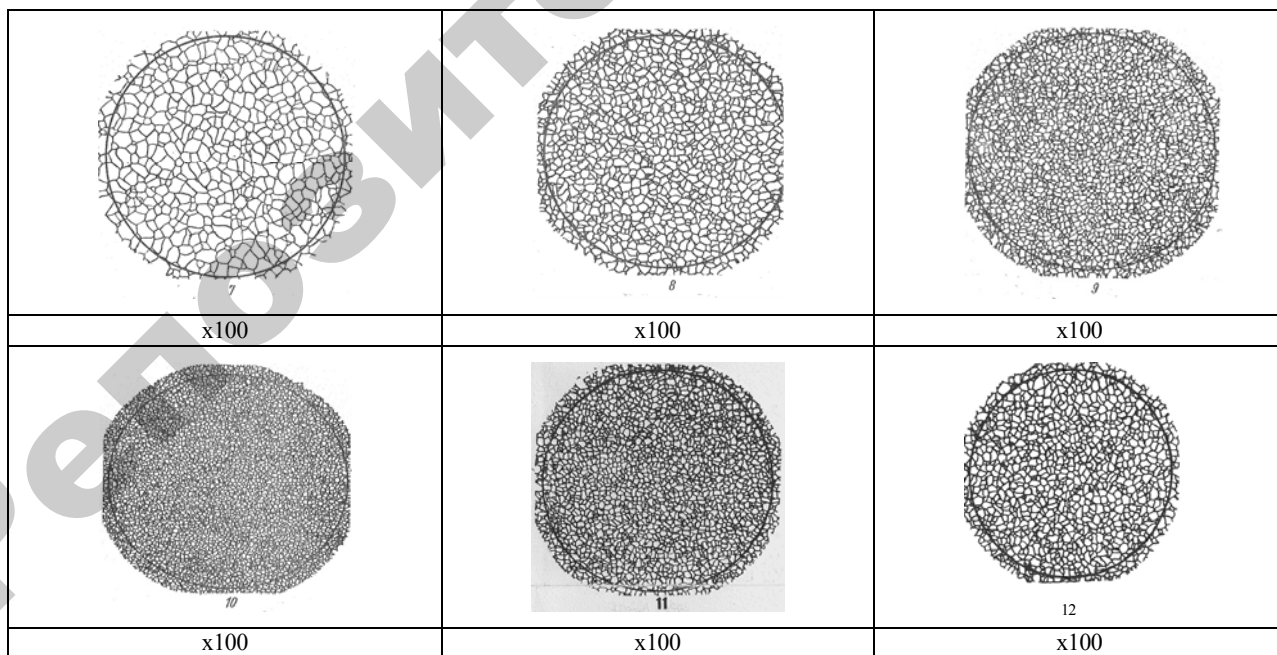


Рис. 9.1. Шкала размеров зерна конструкционной стали  
(цифры под каждым кругом — номер зерна)

Баллы зерна образцов стали ферритного класса, полученные методом визуального сравнения

Номер образца	Номер балла феррита	Средний диаметр зерна, мм
1	8	0,022
2	7	0,031
3	5	0,062
4	3	0,125
5	1	0,250

Для автоматизации определения числа зерен и их размеров применяют специальные микроскопы (например, металлографический микроскоп «Микро-200»), оснащенные компьютерными приставками и цифровыми видео- и фотокамерами, позволяющими в автоматическом режиме выполнять необходимые расчеты и выдавать соответствующую информацию в виде графических зависимостей или таблиц.

### 9.5. Определение содержания углерода в углеродистых сталях

Определение содержания углерода в углеродистых сталях проводят путем исследования микроструктуры на металлографическом микроскопе при заданном увеличении на микрошлифах после травления.

В основе метода лежит то, что содержание углерода при комнатной температуре в феррите составляет только 0,006 %, а в перлите — 0,8 %. Практически весь углерод находится в перлите. Если определить, какую площадь на шлифе от всей площади в процентах занимает перлит, то можно вычислить количество углерода в данном образце стали.

Микроструктура доэвтектоидной стали приведена на рисунке 9.3, а, а ее схематическое изображение — на рисунке 9.3, б.

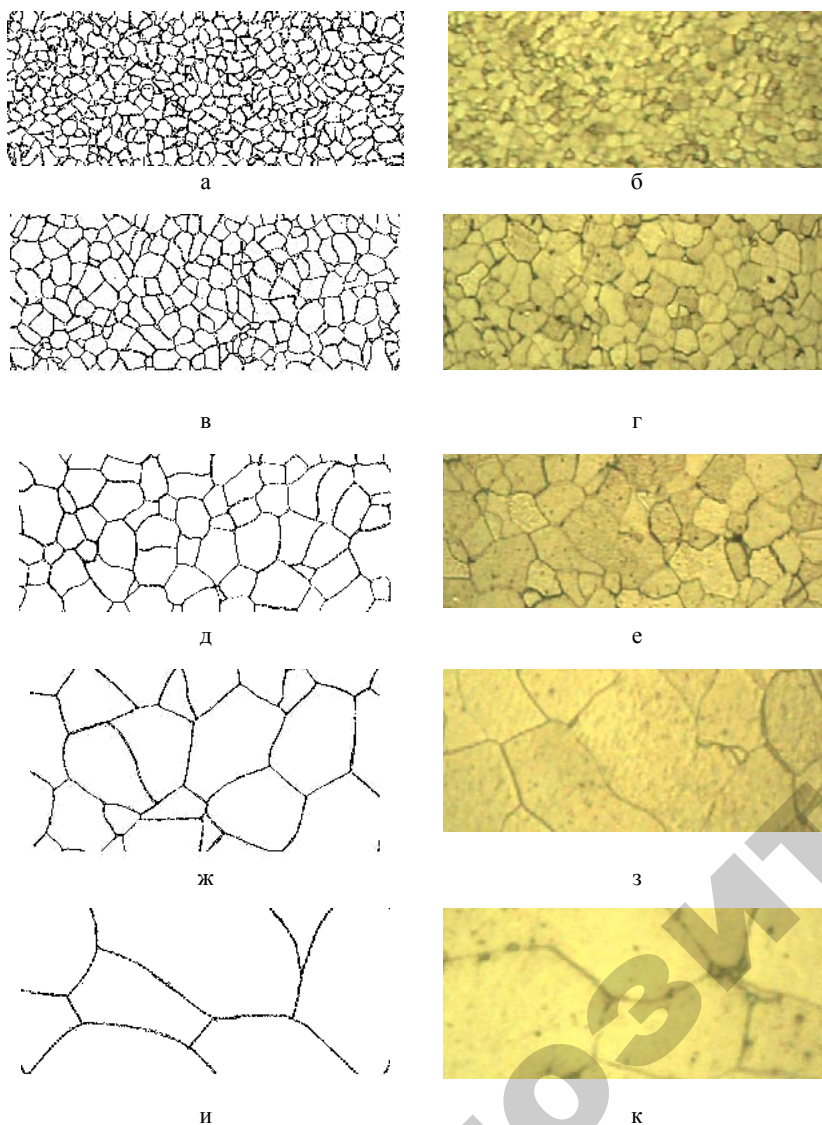


Рис. 9.2. Сравнение с эталонной шкалой феррита: а, в, д, ж, и – шкалы по ГОСТ 5639-82; б, г, е, з, к – микроструктура образцов стали  $\times 100$ , феррит

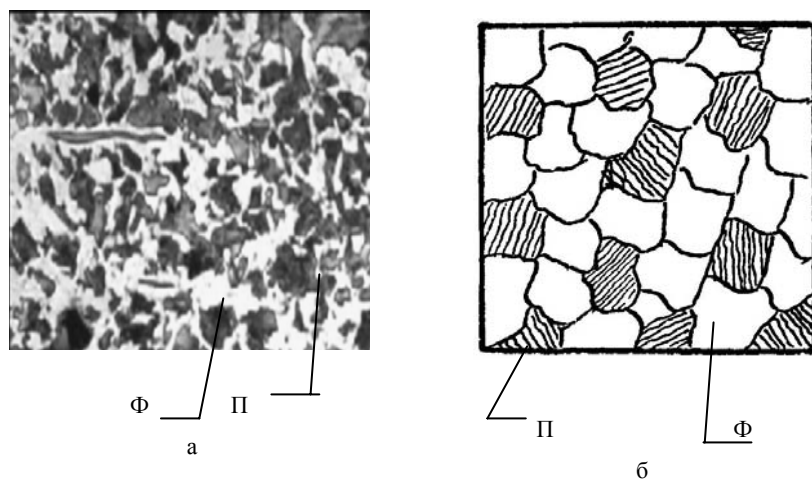


Рис. 9.3. Микроструктура углеродистой доэвтектоидной стали  $\times 200$  (а) и ее схематическое изображение (б)

На фотографии микроструктуры определяют площадь, занимаемую перлитом (суммарная площадь всех заштрихованных участков на рис. 9.3, б). По количественному соотношению площадей перлита и феррита (процент темных и светлых зерен, рис. 9.3, а) вычисляют содержание углерода в доэвтектоидной стали по формуле:

$$\% C = 0,8 \text{ П} / 100. \quad (4)$$

На рисунке 9.3 отчетливо видно, что площадь темных зерен перлита в изучаемой углеродистой стали занимает примерно 40 %. Для определения содержания в ней углерода составляют пропорцию:

$$\begin{aligned} \text{перлит } 100 \% &- 0,8 \% C; \\ \text{перлит } 40 \% &- X \% C. \end{aligned}$$

$$\text{Тогда } X = \frac{0,8 \cdot 40}{100} \% C = 0,32 \% ,$$

что соответствует марке стали 30.

Аналогичным образом с учетом содержания углерода в цементите (6,67 % C) по относительному количеству площадей, занимаемых пер-

литом (П) и цементитом (Ц) в процентах определяют содержание углерода в заэвтектоидной стали и белом чугуна:

$$\% C = 0,8 \text{ П} / 100 + 6,67 \text{ Ц} / 100. \quad (5)$$

Эти уравнения позволяют решить и обратную задачу — определить содержание структурных составляющих, если известно содержание углерода. При этом сумма площадей структурных составляющих, занимаемых ферритом, перлитом, цементитом (в процентах соответственно к общей площади микрошлифа), принимается равной 100 %.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

---

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев, А. П. *Металловедение : учебник для вузов / А. П. Гуляев.* – Изд. 6-е, перераб. и доп. – Москва : Металлургия, 1986. – 544 с.
2. Андрушевич, А. А. *Материаловедение : учебно-методический комплекс / А. А. Андрушевич, Т. К. Романова.* – Минск : БГАТУ, 2008. – 192 с.
3. 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. – Москва : изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 648 с.
4. Лахтин, Ю. М. *Материаловедение : учебник для вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева.* – Изд. 3-е, перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1990. – 528 с.
5. Андрушевич, А. А. *Материаловедение и технология конструкционных материалов. Материаловедение : лабораторный практикум / А. А. Андрушевич [и др.].* – Минск : БГАТУ, 2009. – 180 с.
6. Худокормова, Р. Н. *Материаловедение. Лабораторный практикум : учебное пособие для вузов / Р. Н. Худокормова, Ф. И. Пантелеенко.* – Минск : Высшая школа, 1988. – 224 с.
7. Геллер, Ю. А. *Материаловедение : учебное пособие для высш. учебн. заведений / Ю. А. Геллер, А. Г. Рахштадт.* – Изд. 4-е, доп. и перераб. – Москва : Металлургия, 1975. – 448 с.
8. Колачев, Б. А. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов / Б. А. Колачев, В. А. Ливанов, В. И. Елагин.* – Москва : Металлургия, 1981. – 416 с.
9. Силумины. *Атлас микроструктур и фрактограмм : справочник.* – Москва : МИСИС, 1996. – 178 с.
10. Мальцев, В. М. *Металлография промышленных цветных металлов / В. М. Мальцев.* – Москва : Металлургия, 1970. – 426 с.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Арзамасов, В. Б. *Материаловедение : учебник для вузов / В. Б. Арзамасов, А. А. Черепашин.* – Москва : изд-во «Экзамен», 2009. – 350 с.
2. Фетисов, Г. П. *Материаловедение и технология металлов : учебник для вузов / Г. П. Фетисов [и др.].* – Москва : Высшая школа, 2005. – 861 с.
3. Ржевская, С. В. *Материаловедение : учебник для вузов / С. В. Ржевская.* – Изд. 4-е, перераб. и доп. – Москва : Логос, 2004. – 424 с.
4. Капцевич, В. М. *Материаловедение и технология конструкционных материалов : методические указания к лабораторным работам для студентов заочной формы обучения / В. М. Капцевич [и др.].* – Минск : БГАТУ, 2008. – 105 с.
5. *Энциклопедический справочник термиста-технолога. В 3-х томах.* – Москва : Наука и технологии, 2004. – 1704 с.
6. *Металлография железа. В 3-х томах. Том 1. Основы металлографии (с атласом микрофотографий). Перевод с англ.* – Москва : Металлургия, 1972. – 240 с.
7. *Металлография железа. В 3-х томах. Том 2. Структура сталей (с атласом микрофотографий). Перевод с англ.* – Москва : Металлургия, 1972. – 284 с.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

РЕПОЗИТОРИЙ БГАТУ

Учебное издание

## АТЛАС МИКРОСТРУКТУР ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

*Учебное наглядное пособие*

Составители:

**Андрушевич** Андрей Александрович,  
**Анисович** Анна Геннадиевна,  
**Романова** Татьяна Константиновна и др.

Ответственный за выпуск В. М. Капцевич  
Редактор Н. А. Антипович  
Компьютерная верстка А. И. Стебули

Подписано в печать 06.03.2012. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 5,81. Уч.-изд. л. 4,54. Тираж 130 экз. Заказ 78.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный аграрный технический университет»  
ЛП № 02330/0552984 от 14.04.2010.  
ЛП № 02330/0552743 от 02.02.2010.  
Пр. Независимости, 99–2, 220023, Минск.