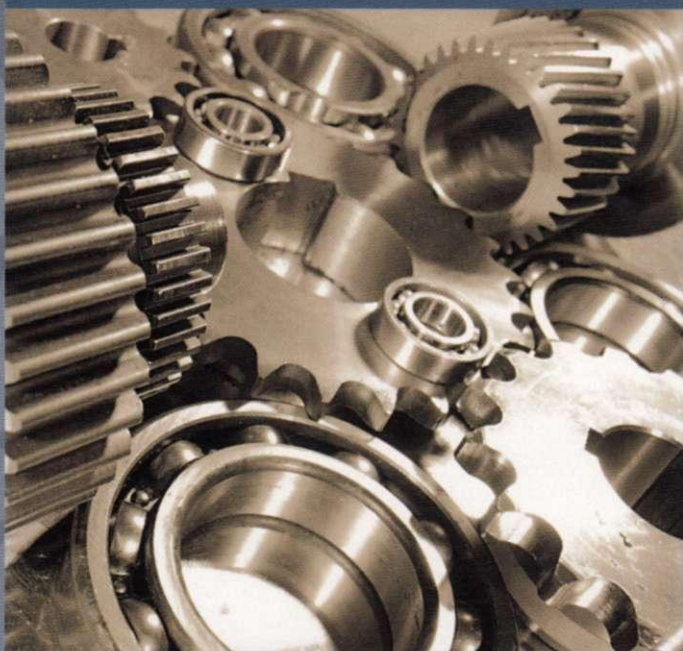


621.7
С59
50

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ

Учебное пособие



Е. Н. Соколова, А. О. Борисова,
Л. В. Давыденко



МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
Лабораторный практикум

• Е. Н. СОКОЛОВА, А. О. БОРИСОВА, Л. В. ДАВЫДЕНКО

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Рекомендовано

Федеральным государственным автономным учреждением

«Федеральный институт развития образования»

в качестве учебного пособия для использования

в образовательном процессе образовательных организаций,

реализующих программы среднего профессионального образования

по специальностям «Мехатроника и мобильная робототехника (по отраслям)»,

«Монтаж, техническое обслуживание и ремонт промышленного оборудования

(по отраслям)», «Оснащение средствами

автоматизации технологических процессов и производств

(по отраслям)»

Регистрационный номер рецензии 211

от 20 июня 2017 г. ФГАУ «ФИРО»



Москва
Издательский центр «Академия»
2017

УДК 620.22(075.32)
ББК 30.3я722
С549

Рецензент —
зав. лабораторией ЦКО Колледжа многоуровневого профессионального
образования Академии народного хозяйства
при Правительстве Российской Федерации А. А. Соломахкин

Соколова Е.Н.

С549 Материаловедение : Лабораторный практикум : учеб. по-
собие для студ. учреждений сред. проф. образования /
Е.Н. Соколова, А.О. Борисова, Л.В. Давыденко. — М. : Изда-
тельский центр «Академия», 2017. — 128 с.
ISBN 978-5-4468-5799-9

Учебное пособие подготовлено в соответствии с требованиями Феде-
рального государственного образовательного стандарта среднего профес-
сионального образования по специальностям укрупненной группы «Маши-
ностроение», в том числе по специальностям из списка ТОП-50. Учебное
издание предназначено для изучения общепрофессиональной дисциплины
«Материаловедение».

Описаны методика и практика проведения лабораторных работ и прак-
тических занятий по материаловедению, предложены работы по проведе-
нию испытаний образцов на твердость и на разрыв, а также на изучение
структуры стали, в том числе и после термообработки.

Для студентов образовательных учреждений среднего профессиональ-
ного образования.

УДК 620.22(075.32)
ББК 30.3я722

~~Оригинал-макет подготовлен в Издательском центре «Академия» и является собственностью
Издательского центра «Академия». Любое использование любым способом
без согласия правообладателя запрещается~~

ISBN 978-5-4468-5799-9

© Соколова Е. Н., Борисова А. О., Давыденко Л. В., 2017
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2017
© Сформация. Издательский центр «Академия», 2017

Уважаемый читатель!

Вы держите в руках учебное пособие, которое было подготовлено Издательским центром «Академия» в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом (ФГОС) в рамках реализации комплексного проекта подготовки кадров по 50 наиболее востребованным на рынке труда, новым и перспективным профессиям и специальностям среднего профессионального образования.

Одной из задач проекта является обновление содержания профессионального образования с учетом профессиональных стандартов, современных методик и технологий. При разработке ФГОС также учитывались требования международных конкурсов профессионального мастерства, включая чемпионаты «Молодые профессионалы» (WorldSkills и WorldSkills Russia).

Издательский центр «Академия» является лидером по выпуску учебных материалов для СПО в Российской Федерации. Более двадцати лет наши издания помогают студентам овладеть знаниями, умениями и навыками по рабочим профессиям и специальностям. Стремясь идти в ногу со временем, издательство предлагает не только печатные издания, но и электронные учебники, электронные учебно-методические комплексы и виртуальные практикумы.

Интерактивная форма подачи информации с учетом последних методик и тенденций в преподавании — отличительная особенность и визитная карточка Издательского центра «Академия» на российском рынке.

Мы надеемся, что данное учебное пособие будет полезно студентам, облегчит задачу преподавателей, а также поможет специалистам, которые стремятся расти и развиваться в выбранной ими области, достичь новых профессиональных вершин.

Лабораторные работы по дисциплине «Материаловедение» рекомендуется проводить сразу же после изучения одноименных тем. Работы целесообразно проводить в отдельной лаборатории на стационарных установках, предназначенных для испытания материалов. Используемые электрические схемы необходимо собирать до начала занятий, чтобы сэкономить время студентов.

За несколько дней до начала цикла лабораторных работ необходимо ознакомить студентов с графиком проведения лабораторных работ и последовательностью их выполнения. График должен быть доступен для ознакомления.

При подготовке к выполнению лабораторной работы студентам необходимо ознакомиться с ее содержанием по настоящему пособию. Кроме того, они должны повторить соответствующий теоретический материал по учебному пособию, рекомендуемому преподавателем.

Перед проведением лабораторных работ необходимо ознакомить студентов с правилами техники безопасности. На протяжении всего цикла работ студенты должны строго соблюдать их, особенно при работе на установках высокого напряжения. Часть установки с высоким напряжением должна иметь заземленное ограждение, исключающее случайное прикосновение к ней.

Студенты должны соблюдать следующие правила выполнения работ:

1. Входить в лабораторию только с преподавателем.
2. Занимать рабочие места в соответствии с графиком выполнения лабораторных работ.
3. Не уходить с рабочего места без разрешения преподавателя.
4. При себе иметь рабочую тетрадь для записи плана выполнения лабораторных работ, перечня необходимых приборов и оборудования, расчетных формул, вычерчивания схем и таблиц с результатами испытаний материалов.
5. После получения задания еще раз внимательно ознакомиться с работой, проработать теоретический материал к заданию,

вычертить схему испытательной установки и подготовить устные объяснения по схеме.

6. Установить, какие контакты приборов и аппаратов соответствуют тем или иным точкам электрической схемы и в какие положения должны быть поставлены движки реостатов и рукоятки регулирующих и выключающих устройств. Убедиться в надежности закрепления образцов в испытательной установке.

7. Перед началом работы проверить исправность заземляющего провода и наличие ограждения частей, находящихся под высоким напряжением.

8. Не включать электрические установки без разрешения преподавателя.

9. После подачи высокого напряжения не касаться проводов, даже если они изолированы.

10. Получив разрешение от преподавателя на включение схемы, студент, включающий напряжение, должен предупредить работающих рядом командой «Включаю».

11. В случае работы с аппаратами, имеющими конденсаторы, после снятия напряжения разрядить конденсаторы коротким замыканием обкладок и заземлить их при помощи специального приспособления, соединенного гибким проводом с заземляющим устройством.

12. Окончив работу, сдать отчет преподавателю, привести в порядок рабочее место и только с разрешения преподавателя покинуть лабораторию. **Студенты, не сдавшие отчет по выполненной лабораторной работе, к последующим работам не допускаются.**

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Знание правил техники безопасности при работе в лаборатории является обязательным для каждого студента, приступающего к выполнению лабораторных работ. Студент может быть допущен к работе только после прохождения инструктажа по технике безопасности с последующей росписью в специальном журнале, которая означает, что он ознакомлен с правилами техники безопасности и обязуется их выполнять.

1. Электрический ток напряжением свыше 40 В опасен для жизни, а напряжением 220...380 В вызывает тяжелую травму или смерть. Все приборы, печи и установки лаборатории включены в сеть напряжением 220 или 380 В.

2. При выполнении работ с электрооборудованием категорически запрещается:

- прикасаться к электрическим проводам, зажимам, клеммам;
- класть посторонние предметы на кожухи рубильников, щитов, электропечей, на реостаты и другое электрооборудование;
- самовольно включать и выключать пусковые устройства приборов и оборудования;
- открывать для осмотра электрические щиты, выключатели, рубильники, реостаты и т.д.;
- отсоединять провода термомпары от гальванометра;
- производить какие-либо исправления электропроводов, арматуры, электроприборов, инструмента и т.д.

3. О замеченных неисправностях электрооборудования немедленно сообщать преподавателю или лаборанту.

4. Полировку микрошлифа на полировальном станке выполнять только при наличии ограждения на полировальном круге.

5. Химические реактивы получать у лаборанта. При выполнении работ пользоваться пинцетом.

С реактивами, выделяющими вредные газы, работать только в вытяжном шкафу. Приступая к работе, внимательно изучить по руководству порядок работы с данным реактивом, методику нанесения его на поверхность металла.

После выполнения работы следует тщательно вымыть руки.

6. При выполнении работ с химическими реактивами запрещается:

- опускать в реактив пальцы;
- самовольно выбирать реактив;
- переливать реактив из одной посуды в другую.

7. При определении твердости на твердомерах ТШ (пресс Бри-нелля) или ТК (пресс Роквелла) образец подводить так, чтобы шарик или конус не попали на его край. Отпечаток должен получиться на расстоянии 6...7 мм от края образца.

8. При работе на твердомере ТК (пресс Роквелла) подводить образец к конусу очень осторожно, так как при резком толчке вершина конуса может отколоться.

9. Категорически запрещается испытывать образцы, закаленные в воде, на приборе ТШ (пресс Бри-нелля).

10. При работе с печами стоять на резиновом коврике, клещи брать сухими руками. Запрещается прикасаться руками к корпусу печей.

11. Класть образцы в печь и вынимать их из печи только сухими, без следов масла, клещами.

12. Извлеченные из печи раскаленные образцы класть только на специальные листы. Запрещается касаться руками вынутых из печи образцов — в термическом отделении все образцы горячие.

13. При закалке образец быстро вынуть из печи и перенести в охлажденную жидкость. Образец, крепко удерживаемый щипцами, полностью погрузить в жидкость и охладить, быстро перемещая его круговыми движениями. Запрещается бросать образец на дно закалочной ванны.

14. При закалке в масляной ванне внимательно следить за тем, чтобы образец был полностью погружен в масло, в противном случае масло может загореться.

15. При выполнении работ с расплавленными солями запрещается работа без очков.

16. Перед опусканием образца в расплавленную соль необходимо выключить печь.

17. Образцы следует брать только сухими клещами. Категорически запрещается вносить в расплавленную соль влажные образцы или клещи — это может привести к выбросу соли!

18. Приступая к закалке образцов в расплавленной соли, удалить с рабочего места всех посторонних.

19. В случае непредвиденного прекращения подачи электроэнергии немедленно отключить все оборудование и приборы.

20. К работе приступать, лишь получив разрешение преподавателя или лаборанта. Об окончании работы ставить их в известность.

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ СТАЛИ ПРИ ПОМОЩИ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО МИКРОСКОПА ММР-1

Цель работы — освоить приемы работы с металлографическим микроскопом ММР-1.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Металлографический микроскоп ММР-1 (рис. 1.1) предназначен для исследования микроструктуры металлов и других непрозрачных объектов в светлом поле при прямом и косом освещении, в темном поле и поляризованном свете.

Микроскоп обеспечивает возможность визуального наблюдения объектов в бинокулярную насадку и на демонстрационном экране (табл. 1.1), фотографирование объектов на фотопластинку 9×12 см или на пленку с размером кадра 24×36 мм (табл. 1.2).

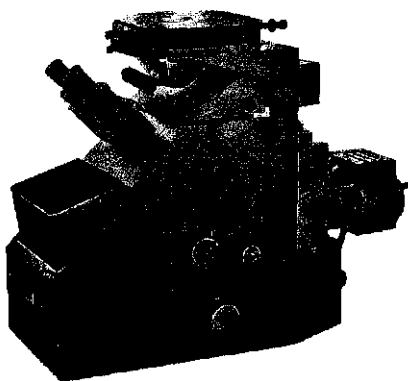


Рис. 1.1. Металлографический микроскоп ММР-1

Таблица 1.1. Увеличение микроскопа и поле в плоскости объекта при визуальном наблюдении

Объективы	Окуляры					
	12,5 ^x		15 ^x		20 ^x	
	Увели- чение, крат.	Поле, мм	Увели- чение, крат.	Поле, мм	Увели- чение, крат.	Поле, мм
$F = 23,2; A = 0,17$	100	1,9	130	1,3	170	1,0
$F = 8,2; A = 0,37$	300	0,6	370	0,5	490	0,4
$F = 6,3; A = 0,65$	400	0,5	490	0,3	650	0,3
$F = 4,3; A = 0,95$	580	0,3	700	0,2	930	0,2

Таблица 1.2. Увеличение микроскопа при фотографировании

Объективы	На фотопластинку 9 × 12 см			На фотопленку 24 × 36 мм		
	Окуляры					
	12,5 ^x	15 ^x	20 ^x	12,5 ^x	15 ^x	20 ^x
$F = 23,2; A = 0,17$	—	100	—	52	62	87
$F = 8,2; A = 0,37$	—	300	400	146	176	246
$F = 6,3; A = 0,65$	—	400	—	195	234	328
$F = 4,3; A = 0,95$	500	—	800	279	335	469

Технические характеристики микроскопа

Размер демонстрационного экрана, см 9 × 12

Размер фотопластинки, см 9 × 12

Размеры кадра фотопленки, мм 24 × 36

Механизм микрометрической фокусировки:

расход механизма, мм 2,5

цена деления шкалы, мм 0,002

Предметный столик:

пределы перемещений в двух взаимно-
перпендикулярных направлениях, мм 30 × 20

цена делений шкалы, мм 1,0

пределы поворота, ° 0 ... 360

время прохождения точки объекта от одного края

зрения окуляра до другого, с 3 ... 4

величина шага по оси у, мм 0,4; 0,8; 1,2

максимальная нагрузка, кг 5

Габаритные размеры:

микроскопа, мм..... 580 × 250 × 385

пульта управления, мм..... 330 × 250 × 150

Масса:

микроскопа, кг35

пульта управления, кг6,5

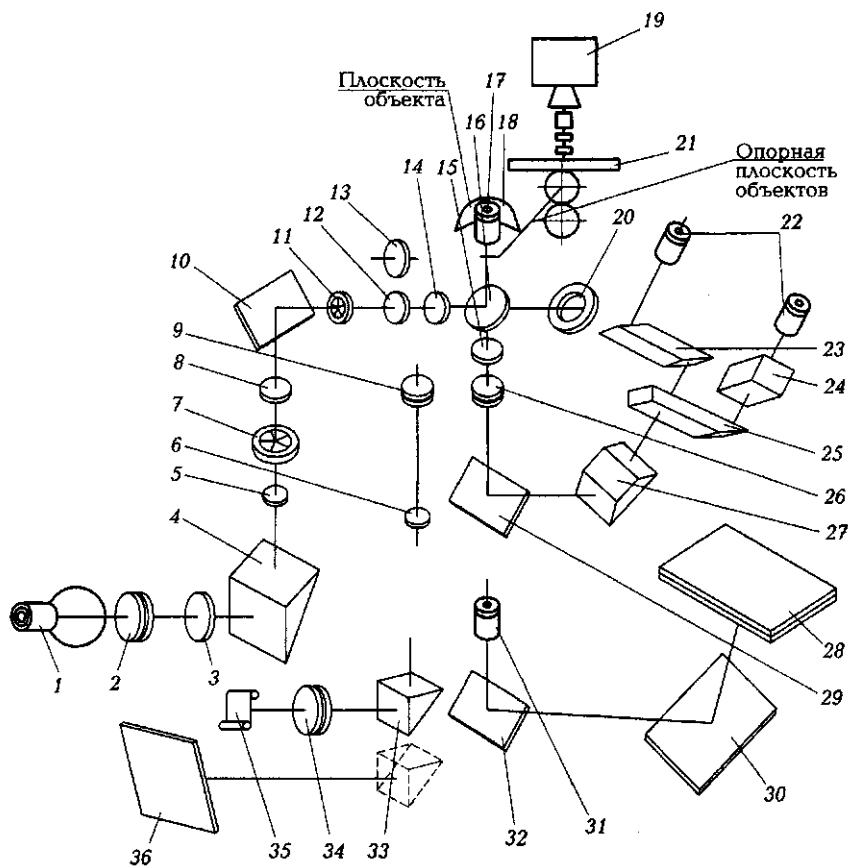


Рис. 1.2. Оптическая схема микроскопа:

1 — лампа; 2 — коллектор; 3 — тепловой фильтр; 4, 23, 24, 25, 27, 33 — призмы; 5 — сменный светофильтр; 6, 9 — телеобъективы; 7 — апертурная диафрагма; 8, 12, 34 — линзы; 10, 29, 30, 32 — зеркала; 11 — полевая диафрагма; 13 — линза темного поля; 14 — поляризатор; 15 — анализатор; 16 — полупрозрачная пластинка; 17 — объектив; 18 — конденсатор; 19, 31 — фотоокуляры; 20 — кольцевое зеркало; 21, 28 — экраны; 22 — бинокулярная насадка; 26 — ахроматическая линза; 35 — пленка; 36 — фотопластинка

Оптическая схема микроскопа. Свет лампы 1 (рис. 1.2) проецируется коллектором 2 и призмой 4 в плоскость апертурной диафрагмы 7. Тепловой фильтр 3 предохраняет оптику от нагрева лампой.

Сменные светофильтры 5 смонтированы на общей планке. Система, состоящая из линзы 8, зеркала 10, линзы 12 и полупрозрачной пластинки 16, проецирует изображение апертурной диафрагмы 7 в выходной зрачок объектива. Изображение полевой диафрагмой 11, линзой 12 и объективом 17 проецируется в плоскость объекта.

Полевая диафрагма служит для ограничения участка наблюдаемого объекта.

Для наблюдения объекта в светлом поле и поляризованном свете полупрозрачная пластинка 16 отклоняет световой луч на 90° , направляя его через объектив 17 на объект, помещенный в фокальную плоскость объективов. Изображение объекта с помощью ахроматической линзы 26 проецируется в фокальную плоскость окуляров.

При визуальном наблюдении зеркало 29 и призма 27 направляют лучи в фокальную плоскость окуляров бинокулярной насадки 22, где образуется изображение объекта.

При наблюдении в поляризованном свете в ход лучей вводятся поляризатор 14 и анализатор 15.

При наблюдении в темном поле вместо линзы 12 и полупрозрачной пластинки 16 в ход лучей включается линза темного поля 13 и кольцевое зеркало 20, направляющее световой пучок на параболическую отражающую поверхность металлического конденсатора 18. Отразившись от конденсатора, лучи концентрируются на объекте.

Далее ход лучей такой же, как и при наблюдении в светлом поле.

При наблюдении изображения объекта на экране 28 ахроматическая линза 26 и зеркало 29 выключаются, в ход лучей вводятся телеобъективы 6 и 9, которые сводят лучи в фокальную плоскость фотоокуляра 31.

Включенный в систему фотоокуляр проецирует с помощью зеркал 32, 20 изображение объекта на экран 28.

Общее увеличение микроскопа равно произведению увеличения объектива и увеличения окуляра, значения которых указаны на металлических оправках. Окуляр называется линза, обращенная к глазу наблюдателя. Числовой апертурой называется произведение показателя преломления среды, находящейся между

предметом и объективом, на синус половины угла, который образуется двумя крайними лучами, проходящими в объектив:

$$A = n \sin \frac{\alpha}{2},$$

где A — апертура; n — показатель преломления среды (для воздуха $n = 1$); α — отверстиевый угол объектива (угол раскрытия объектива).

Разрешающая способность микроскопа — это наименьшее расстояние между двумя точками, при котором они четко и отдельно видны через объектив. Апертура связана с разрешающей способностью:

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

или

$$d = \frac{\lambda}{2A},$$

где d — максимальная разрешающая способность оптической системы; λ — длина световой волны; A — апертура.

Приготовление микрошлифов осуществляют в несколько стадий, на которых используется шлифовальная бумага различных номеров с уменьшающимся размером абразивных частиц. Шлифование осуществляется вручную или автоматически на специальных станках. При переходе на другой, более тонкозернистый материал образец поворачивают на 90° и шлифовку продолжают до тех пор, пока не будут удалены все риски и царапины, полученные во время предыдущей шлифовки. Шлифованный образец промывают от частиц абразива и полируют.

Полировка — окончательная операция в изготовлении шлифа. Производится на вращающихся или на вибрирующих дисках, обтянутых фетром, сукном или бархатом. В процессе полирования на диск подается суспензия оксида хрома, алюминия или железа. Полирование считается законченным, если удалены все риски и шлиф имеет зеркальную поверхность. В некоторых случаях вместо механического применяется электрохимическое полирование. Для этого образец, являющийся анодом, помещают в электролитическую ванну. Роль катода выполняет пластина из коррозионно-стойкой стали, свинца или другого материала. Суть такого полирования заключается в анодном растворении шероховатостей и выступов поверхности образца, в результате чего поверхность становится зеркальной.

Отполированный образец промывается водой, протирается спиртом и сушится фильтровальной бумагой.

Подготовленный микрошлиф можно исследовать, не подвергая его травлению. При этом изучается наличие и распределение неметаллических включений (графита, сульфидов, оксидов и др.).

Для выявления микроструктуры шлифы подвергают травлению. В качестве травителей чаще применяют слабые спиртовые или водные растворы кислот или щелочей, а также смеси различных кислот.

Различные структурные составляющие травятся неодинаково и поэтому по-разному будут отражать свет. Сильнотравящаяся структура будет более темной, поскольку будет рассеивать больше лучей. Граница зерен травится сильнее, чем тело зерна. Это связано с различием в химическом составе (скопление примесей происходит у границы) и искажением кристаллического строения. В результате травления на поверхности шлифа появляется микрорельеф за счет неодинаковой высоты структурных составляющих. Таким образом, с помощью травления удастся выделить отдельные структурные составляющие и границы зерен.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Установить микроскоп на рабочий стол в затемненном месте. Для уменьшения влияния вибрации, нарушающей резкость изображения при фотографировании, подложить под основание микроскопа амортизатор из полимера или из губчатой резины толщиной $\delta = 10 \dots 20$ мм.

2. Убедиться в том, что микроскоп заземлен.

3. Источник света микроскопа и принадлежности к нему подключить к блоку питания, а блок питания включить в сеть.

4. Настроить освещение для работы в светлом поле.

5. Получить у преподавателя микрошлифы исследуемых сталей.

6. Установить на предметный столик микрошлиф исследуемой поверхностью к объективу, после чего, наблюдая правым глазом в правую окулярную трубку насадки и вращая микрометрический винт, фокусируют микроскоп на объект.

7. Установить окулярные трубки насадки в соответствии с расстоянием между глазами, при этом поле левой и правой трубок должны слиться в одно поле.

8. Выполнить фотосъемку микрошлифа исследуемой стали.

9. По окончании работы на микроскопе опустить предметный столик до упора, убрать микрошлиф и накрыть микроскоп чехлом. Принадлежности убрать в укладочный ящик.

Примечание. Для общего обзора исследуемого объекта целесообразно применить слабые по увеличению объективы $F = 23,2$; $A = 0,17$ и $F = 8,2$; $A = 0,37$, для более подробного изучения объекта — сильные по увеличению объективы $F = 6,2$; $A = 0,65$ и $F = 4,3$; $A = 0,95$.

ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. Сформулировать цель работы.
2. В тетради для лабораторных работ изобразить оптическую схему микроскопа с указанием составляющих его деталей.
3. При помощи стрелок (желательно другого цвета) показать ход луча от окуляра до микрошлифа.
4. Изобразить (приложить ксерокопию фотографий) структуру сталей и привести их описание.
5. Сравнить две структуры стали и написать их отличительные особенности.

Примечание. Поскольку другие виды наблюдений используются реже, то с ними можно ознакомиться в паспорте микроскопа.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для какой цели применяют металлографические микроскопы?
2. Какие металлографические микроскопы применяют в исследовательских лабораториях?
3. Во сколько раз увеличивает изображение металлографический микроскоп?
4. Какие материалы можно исследовать при помощи микроскопа ММР-1?
5. Для каких целей проводят исследования структур металлов и сплавов?

ОЗНАКОМЛЕНИЕ С МЕТОДИКОЙ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ПО РОКВЕЛЛУ И БРИНЕЛЛУ

Цель работы — освоить приемы измерения твердости материалов при помощи твердомера ТЭМП-3, определить показатели твердости по Роквеллу и Бринеллю.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Твердомер ТЭМП-3 (рис. 2.1) предназначен для экспрессного неразрушающего измерения твердости сталей, их сварных соединений, а также других металлов и неметаллических материалов, например, резины, по шкалам Бринелля (НВ), Роквелла (HRC). Прибор может быть использован в производственных, эксплуатационных и лабораторных условиях в машиностроении, металлургии, энергетике и других отраслях промышленности, а также в ремонтных и монтажных организациях.

Объектами измерений могут быть крупногабаритные изделия, узлы и детали сложной формы, имеющие труднодоступные зоны измерений: коленчатые валы, трубопроводы, кронштейны, опоры, шестерни и т.д.

Твердомер может быть применен:

- для оперативного контроля твердости деталей массового производства в условиях цеха в целях оценки стабильности различных технологических процессов, например, термической и механической обработки, сварки, обработки давлением и т.п.;
- для экспрессного диагностирования эксплуатируемого оборудования для оценки его остаточного ресурса.

Прибор позволяет производить измерения на плоских, выпуклых и вогнутых поверхностях изделия с различным радиусом

кривизны и шероховатостью не более Ra 2,5 по ГОСТ 2789—73, а также на изделиях различной массы и толщины.

Диапазоны измерения твердости по шкалам:

Роквелла (HRC)	22... 68
Бринелля (HB)	100... 450

Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения твердости по шкалам:

Роквелла (HRC)	$\pm 2,0$
Бринелля (HB)	± 12

При необходимости указания диапазоны измерений могут быть расширены как в область низких, так и высоких значений твердости. Возможна калибровка прибора по другим шкалам твердости.

Технические характеристики твердомера

Время одного измерения, с	5
Напряжение питания прибора от двух элементов типа А, В	3
Ресурс непрерывной работы на одном комплекте питания, ч	300
Время автоматического отключения прибора после проведения последнего измерения, мин	1,5
Шероховатость* контролируемой поверхности Ra , мкм, не более	2,5
Индикация понижения напряжения питания, В	До 1,6
Диаметр шаровидного индентора, мм	3
Масса прибора, кг	0,22
Габаритные размеры, мм	30 × 60 × 130

* Шлифовка мест измерений проводится шлифмашинкой, напильником (или на шлифовальном станке) с мелкой насечкой с последующей дошлифовкой наждачной бумагой с мелким зерном.

Твердомер представляет собой портативный электронный прибор динамического действия, состоящий из электронного блока (в пластиковом или в металлическом корпусе) и датчика, которые соединены между собой экранированным кабелем.

Принцип измерения твердости прибором основан на определении соотношения скоростей удара и отскока ударника, преобразуемого электронным блоком в условную единицу твердости H , которую затем переводит в искомые единицы твердости HB, HRC (для данной лабораторной работы) по прилагаемым к прибору переводным таблицам (Приложение 1 и 2).

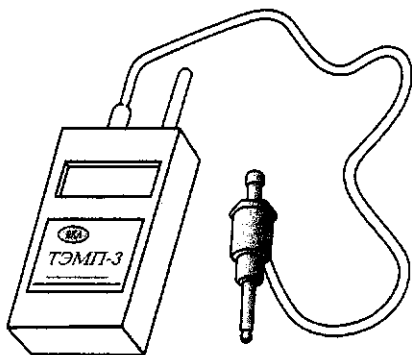


Рис. 2.1. Общий вид твердомера ТЭМП-3

На лицевой стороне корпуса прибора расположены жидкокристаллический индикатор (далее дисплей), кнопка включения-выключения «Вкл», а на верхней — разъем для подключения датчика и гнездо приводного толкателя.

На задней стенке корпуса расположен заводской номер прибора и батарейный отсек.

Батареи питания (или аккумуляторы) устанавливаются согласно нумерации, указанной в батарейном отсеке.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Провести внешний осмотр прибора и убедиться в том, что отсутствуют механические повреждения блока 1 (рис. 2.2), датчика 8, соединительного кабеля 7.

Примечание. Если прибор хранился при температуре ниже нуля или принесен в помещение с улицы, необходимо выдержать его перед включением не менее двух часов при комнатной температуре.

2. Подготовить образец к исследованию:

- в зоне измерений удалить с поверхности окалину, оксидную пленку, смазку, ржавчину и т.п.;
- зачистить напильником и протереть ветошью поверхность в зоне измерения диаметром примерно 20 мм и обеспечить шероховатость не более Ra 2,5 мкм.

3. Соединить датчик с электронным блоком. Вставить в батарейный отсек элементы питания. Подключить датчик к корпусу прибора.

4. Проверить, чтобы опорное кольцо 10 и механизм взвода 5 датчика были плотно завернуты на направляющей трубке 6.

5. Включить прибор нажатием кнопки «Вкл». При этом слева на дисплее должна появиться цифра «1».

6. Толкателем 3 плавно загрузить ударник 9 с торцевой части со стороны опорного кольца 10 датчика до защелкивания, затем извлечь толкатель.

7. Датчик установить вертикально к испытуемой поверхности изделия, плотно прижать его к поверхности одной рукой, а другой — нажать на спусковую кнопку 4. После соударения ударника с поверхностью контролируемого изделия на диске прибора появится результат измерения в виде трехзначного числа H .

8. С помощью переводных таблиц (Приложение 1 и 2) перевести полученное значение H в требуемую твердость HV и HRC .

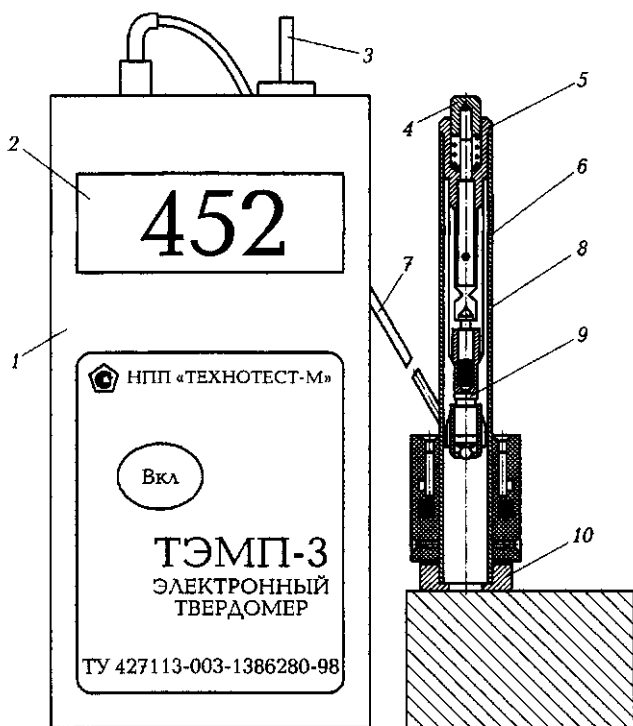


Рис. 2.2. Схема электронного твердомера ТЭМП-3:

1 — электронный блок; 2 — жидкокристаллический индикатор; 3 — толкатель; 4 — спусковая кнопка; 5 — механизм взвода датчика; 6 — направляющая трубка; 7 — электронный кабель; 8 — датчик; 9 — ударник; 10 — опорное кольцо

9. Последующие измерения провести в соответствии с пп. 2 и 4.

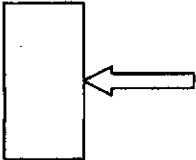
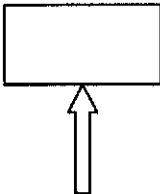
10. Для получения конкретных значений рекомендуется проводить не менее пяти измерений, а результаты затем усреднить.

11. Прибор отключить кнопкой «Вкл» либо дождаться его автоматического отключения через 1,5 мин.

12. Минимальное расстояние между точками измерений (отпечатками) должно быть не менее 3 мм. **Повторные измерения в одной и той же точке не допускаются.**

13. Возможны измерения твердости при положении датчика под различными углами относительно поверхности испытуемого изделия. В этих случаях результаты измерений корректировать поправочными коэффициентами (табл. 2.1), которые вычитают от полученных значений Н.

Таблица 2.1. Поправочные коэффициенты

Положение датчика	Н	Поправочный коэффициент
	300	-8
	400	
	500	-10
	600	
	700	-12
	300	-24
	400	
	500	-26
	600	
	700	-28

14. После окончания работы с прибором необходимо разгрузить датчик, прикоснувшись к пусковой кнопке.

15. Если твердомер длительное время не эксплуатируется, обеспечить его, удалив батареи из отсека питания.

ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. Сформулировать цель работы.

2. В тетради для лабораторных работ изобразить испытуемые образцы. Указать материал образцов и их механические харак-

теристики. Для этого воспользоваться справочниками и таблицами [1].

3. С помощью переводных таблиц (Приложение 1 и 2) перевести полученное значение Н в НВ и HRC.

4. Проанализировать результаты и сделать вывод о марке материала.

5. Сравнить полученные результаты с данными в таблице механических характеристик.

6. Сравнить полученные данные и сделать вывод о точности.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие механические свойства металлов и сплавов можно определить при помощи твердомера ТЭМП-3?
2. Какие числа твердости можно определить при помощи переводных таблиц и как это можно сделать?
3. Для каких целей используют твердомер ТЭМП-3 в условиях производства?
4. Как подготовить твердомер к работе?
5. Как определить величину твердости по Роквеллу и Бринеллю при помощи твердомера ТЭМП-3?

ОЗНАКОМЛЕНИЕ С МЕТОДИКОЙ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ПО РОКВЕЛЛУ И БРИНЕЛЛУ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Цель работы — освоить приемы измерения твердости материалов при помощи твердомера ТЭМП-3 и соответствующего программного обеспечения. Получить таблицу твердости по Роквеллу и Бринеллю.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Средства измерения и материалы. Для работы с программой необходимо иметь:

- твердомер;
- комплект образцовых мер твердости (МТР и МТБ) по той шкале твердости, по которой требуется получить таблицы перевода твердости (например, по Бринеллю — меры на уровне 100; 200 и 400 НВ);
- массивную стальную или чугунную плиту (диаметр — 200... 500 мм, высота 60... 100 мм) с шлифованными (Ra 1,25 мкм) плоскими поверхностями;
- густую смазку типа ЦИАТИМ-221, УТ (консталин), технический вазелин, солидол.

Использовать смазки, не разжижающиеся при комнатной температуре.

Образцовые меры твердости должны быть притерты к горизонтально установленной массивной плите в соответствии с методикой проверки.

Пробирование твердомера. Притереть образцовые меры твердости к плите. Для этого на ее опорную поверхность нанести тонкий слой смазки ЦИАТИМ-221 по ГОСТ 9433—80 либо УТ (кон-

сталлин) по ГОСТ 1957—73, либо любой другой смазки аналогичной консистенции. Меры притереть к поверхности плиты таким образом, чтобы не было непосредственного контакта металлических поверхностей, т. е. чтобы меры «прилипли».

Проверить функционирование кнопки включения «Вкл» и индикации деления. Для этого провести не менее трех измерений на любой мере твердости.

Определение абсолютной погрешности измерений твердомером. Абсолютную погрешность измерений твердомера определять на образцовых мерах твердости только при вертикальном (сверху вниз) направлении удара наконечника прибора.

На каждой из образцовых мер твердости (табл. 3.1) провести пять измерений, усреднить полученные результаты и по прилагаемым переводным таблицам (Приложение 1 и 2) определить соответствующие им значения твердости.

Усредненное значение H_{cp} , соответствующее ему значение твердости и номинальные значения твердости образцовых мер записать в тетрадь.

Таблица 3.1. Типы мер и значения их твердости

Тип меры	Значение твердости
Мера твердости по Роквеллу (МТР)	(25 ± 5)HRC (45 ± 5)HRC (65 ± 5)HRC
Мера твердости по Бринеллю (МТБ)	(100 ± 25)HB (200 ± 50)HB (400 ± 50)HB

Примечание. Допускается применять другие средства проверки, которые позволяют проводить измерения метрологических характеристик твердомера с данной точностью.

Пределы абсолютной допускаемой погрешности измерений твердости твердомером на каждой образцовой мере не должны превышать:

- по шкале Роквелла (HRC) ± 2;
- по шкале Бринелля (HB) ± 2.

Если абсолютная погрешность измерений твердости на всех образцовых мерах твердости не превышает значений, указанных ранее, то твердомер считается пригодным для эксплуатации.

Программное обеспечение, работающее в Windows-95 — Windows XP, необходимо переписать с дискеты (диска) (каталог TEMP-3) на жесткий диск компьютера пользователя.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Провести пять измерений по шкале Н прибора на каждой обрточной мере твердости и записать их усредненные значения в виде пар чисел:

Н	НВ
337	105
445	216
605	416

2. Используя полученные данные в виде трех пар Н—НВ, распечатать переводную таблицу твердости с помощью программы TEMP-3, поставляемой с прибором на дискете (диске).

Для этого необходимо:

- в каталоге **TEMP-3** выбрать файл **temp-3.exe** и нажать **Enter** — появится рабочее окно программы — **Расчет операционных таблиц**;
- ввести номер прибора, например 040, в окне **Прибор №**. Перемещение мигающего курсора в отдельном окне или между окнами осуществляется либо мышью, либо нажатием клавиши **Tab** на клавиатуре компьютера;
- в окне **Описание** ввести наименование таблицы, например, **Переводная таблица по применению НВ** (или по Роквеллу — **HRC**);
- в окне **Название шкалы** ввести буквенное наименование шкалы, например, **НВ** (или **HRC**);
- в окне **Аппроксимационные точки** ввести соответствующие значения пар чисел Н—НВ. Для этого нажать кнопку **Добавить**, затем в появившемся окне **Точка аппроксимации** ввести числовое значение. В окне **Аппроксимационные точки** появятся введенные значения Н—НВ. Щелкнув мышью по кнопке **Добавить**, аналогично ввести вторую пару (412 Н — 175 НВ), а затем третью пару (641 Н — 415 НВ);
- если вводится числовое значение пары **HRC—Н**, то ее числовое значение, например, 63,9 HRC, разделяют запятой;
- удалить какую-либо пару значений НВ—Н можно, отменив ее курсором мыши и нажав кнопку **Удалить**;

- для корректировки какого-либо неверно введенного числа дважды щелкнуть мышью по этому числу и ввести его правильное значение;
- в окне **Метод аппроксимации** выбрать требуемый метод аппроксимации, например, кусочно-линейный (или метод наименьших квадратов). Если выбран метод наименьших квадратов, то появляется вкладка **Степень аппроксимационного полинома**, в окне которой можно по необходимости задавать степень аппроксимации от 2 до 9, в данном случае — 3;
- в окне **Число знаков после запятой** выбрать 0 для HB и 00 — для HRC;
- граничные значения таблицы по Бринеллю, например, 95 HB, и конечное значение таблицы по HB, например, 460 HB. Буквенные обозначения по HB (или HRC) появляются такими, какими они заданы в окне **Название шкалы**. Для данного случая — HB;
- в окне **Шаг таблицы** задать шаг таблицы по H, например, 2;
- напечатать переводную таблицу твердости, щелкнув мышью по меню **Рассчитать таблицу**, а затем в появившемся окне **Аппроксимационная таблица** щелкнуть по кнопке **Печатать таблицу** — принтер напечатает переводную таблицу единиц H в шкалу твердости, в данном случае по Бринеллю (HB);
- в окне **Аппроксимационная таблица** можно также посмотреть распределение кривой, например, HB—H, и заданных точек на ней, а также числовые значения указанной зависимости HB—H в окне справа от графика, пользуясь **Полосой прокрутки**;
- распечатать график, щелкнув мышью по кнопке **Печатать график**;
- для сохранения введенных данных и настройки в виде файла (в целях последующей загрузки), например, шкалы твердости по Бринеллю, щелкнув мышью по пункту меню **Шкала**, выбрать пункт **Сохранить шкалу**, ввести наименование файла, например, **HB.tbl**, и нажать **Enter**;
- последовательность работы с программой описана в файле **temp.hlp**, посмотреть который можно щелкнув мышью по пункту меню **Справка**;
- для выхода из рабочей программы необходимо щелкнуть мышью по пункту меню **Выход**.

3. Поскольку на дискете (диске) с программным обеспечением записаны шкалы-шаблоны, то распечатку таблиц твердости можно упростить:

- открыть файл **temp-3.exe**, загрузить шкалу-шаблон, например, **НВ tbl**, ввести номер своего твердомера ТЭМП-3, значения Н—НВ по своим образцовым мерам твердости;
- распечатать переводную таблицу твердости, как это было описано ранее. При необходимости изменить диапазон распечатываемых таблиц твердости.

ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. Сформулировать цель работы.
2. В тетради для лабораторных работ записать тип выбранного образца твердости (или меры).
3. Проанализировать и записать результаты проверки прибора.
4. Распечатать переводную таблицу единиц Н в шкалу твердости по НВ.
5. Распечатать график зависимости НВ—Н.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается сущность контроля твердости материалов при помощи программного обеспечения?
2. Что необходимо иметь для работы с программой?
3. Что необходимо сделать для апробирования твердомера ТЭМП-3?
4. Как определить абсолютную погрешность измерений твердости твердомером ТЭМП-3?
5. Каков порядок работы с программой?

ИССЛЕДОВАНИЕ МАКРОСТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА (МАКРОАНАЛИЗ)

Цель работы — ознакомиться с некоторыми методами макроанализа и выявляемыми ими дефектами металла.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Макроскопическим анализом называется исследование излома или специально подготовленной поверхности металла невооруженным глазом или с помощью лупы с увеличением до $50\times$.

Макроструктуру изучают непосредственно на поверхности отливки, поковки, детали или по излому. Однако чаще макроструктура изучается на макрошлифах, представляющих собой образец, поверхность которого зачищена на станке или подверглась шлифованию на грубой шлифовальной бумаге и обезжириванию спиртом.

На анализируемых поверхностях не должно быть загрязнений, поэтому их промывают и высушивают. Во многих случаях используют травление (глубокое или поверхностное). Для изучения изломов образцы или детали надрезают, а затем разрушают по месту надреза на прессе или копке.

Макроанализ дает представление об общем строении металла и позволяет оценить его качество после различных видов обработки: литья, обработки давлением, сварки, термической и химико-термической обработки. С помощью макроанализа определяют:

- нарушения сплошности металла: рыхлость, пористость, пузыри, межкристаллитные трещины; трещины, возникшие при обработке давлением и термической обработке; флокены; дефекты сварки (непровары, газовые пузыри);

- дендритное строение, зоны транскристаллизации, размеры и ориентацию зерен в литом металле;
- химическую неоднородность литого металла (ликвацию) и присутствие в нем грубых инородных включений;
- волокнистую структуру деформированного металла;
- структурную или химическую неоднородность металла, созданную термической или химико-термической обработкой;
- вид излома (вязкий, хрупкий, усталостный, камневидный и др.).

Способы макроанализа различны и зависят от состава металла и задач, стоящих перед исследователем.

Исследование качества сварного соединения. При сварке неизбежен перегрев околошовной зоны материала, в результате образуется зона термического влияния. Перегретая сталь обычно имеет пониженные пластичность и сопротивление удару из-за крупнозернистой структуры.

В зоне сварного соединения могут встречаться дефекты в виде непровара, представляющего собой зазор между основным и наплавленным металлом, а также между отдельными слоями наплавленного металла в многослойных швах. Непровары вызываются непрочным прогревом кромок основного металла, неправильной сборкой соединений под сварку, недостаточной очисткой кромок и т. д.

Наиболее опасным дефектом сварных соединений являются трещины. Чаще всего они встречаются в зоне термического влияния. Образование трещин в процессе сварки объясняется главным образом большой и нерегулируемой скоростью охлаждения шва и зоны термического влияния.

Диаметр газовых пор, выходящих на поверхность шва или скрытых в его глубине, обычно не превышает нескольких миллиметров. Причины их образования: плохая очистка поверхности перед сваркой от ржавчины, масла и краски, недостаточная просушка электродов после обмазки, большая скорость охлаждения расплавленного металла, препятствующая выходу из него газов.

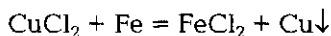
Пузыри в сварных швах имеют склонность располагаться на границе между основным и наплавленным металлом, т. е. в самом опасном месте шва. Нежелательно групповое расположение газопористых пор. Пористость делает шов неплотным, понижает пластические свойства сварного соединения.

Оксиды и шлаковые включения являются одним из самых серьезных дефектов шва.

Для определения качества сварного шва и выявления химической неоднородности (по сере, фосфору, углероду) зон термического

влияния при сварке, наличия макротрещин и др. проводят травление макрошлифов в универсальном реактиве Гейна — 10%-ном растворе хлорно-аммиачной меди ($\text{CuCl}_2 \cdot \text{NH}_4\text{Cl}$).

Отшлифованный образец стали или чугуна погружается шлифованной стороной в реактив. Внесение образца в указанный раствор вызывает обменную реакцию:



В результате часть железа растворяется и вытесняет из раствора медь, которая осаждается на поверхности исследуемого образца.

В растворе образец выдерживают 1...2 мин, после чего под струей воды смывают слой меди, осевшей на поверхности, высушивают образец фильтровальной бумагой.

Если после этого поверхность образца имеет равномерный оттенок, то это свидетельствует об однородности металла. Если имеются более темные места, то они говорят о том, что эти места обогащены серой, фосфором и углеродом. Данный способ исследования называется *методом Гейна*.

Этим методом также можно выявить характер расположения волокон в изделии, полученных горячей обработкой давлением так как волокнистость горячеобработанного металла связана с его химической неоднородностью.

В процессе такой обработки макроструктура исходного металлического слитка изменяется: дендриты измельчаются и вытягиваются в волокна.

По расположению волокон можно также установить, применялась ли обработка резанием для изготовления изделий из деформированной заготовки. Поскольку ударная вязкость, пластичность

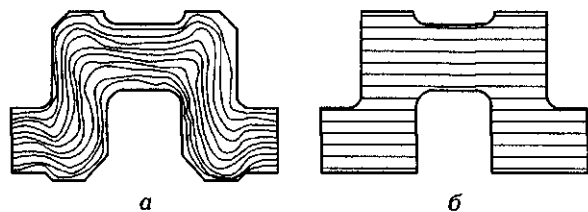


Рис. 4.1. Макроструктура продольного разреза коленчатого вала с правильным (а) и неправильным (б) расположением волокон

сопротивление разрушению выше в образцах, вырезанных вдоль волокон, необходимо стремиться изготавливать изделия таким образом, чтобы волокна в них не перерезались, т.е. следовали конфигурации изделия (рис. 4.1, а), с тем чтобы максимальные напряжения, возникающие в них, были вдоль волокон. Это особенно важно для деталей, работающих при высоких нагрузках.

При изготовлении деталей резанием из деформированной стали волокна, как правило, перерезаются, что является недостатком этого метода обработки (рис. 4.1, б).

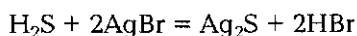
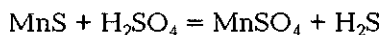
Для выявления дендритной структуры применяется реактив, состоящий из 50 частей соляной кислоты (HCl) и 50 частей воды. В этом реактиве, нагретом до 60...70 °С, проводят травление образцов, выдерживая 45 мин. Работы выполняют в вытяжном шкафу. Реактив по-разному растворяет составляющие структуры металла, что и позволяет выявить его дендритное строение. Ветви дендрита имеют различный химический состав и поэтому растворяются с различной скоростью.

После травления образцы промывают водой и просушивают. Тот же реактив выявляет дефекты, нарушающие сплошность металла: макротрещины, микропоры и др. и позволяет обнаружить их невооруженным глазом.

Выявление ликвации серы методом Баумана. Сера (находится в стали в виде сульфидов MnS и FeS), фосфор, углерод и некоторые другие элементы в процессе кристаллизации имеют склонность к неравномерному распределению по сечению слитка, что отрицательно сказывается на свойствах его отдельных участков. Такая неоднородность по химическому составу называется ликвацией.

Для изучения распределения серы по сечению изделия применяют метод Баумана (серного отпечатка).

Лист фотобумаги, содержащий бромид серебра, опускают в 3%-ный раствор серной кислоты на 3...5 мин. Затем лист слегка просушивают фильтровальной бумагой для удаления избытка кислоты, накладывают эмульсионной стороной на шлифованную поверхность образца и выдерживают в течение 3...4 мин. При наложении листа фотобумаги на шлифованную поверхность образца между серной кислотой и сульфидами происходят реакции:



Образующийся сероводород взаимодействует с бромидом серебра, находящимся в фотоэмульсии, и на фотобумаге образуется сульфид серебра, имеющий темно-коричневый цвет.

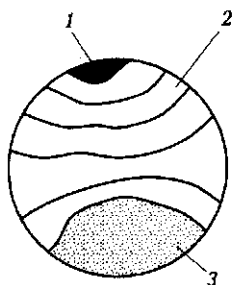


Рис. 4.2. Излом усталостного разрушения:

1 — очаг зарождения трещины; 2 — зона усталости; 3 — зона долома

После снятия фотобумаги с макрошлифа ее промывают в воде, затем закрепляют в гидросульфите, снова промывают и просушивают.

Если полученный на фотобумаге отпечаток имеет равномерную окраску, то это свидетельствует о том, что сера в образце расположена равномерно, т. е. ликвация отсутствует.

Изломы ударных образцов. Исследование изломов является наиболее простым, но чрезвычайно важным методом макроанализа, так как вид излома во многих случаях позволяет судить о качестве металла, предшествующей обработке, причинах разрушения и др. На изломе можно увидеть зернистость металла и, следовательно, сделать заключение о его механических свойствах. Размер зерна влияет на все механические свойства, особенно на пластичность и вязкость.

Вид излома соответствует характеру разрушения металла. Различают хрупкое и вязкое разрушение. Мелкозернистый металл разрушается вязко, излому предшествует пластическая деформация. Излом — вязкий (волоконистый), разрушение происходит в результате среза через тело зерна.

Крупнозернистый металл разрушается хрупко, без предшествующей пластической деформации, излом — по границам зерен кристаллический.

Один и тот же металл в зависимости от условий обработки имеет разный излом. Крупнозернистый излом после термической обработки становится мелкозернистым.

Излом металла после усталостного разрушения состоит из гладкой зоны усталости и зоны долома. Зона усталости образовывалась постепенно в период развития усталостной трещины. Зона долома — результат внезапного разрушения оставшегося объема металла, который не смог выдержать всей приложенной нагрузки. Изучение такого образца следует связать с воздействием циклической нагрузки (рис. 4.2).

Для выполнения работы необходимы:

- макрошлифры;
- образцы изломов;
- 5%-ный раствор серной кислоты;
- 25%-ный раствор азотной кислоты;
- хлорид аммония (NH_4Cl);
- хлорид меди (CuCl_2);
- шлифовальная бумага;
- фильтровальная бумага;
- фотобумага;
- фиксаж.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Исследовать качество сварного соединения:

- очистить исследуемые поверхности сварных образцов шлифовальной бумагой;
- обвести контуры образцов 3 раза;
- зарисовать на первом контуре видимую картину поверхности макрошлифа до травления;
- погрузить исследуемую поверхность макрошлифа в реактив Гейна, содержащий (на 1 000 мл воды) 53 г хлорида аммония (NH_4Cl) и 85 г хлорида меди (CuCl_2) — участки, обогащенные фосфором и углеродом, будут окрашены в более темный цвет;
- извлечь из реактива макрошлиф;
- снять с образца слой осевшей меди под струей воды и просушить фильтровальной бумагой;
- зарисовать видимую картину поверхности макрошлифа на втором контуре;
- удалить следы травления с поверхности образца на шлифовальной бумаге;
- выявить зернистое строение и дендритную структуру наплавленного металла в зоне сварного шва путем погружения образца на 30 ... 60 с в реактив, состоящий из 25%-ного раствора азотной кислоты в воде;
- промыть водой и просушить макрошлиф;
- зарисовать картину макрошлифа после травления на третьем контуре.

2. Выявить ликвацию методом Баумана.
3. Сделать вывод о наличии или отсутствии ликвации.
4. Изучить изломы выданных образцов металлов:
 - на ударных образцах по виду излома (крупно- или мелкозернистый) определить его характер (хрупкий или вязкий);
 - на образцах с усталостным изломом установить связь вида излома с характером вызвавшей разрушение нагрузки. Объяснить наличие двух зон (см. рис. 4.2).

ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. Сформулировать цель работы.
2. Изложить основные теоретические положения по макроанализу (метод Баумана, метод Гейна, виды изломов).
3. Сделать выводы о наличии или отсутствии ликвации серы.
4. Описать полученные результаты после проведения глубокого и поверхностного травления.
5. Зарисовать виды излома (вязкий, хрупкий, усталостный).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется макроскопическим анализом металлов?
2. Для каких целей применяется макроскопический анализ металлов?
3. Опишите метод Гейна.
4. Опишите метод Баумана.
5. Перечислите виды изломов.

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цель работы — изучить процесс кристаллизации, ознакомиться с формой металлических кристаллов, зарисовать строение слитков.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Вещества могут находиться в трех агрегатных состояниях: жидком, твердом и газообразном. Основным признаком жидкого состояния является текучесть, т. е. способность принимать форму сосуда, в котором она содержится. Это объясняется тепловым движением молекул, представляющим собой сочетание малых колебаний около положений равновесия и перескоков из одного положения равновесия в другое.

Признаком твердого состояния является устойчивость формы и объема тела при воздействии на него внешней силы. При этом атомы совершают лишь малые тепловые колебания вокруг фиксированных положений равновесия.

Материалы в твердом состоянии могут быть аморфными или кристаллическими. В аморфных материалах атомы расположены неупорядоченно в виде комплексов, случайно сложившихся в процессе охлаждения жидкости. Эти материалы не имеют точно определенной температуры перехода в твердое состояние, а затвердевают в интервале температур с постоянным уменьшением текучести и повышением вязкости.

Кристаллические вещества характеризуются строго упорядоченным расположением атомов (ионов, молекул) в виде пространственной кристаллической решетки.

Большинство металлов при металлургической обработке руд получается в жидком — расплавленном состоянии.

Переход из жидкого состояния в твердое связан с появлением кристаллов и образованием кристаллической решетки. Поэтому такой процесс назван кристаллизацией. Он является самопроизвольным.

$$U = F + TS \text{ или } F = U - TS,$$

где U — полная внутренняя энергия твердого тела; F — свободная энергия, определяемая главным образом силами межатомных связей в решетке; TS — связанная энергия, определяемая энергией теплового движения атомов; T — абсолютная температура; S — энтропия.

Изменение свободной энергии при переходе из жидкого состояния в твердое видно из графика (рис. 5.1).

Температура T_S — теоретическая или равновесная температура, при которой свободная энергия жидкого и твердого состояния равны. При этой температуре обе фазы могут существовать одновременно и бесконечно долго. Выше этой температуры меньше свободной энергией обладает вещество в жидком состоянии, и такое состояние является устойчивым. Ниже — устойчивым будет вещество в твердом состоянии.

Температура, при которой фактически начинается процесс кристаллизации, называется фактической температурой кристаллизации. Чтобы вызвать кристаллизацию нужно охладить жидкость ниже равновесной температуры.

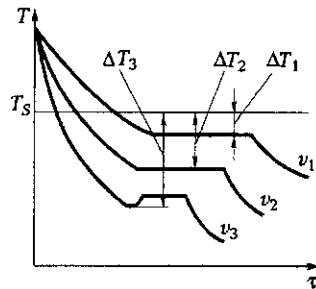
Охлаждение жидкости ниже T_S называется переохлаждением. Величиной, или степенью, переохлаждения называется разность между теоретической и фактической температурами кристаллизации: $\Delta T = T_S - T_k$. Степень переохлаждения зависит от скорости охлаждения (чем больше скорость охлаждения, тем больше степень переохлаждения, тем при более низкой температуре кристаллизуется данный металл), от природы и чистоты расплава (чем чище расплав, тем больше степень переохлаждения). Наличие не-



Рис. 5.1. Изменение свободной энергии (F) жидкого ($F_{ж}$) и твердого ($F_{тв}$) металла в зависимости от температуры (T)

Рис. 5.2. Кривые охлаждения чистого металла:

T — температура; $\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3$ — степени переохлаждения при скоростях охлаждения v_1, v_2, v_3 ; t — время



растворенных включений ускоряет процесс кристаллизации, уменьшает степень переохлаждения.

Поскольку внутренняя энергия неупорядоченной жидкости выше, чем в упорядоченном твердом кристаллическом теле, то при кристаллизации выделяется теплота, которая называется скрытой теплотой кристаллизации. Она влияет на вид термических кривых: у чистых металлов появляется горизонтальная площадка и помещается наклон кривой сплавов. Время существования горизонтальных площадок на кривых и является временем протекания процесса кристаллизации металла.

При больших скоростях охлаждения скрытая теплота кристаллизации выделяется настолько бурно, что температура повышается скачкообразно и приближается к равновесной.

Процесс кристаллизации изучают по кривым охлаждения (рис. 5.2).

Законы кристаллизации. Процесс кристаллизации металла состоит из двух элементарных процессов: зарождения мельчайших центров кристаллизации и роста кристаллов из этих центров. Оба процесса протекают одновременно.

Скоростью зарождения числа центров называется количество зародышей, возникших в единице объема за единицу времени. Скоростью роста кристаллов называется скорость увеличения линейных размеров растущей грани кристалла в единицу времени. Эти величины называются параметрами кристаллизации, которые зависят от степени переохлаждения (рис. 5.3).

При малой степени переохлаждения в жидкости зарождается небольшое число центров кристаллизации и в результате образуются крупнозернистая структура. С увеличением степени переохлаждения скорость зарождения числа центров значительно больше, чем скорость их роста, что приводит к получению мелкозернистой структуры. Чтобы изменить условия кристаллизации,

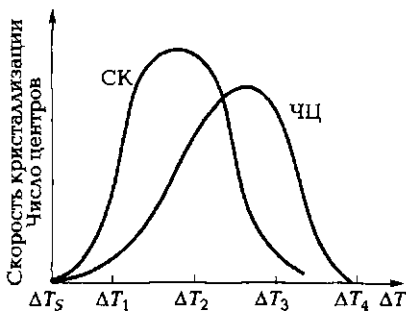


Рис. 5.3. Зависимость числа центров кристаллизации (ЧЦ) и скорости кристаллизации (СК) от степени переохлаждения ΔT

в жидкий расплав вводят дисперсные частички (например, оксиды), являющиеся дополнительными центрами кристаллизации. Такой процесс называется модифицированием.

Образование зародышей при кристаллизации. Переход из жидкого состояния в твердое требует затрат энергии на образование зародыша новой фазы. Новая фаза является кристаллической и образуется путем зарождения и роста кристаллов. Этот процесс может протекать только при условии уменьшения свободной энергии системы (рис. 5.5).

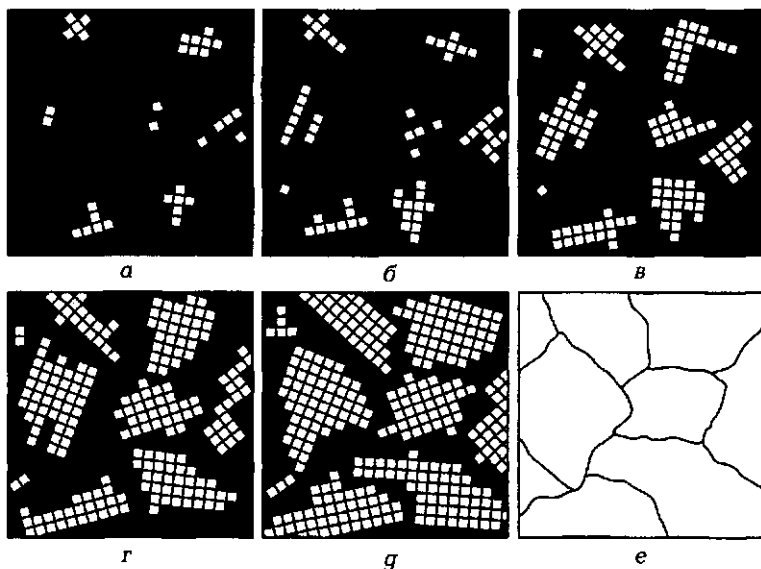
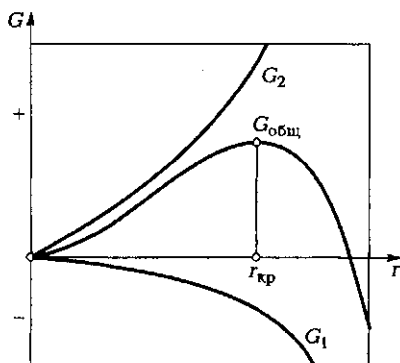


Рис. 5.4. Схема процесса кристаллизации по этапам:

а — е — этапы кристаллизации

Рис. 5.5. Изменение термодинамического потенциала (свободная энергия Гиббса) при образовании и росте зародышей:

G — термодинамический потенциал; r — размер зародыша; $r_{кр}$ — критический размер зародыша; $G_{общ}$ — потенциал системы; G_1 — уменьшение энергии Гиббса за счет перехода части жидкого объема металла в твердый; G_2 — избыточная поверхностная энергия



Если образуется зародыш r размером меньшим, чем $r_{кр}$, то он расти не может, так как для этого необходимо повышение свободной энергии системы. Если образуется зародыш размером $r_{кр}$ и более, то его рост возможен, т.е. уменьшается свободная энергия.

Минимальный размер способного к росту зародыша называется критическим размером зародыша, а сам зародыш называется устойчивым.

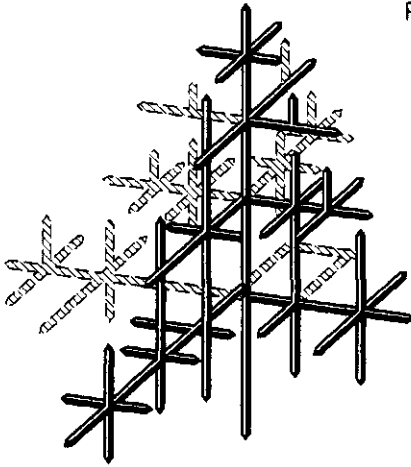
Каждой температуре кристаллизации отвечает определенный размер устойчивого зародыша.

Существуют два механизма образования зародышей:

- гомогенное (самопроизвольное). Происходит в высокочистом металле, встречается редко;
- гетерогенное, когда образование зародышей происходит на поверхности раздела стенка — жидкость или на нерастворенных дисперсных частицах.

Форма кристаллов металла. Металлические кристаллы могут иметь различную форму, но чаще всего образуются древовидные разветвленные кристаллы, получившие название дендритов (рис. 5.6).

Первоначально образуются длинные ветви — так называемые оси первого порядка. Одновременно с удлинением осей первого порядка на их ребрах зарождаются и растут перпендикулярно им ветви второго порядка. В свою очередь на осях второго порядка появляются и растут оси третьего порядка. В конечном счете, образуются кристаллы в форме дендритов, между ветвями которых находится еще не затвердевшая часть металла. Правильная форма дендрита искажается в результате столкновения и срастания зе-



рен на поздних этапах процесса. Когда все промежутки между ветвями дендрита заполнены, наблюдать дендритное строение трудно — его можно выявить только специальным травлением.

В зависимости от скорости охлаждения жидкого металла зерна могут иметь равноосную (глобулярную) или столбчатую (вытянутую) форму. Наиболее чистый металл кристаллизуется по I, II и III осям. В последнюю очередь кристаллизуется металл в межосных пространствах. Поэтому возникает различие по химическому составу, т. е. наблюдается явление дендритной ликвации.

Одной из причин образования дендритных кристаллов являются разные условия роста кристалла по разным кристаллографическим направлениям.

Строение стального слитка. При заливке металла в металлическую форму (например, при разливке стали в изложницу) кристаллическая структура слитка в различных его частях оказывается неодинаковой (рис. 5.7). Процесс кристаллизации начинается у стенок изложницы, т. е. там, где жидкий металл охлаждается в первую очередь и последовательно продвигается к центру слитка.

Процесс кристаллизации стального слитка состоит из трех стадий.

На первой стадии из-за влияния холодной металлической формы, которая обеспечивает в первые моменты кристаллизации высокую скорость охлаждения, и большую степень переохлаждения, на поверхности слитка образуется зона мелких кристаллов (1). На второй стадии образуется зона вытянутых кристаллов (2), называемых столбчатыми. Рост таких кристаллов про-

исходит в направлении обратном отводу теплоты. На заключительной, третьей, стадии в середине слитка, где наблюдается наименьшая степень переохлаждения, образуется зона равноосных кристаллов больших размеров (3). В случае сильного перегрева и быстрого охлаждения металла зона столбчатых кристаллов может заполнить весь объем слитка. Этот вид кристаллизации называют гранскристаллизацией.

Относительное распределение в объеме слитка зоны столбчатых и равноосных кристаллов имеет большое практическое значение. Зона столбчатых кристаллов обладает высокой плотностью и прочностью. Однако в местах стыка столбчатых кристаллов скапливается большое количество неметаллических включений, нерастворимых примесей, металл имеет малую пластичность, и при последующей горячей обработке давлением в этих местах могут появиться трещины. В связи с этим для малопластичных материалов, в том числе и стали, необходимо ограничивать образование зоны

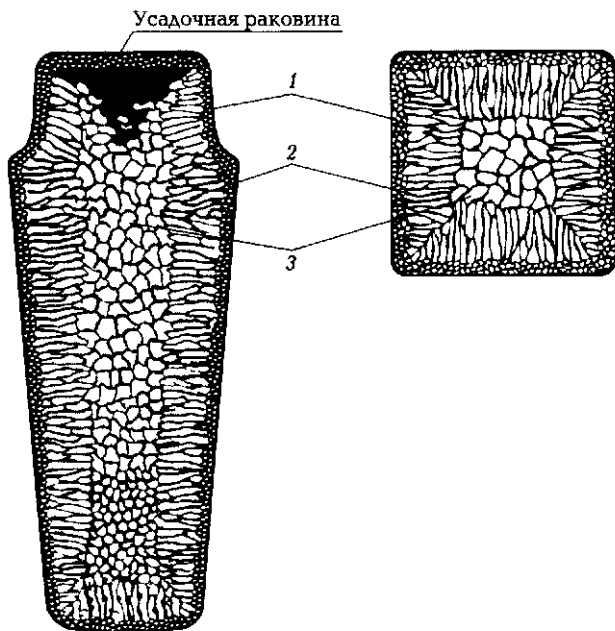


Рис. 5.7. Схема строения слитка:

1 — зона мелких кристаллов; 2 — зона столбчатых кристаллов; 3 — зона равноосных кристаллов больших размеров

столбчатых кристаллов. Для пластичных металлов и сплавов (меди, алюминия и др.) желательны развитие транскристаллизации.

Кристаллизация сплавов сопровождается ликвацией — возникновением химической неоднородности в объеме металла в результате перераспределения фаз. По достижении охлаждающим расплавом температуры ликвидуса в нем появляются кристаллы наиболее тугоплавкой фазы, которые в зависимости от плотности могут либо всплывать, либо осаждаться в оставшемся жидком металле. На завершающем этапе кристаллизация идет по другому механизму — растущие кристаллы основной фазы оттесняют легкоплавкие составляющие расплава в ту часть слитка (отливки), которая застывает последней. Этот процесс называют зональной ликвацией.

Макрообразцы слитков дают представление о раскисленности стали при выплавке. Если раскисление стали проводится марганцем, кремнием и алюминием, то такая сталь называется спокойной и представляет собой плотную отливку с концентрированной усадочной раковиной в верхней части слитка. Усадочная раковина образуется вследствие уменьшения объема металла при кристаллизации.

Если раскисление стали проводится только марганцем, то такая сталь называется кипящей. Она содержит раковины и пузыри по всему объему.

Поскольку законы кристаллизации для солей и металлических сплавов одинаковы, то в настоящей лабораторной работе процесс кристаллизации металлов смоделирован процессом кристаллизации различных солей из водных растворов при испарении воды. Для этого капли растворов наносят на стеклянную пластинку. Когда вода начинает испаряться, растворы пересыщаются и спустя непродолжительное время начинается выделение кристаллов солей. В тонких слоях у краев растекшихся капель испарение воды завершается быстрее и в этих зонах начинается образование большого числа мелких кристаллов (большая степень переохлаждения). По мере продвижения зоны кристаллизации в более толстую часть капли размер кристаллов будет увеличиваться и их форма будет становиться все более правильной.

ПРИБОРЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Для выполнения работы необходимы:

- биологический микроскоп МБС-9 или МБС-10;

- стеклянные пластинки;
- стеклянные палочки;
- водные растворы солей NH_4Cl , $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Нанести стеклянной палочкой капли водных растворов солей хромпика ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), хлорида аммония (NH_4Cl) и нитрата свинца ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) на стеклянную пластинку.
2. Проследить с помощью биологического микроскопа механизм процесса кристаллизации.

ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. Зарисовать процесс кристаллизации на разных стадиях (начальном, промежуточном и завершающем).
2. Зарисовать дендритную форму кристаллов.
3. Описать строение стального слитка.
4. Составить письменный отчет по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте законы кристаллизации.
2. Как меняется энергия системы при кристаллизации?
3. Что такое степень переохлаждения?
4. От каких факторов зависит процесс кристаллизации?
5. Что такое дендрит и как он образуется?
6. Что такое зародыш критического размера?
7. Каково строение стального слитка?
8. Что такое модифицирование?

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ПОСЛЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО НАГРЕВА

Цель работы — изучить структуру деформированного и рекристаллизованного металла.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Деформацией называется изменение формы и размеров образца под действием приложенных к нему сил. Различают упругую и пластическую деформации.

Упругой называют деформацию, которая устраняется после снятия нагрузки. При этом происходят только незначительные и обратимые смещения атомов в кристаллической решетке, остаточных изменений структуры и свойств металлов упругая деформация не вызывает.

Пластической называют такую деформацию, которая не устраняется после снятия нагрузки. В этом случае происходят необратимые изменения формы, структуры и свойств металлов. Основным механизмом пластической деформации является внутризеренный сдвиг одних частей кристалла (зерна) относительно соседних частей по определенным кристаллографическим плоскостям скольжения. На атомном уровне этот сдвиг осуществляется путем перемещения по кристаллу дислокаций.

Структура металла до деформации показана на рис. 6.1, а. При степени деформации $\epsilon = 40\%$ происходит изменение формы зерен, которые вытягиваются в направлении, перпендикулярном действующей нагрузке (рис. 6.1, б). При больших степенях деформации ($\epsilon = 80\%$) структура металла становится волокнистой (рис. 6.1, в).

Сдвиговая пластическая деформация может развиваться в металле не только в результате скольжения, но и в результате двой-

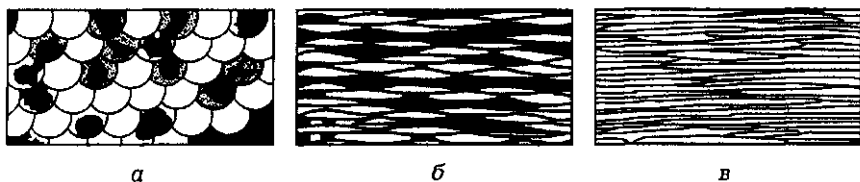


Рис. 6.1. Изменение структуры при пластической деформации металла:
а — структура металла до деформации; *б* — структура металла после деформации при $\epsilon = 40\%$; *в* — структура металла после деформации при $\epsilon = 80\%$

никования — такого перемещения атомов в ограниченной части кристалла, когда одна часть монокристалла оказывается повернутой по отношению к другой его части и становится в симметричное к ней положение.

При пластической деформации плотность дислокаций увеличивается до 10^{12} см⁻² за счет генерирования новых дислокаций, в том числе путем размножения (дробления) уже имеющихся движущихся дислокаций при преодолении ими различных препятствий (других дислокаций и дефектов кристаллического строения). Это приводит к деформационному упрочнению металла, называемому наклепом, а также к изменению других механических и физико-химических свойств (рис. 6.2).

При деформировании металла на 50...70 % предел прочности и твердость обычно увеличиваются в 1,5—2 раза, а пластичность (относительное удлинение) резко уменьшается до 20—30 раз.

Ввиду потери пластичности наклепанный металл не может подвергаться дальнейшей обработке давлением (холодной штамповке, вытяжке, прокатке) (рис. 6.3).

При увеличении степени деформации зерна вытягиваются вдоль действия силы. При больших степенях деформации зерна приобретают предпочтительную ориентировку вдоль силы, вызывающей деформацию. Такая предпочтительная кристаллографическая ориентировка зерен называется текстурой деформации.

Пластическая деформация приводит металл в структурно-неустойчивое состояние с повышенным уровнем свободной энергии. Самопроизвольно должны проходить явления, возвращающие металл в исходное, более устойчивое состояние. Но у металла при низкой температуре подвижность атомов недостаточна, и такое неустойчивое состояние наклепанного металла может сохраняться продолжительное время.

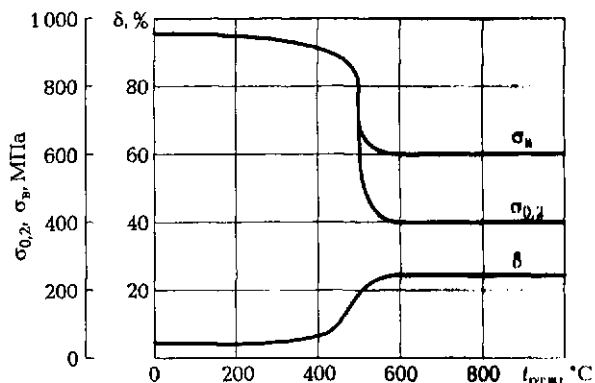


Рис. 6.2. Влияние нагрева на механические свойства наклепанного металла:

δ — относительное удлинение; $\sigma_{в}$ — предел прочности; $\sigma_{0,2}$ — напряжение, при котором остаточная деформация равна 0,2% от первоначальной длины образца

При нагреве увеличивается подвижность атомов, и металл быстрее переходит в более устойчивое состояние.

При относительно невысоком нагреве деформированного металла происходит снятие упругих напряжений и искажение решетки путем перемещений атомов в пределах одного монокристалла. При этом заметного изменения микроструктуры не наблюдается, хотя частично происходит возврат свойств. Такой процесс называется отдыхом.

Устранить наклеп и повысить пластичность можно путем нагрева металла до определенных температур, обеспечивающих

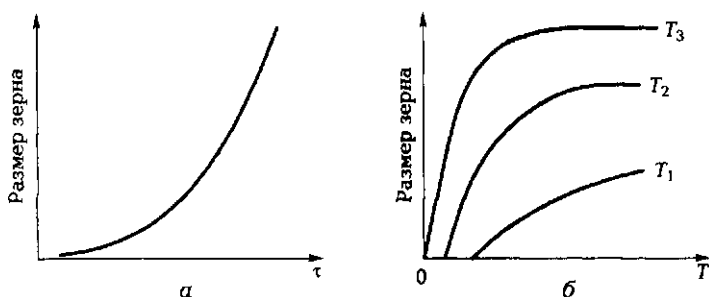


Рис. 6.3. Влияние продолжительности (а) и температуры (б) отжига на величину рекристаллизованного зерна:

$T_1 < T_2 < T_3$; T — температура; τ — время

протекание процесса рекристаллизации, включающего в себя следующие стадии:

- нагрев до невысоких температур, не превышающих температуру начала рекристаллизации T_p^H . В наклепанном металле происходит процесс возврата, связанный с перераспределением вакансий и дислокаций и не сопровождающийся видимыми под микроскопом изменениями формы зерен. Прочностные свойства металла при этом немного снижаются, а пластические — возрастают;
- более высокий нагрев в интервале температур $T_p^H \dots T_p^K$. Происходит процесс первичной рекристаллизации, заключающийся в образовании и последующем росте в деформированном металле новых равноосных зерен с более совершенным строением. Температура начала рекристаллизации T_p^H , при которой в структуре металла появляются зародыши новых равноосных зерен, зависит от температуры плавления $T_{пл}$ и чистоты металла и может быть оценена по зависимости А. А. Бочвара:

$$T_p^H \approx \alpha T_{пл}$$

где $\alpha = 0,25 \dots 0,3$ для особо чистых металлов; $0,3 \dots 0,4$ — для металлов обычной технической чистоты; $0,5 \dots 0,8$ — для концентрированных твердых растворов (сплавов).

Температура конца первичной рекристаллизации T_p^K определяется по исчезновению в микроструктуре последних деформированных (вытянутых зерен).

Первичная рекристаллизация резко снижает плотность дислокаций (с 10^{12} до $10^6 \dots 10^8 \text{ см}^{-2}$) и вызывает сильное разупрочнение металла, которое протекает во всем интервале между температурами начала и конца рекристаллизации;

- дальнейший нагрев. Происходит процесс собирательной рекристаллизации, заключающейся в росте одних рекристаллизованных (равноосных) зерен за счет соседних, тоже рекристаллизованных зерен. Собирательная рекристаллизация приводит к укрупнению зерна и может сопровождаться небольшим снижением прочностных свойств.

Начиная с некоторой температуры, пластичность резко снижается из-за образования чрезмерно крупного зерна. Такое состояние называют перегревом. Это дефект, который может быть исправлен повторной пластической деформацией с рекристаллизационным отжигом при нормальных температурах.

При дальнейшем повышении температуры появляется неисправимый дефект термообработки, который заключается в окис-

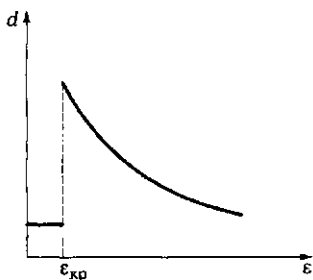


Рис. 6.4. Схема влияния степени предварительной деформации (ϵ) на размер зерна после рекристаллизационного отжига (d)

лении и частичном сплавлении границ зерен и называется пережогом.

Принято различать холодную и горячую пластическую деформацию.

Холодной называют пластическую деформацию при температурах ниже температуры начала рекристаллизации.

Наличие такой деформации можно выявить по вытянутости зерен в микроструктуре, высокой прочности и твердости, кроме того, наблюдается низкая пластичность при механических испытаниях металла.

Горячей называют пластическую деформацию при температурах выше температуры рекристаллизации ($(0,60 \dots 0,75)T_{пл}$), при этом одновременно с деформационным упрочнением (наклепом) происходят процессы рекристаллизации, приводящие к разупрочнению металла.

В металле после горячей деформации признаки деформации отсутствуют; зерна, как правило, недеформированные (равноосные), наблюдается невысокая прочность и твердость в сочетании с высокой пластичностью.

Величина зерна в металле после холодной пластической деформации и рекристаллизации увеличивается с повышением температуры и времени нагрева, кроме того, она зависит от степени деформации, что показано на рис. 6.4. Видно, что при очень малых степенях деформации рекристаллизация в ходе нагревания не происходит, зерно остается достаточно мелким. При повышении степени деформации до величины, называемой критической степенью деформации ($\epsilon_{кр}$) и составляющей обычно 3...15%, размер зерен после рекристаллизации резко возрастает и может во много раз превысить размер исходного зерна. Дальнейшее увеличение степени деформации приводит к получению все более мелких рекристаллизованных зерен.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Исследовать, зарисовать и описать микроструктуры готовых микрошлифов низкоуглеродистой стали:

- а) в отожженном состоянии;
- б) после холодной деформации (осадка цилиндрического образца на 30... 50 % высоты);
- в) после рекристаллизации деформированного образца.

ПРИБОРЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Для выполнения работы необходимы готовые микрошлифы низкоуглеродистой стали: в отожженном состоянии, после холодной деформации (осадка цилиндрического образца 30... 50 % высоты), после рекристаллизации деформированного образца.

ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. Сформулировать цель работы.
2. Кратко описать теоретические основы процесса пластической деформации.
3. Зарисовать микроструктуры металлических образцов в исходном (недеформированном) состоянии, после различных степеней холодной пластической деформации, а также после деформации и последующего нагрева до различных температур.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое упругая деформация?
2. Что называется пластической деформацией?
3. Что называют наклепом?
4. В чем заключается процесс рекристаллизации?
5. Назовите виды рекристаллизации.
6. Как определяется температура рекристаллизации?
7. В чем отличие холодной пластической деформации от горячей?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА ОДНООСНОЕ РАСТЯЖЕНИЕ

Цель работы — освоить методику определения характеристик прочности и пластичности.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Статическое испытание материалов на растяжение позволяет определить основные механические характеристики материалов, такие как предел прочности, предел текучести, предел упругости, предел пропорциональности, условный предел текучести, а также оценить пластичность металлов, определив относительное удлинение и относительное сужение образца.

Испытание на растяжение проводят на образцах, имеющих специальную форму (рис. 7.1, 7.2). Для этого используют испытательные машины (универсальные или разрывные).

Принцип работы испытательной машины. Образец 9 (рис. 7.3) зажат в захватах 8 и 10. Нижний конец захвата 10 соединен с винтом 13, который ввинчен в гайку 12. При вращении гайки винт перемещается по резьбе вниз и тянет за нижний конец образца. Таким образом, к образцу прикладывается усилие, величина которого зависит от величины отклонения груза 1 от положения его



Рис. 7.1. Образец для испытаний на растяжение до разрыва

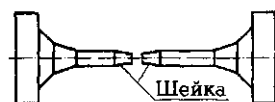


Рис. 7.2. Разрушенный образец при испытании на растяжение

равновесия. Чем больше груз отклонится влево, тем большая нагрузка будет приложена. Груз соединен с Г-образным рычагом 2, который с помощью тяги 3 соединен с левым концом коромысла 7. Короткий конец коромысла с помощью верхнего захвата 8 соединен с образцом, и когда образец перемещается вниз, коромысло поворачивается на оси опоры и с помощью тяги отклоняет груз. Г-образный рычаг снабжен рычагом 5, который перемещает перо самописца 6, рисующее кривую нагружения на координатной бумаге 4. Перемещение пера пропорционально величине отклонения груза, а следовательно, величине нагрузки в образце. Перемещение бумаги осуществляется от гайки кинематической связью 11 (гайка 12 с помощью системы шестерен и валов соединена с валиком, на котором установлена бумага). Таким образом, бумага перемещается пропорционально абсолютному удлинению образца. Соотношение между величиной перемещения нижнего конца образца (его удлинения) и перемещением бумаги равно один к ста, т. е. один миллиметр удлинения образца соответствует ста миллиграммам перемещения бумаги.

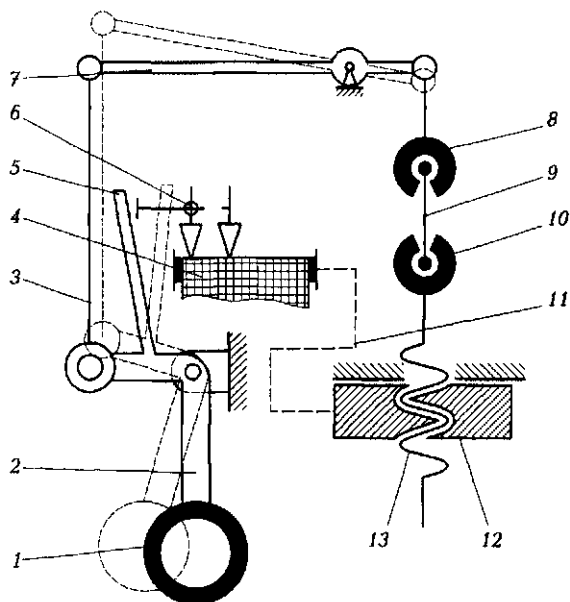


Рис. 7.3. Кинематическая схема разрывной испытательной машины ИМ-4Р:
 1 — груз; 2 — Г-образный рычаг; 3 — тяга; 4 — координатная бумага; 5 — рычаг;
 6 — перо самописца; 7 — коромысло; 8, 10 — захваты; 9 — образец; 11 — кинематическая связь; 12 — гайка; 13 — винт

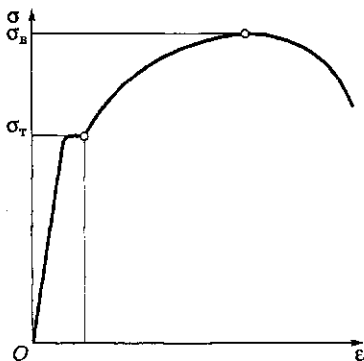


Рис. 7.4. Диаграмма растяжения:
 ϵ — относительная деформация; σ — на-
 пряжение; σ_n — предел прочности; σ_T —
 предел текучести

Таким образом, на координатной бумаге самонисца рисуется диаграмма растяжения, вид которой показан на рис. 7.4.

С помощью диаграммы растяжения рассчитываются различные характеристики прочности и пластичности (графоаналитический метод).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Выполнить испытание на растяжение цилиндрического образца из низкоуглеродистой стали на испытательной разрывной машине с записью диаграммы растягивающая сила (P) — абсолютное удлинение образца (Δl).

Таблица 7.1. Данные для расчета механических свойств при испытании на растяжение

Вариант	P_T , Н	P_n , Н	l_0 , мм	l_k , мм	d_0 , мм	d_k , мм
1	5 000	6 500	30	36,4	6	3,80
2	5 500	7 150	30	36,3	6	3,82
3	6 000	7 800	30	36,2	6	3,84
4	6 500	8 450	30	36,1	6	3,86
5	7 000	9 100	30	36,0	6	3,88
6	7 500	9 750	30	35,9	6	3,90
7	8 000	10 400	30	35,8	6	3,92

Вариант	P_T , Н	P_B , Н	l_{or} , мм	l_{kr} , мм	d_{or} , мм	d_{kr} , мм
8	8 500	11 050	30	35,7	6	3,94
9	9 000	1 170	30	35,6	6	3,96
10	9 500	12 350	30	35,5	6	3,98
11	10 000	13 000	30	35,4	6	4,00
12	10 500	13 650	30	35,3	6	4,02
13	11 000	14 300	30	35,2	6	4,04
14	11 500	14 950	30	35,1	6	4,06
15	12 000	15 600	30	35,0	6	4,08
16	12 500	16 250	30	34,9	6	4,10
17	13 000	16 900	30	34,8	6	4,12
18	13 500	17 550	30	34,7	6	4,14
19	14 000	18 200	30	34,6	6	4,16
20	14 500	18 850	30	34,5	6	4,18
21	15 000	19 500	30	34,4	6	4,20
22	15 500	20 150	30	34,3	6	4,22
23	16 000	20 800	30	34,2	6	4,24
24	16 500	21 450	30	34,1	6	4,26
25	17 000	22 100	30	34,0	6	4,28
26	17 500	22 750	30	33,9	6	4,30
27	18 000	23 400	30	33,8	6	4,32
28	18 500	24 050	30	33,7	6	4,34
29	19 000	24 700	30	33,6	6	4,36
30	19 500	25 350	30	33,5	6	4,38
31	20 000	26 000	30	33,4	6	4,40
32	20 500	26 650	30	33,3	6	4,42
33	21 000	27 300	30	33,2	6	4,44
34	21 500	27 950	30	33,1	6	4,46
35	22 000	28 600	30	33,0	6	4,48

2. По одному из вариантов задания (табл. 7.1) составить табл. 7.2 результатов испытаний.

Таблица 7.2. Результаты испытаний на растяжение

Вариант	P_T , Н	P_B , Н	l_0 , мм	l_k , мм	d_0 , мм	d_k , мм

Примечание. l_0 и l_k — длина рабочей (расчетной) части образца до и после испытания соответственно; d_0 — диаметр рабочей части образца до испытания; d_k — диаметр рабочей части «в шейке» образца после разрыва.

3. Рассчитать площадь поперечного сечения образца до разрыва $F_0 = \pi d_0^2/4$, мм², и следующие характеристики прочности и пластичности:

предел прочности (временное сопротивление), Н/мм², — условное напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, выдерживаемой образцом:

$$\sigma_b = \frac{P_B}{F_0};$$

предел текучести (физический), Н/мм², — условное напряжение, соответствующее наименьшей нагрузке «площадки текучести», когда деформация образца происходит без увеличения нагрузки:

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}.$$

При статических испытаниях на растяжение можно оценить пластичность металла. Внешним признаком пластичности металла является пластическая деформация образца перед разрушением, которая вызывает сужение поперечного сечения образца в месте разрушения. Образуется так называемая «шейка». Хрупкий образец разрушается без образования шейки.

Характеристиками пластичности являются:

относительное удлинение, %, — отношение прироста длины образца после разрыва к первоначальной расчетной длине:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} 100.$$

При испытании на растяжение l_k можно определить путем непосредственного замера с помощью штангенциркуля длины расчетной зоны после разрушения образца (см. рис. 7.2). Для этого две части образца соединяют между собой и измеряют l_k :

относительное сужение, %, — отношение наибольшего (в месте разрыва) уменьшения поперечного сечения образца к первоначальной площади поперечного сечения:

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} 100 = \frac{d_0^2 - d_k^2}{d_0^2} 100,$$

где F_k — площадь поперечного сечения образца после разрыва.

ПРИБОРЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Для выполнения работы необходимы:

- разрывная испытательная машина;
- образцы для испытания на растяжение.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. На разрывной машине испытать образец на разрыв.
2. Рассчитать предел прочности, предел текучести, относительное удлинение и относительное сужение образца.

ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. Сформулировать цель работы.
2. В тетради для лабораторных работ изобразить испытуемые образцы. Указать материал образцов.
3. Зарисовать схему диаграммы нагружения.
4. Заполнить табл. 7.2.
5. Вычислить σ_b ; σ_T ; δ ; ψ .

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как рассчитывается напряжение в образце при испытании на растяжение?
2. Как называются рассчитанные значения напряжений при испытании на растяжение?
3. Какие характеристики материалов можно определить при испытании на растяжение?
4. Как рассчитываются относительные удлинение и сужение?

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ СТАЛЕЙ

Цель работы — изучить микроструктуру углеродистых сталей и определение марки стали по микроструктуре.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Железоуглеродистые сплавы — стали и чугуны имеют очень большое значение для современного машиностроения — они являются основным материалом при производстве большинства механизмов.

Диаграмма состояния Fe—Fe₃C получается в условиях, когда кинетически более вероятно образование цементита. В этой системе кристаллизуются стали и белые чугуны.

Микроструктура отожженных углеродистых сталей. Железо является полиморфным элементом, так как имеет две модификации — α и γ . Модификация α -Fe существует при температурах до 911 °С и от 1392 до 1539 °С, имеет объемно-центрированную кубическую решетку (ОЦК-решетку).

Модификация γ -Fe существует в интервале температур от 911 до 1392 °С и имеет гранецентрированную кубическую решетку (ГЦК-решетку).

Фазы в системе железо — углерод: жидкий сплав, твердые растворы (феррит и аустенит), а также химическое соединение цементит и графит.

На диаграмме состояния системы железо — углерод (рис. 8.1) стали находятся левее точки *E* (2,14 % С).

Феррит — это твердый раствор внедрения углерода в α -Fe с объемно-центрированной кубической решеткой. Предельная растворимость углерода в α -Fe составляет 0,02 % С (точка *P*).

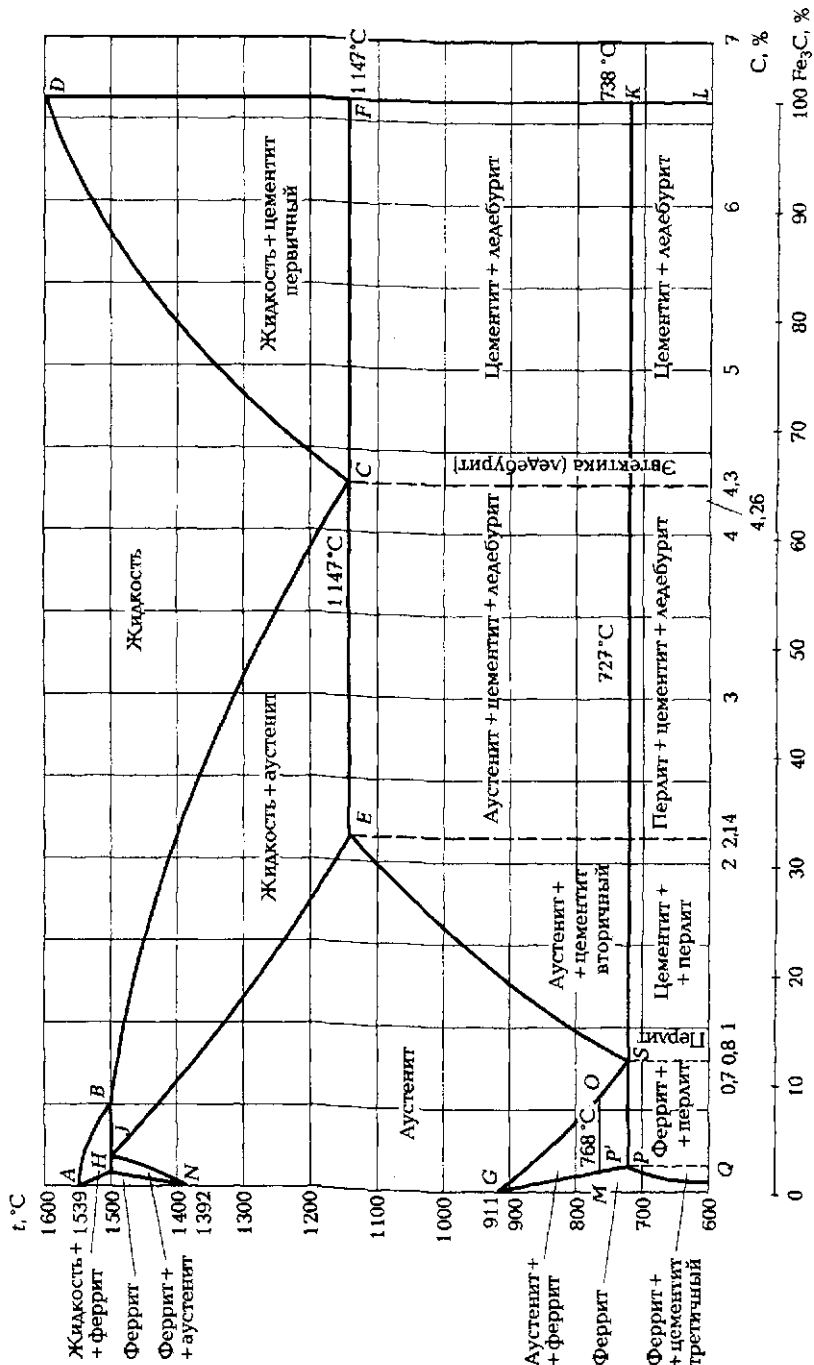


Рис. 8.1. Диаграмма состояния системы железо—углерод

Цементит — это карбид железа Fe_3C с ромбической решеткой. Он содержит 6,67 % С.

При температуре выше линии *GSE* стабильной фазой является аустенит — твердый раствор внедрения углерода в γ -Fe с границентрированной кубической решеткой. Предельная растворимость углерода в γ -Fe составляет 2,14 % С (точка *E*).

Во всех сталях правее точки *P* при небольшом переохлаждении до температур ниже 727 °С происходит эвтектоидный распад аустенита состава точки *S* (0,8 % С) на смесь феррита и цементита. Микроструктура медленно охлажденных сталей формируется в результате тех превращений, которые претерпевает аустенит. Сплавы, содержащие менее 0,02 % С (точка *P*), называют техническим железом. По составу и микроструктуре углеродистые стали подразделяют на доэвтектоидные (0,02 ... 0,8 % С), эвтектоидные (0,8 % С) и заэвтектоидные (0,8 ... 2,14 % С) (табл. 8.1).

Таблица 8.1. Твердость структурных составляющих в сталях и чугунах

Структурные составляющие	Феррит	Аустенит	Цементит	Перлит	Ледебурит
НВ, МПа	800	2 000	8 000	1 600... 2 000	5 500

Эвтектоидная сталь. Рассмотрим формирование структуры эвтектоидной стали, используя диаграмму состояния системы железо — углерод (см. рис. 8.1). Выше температуры 727 °С эвтекто-

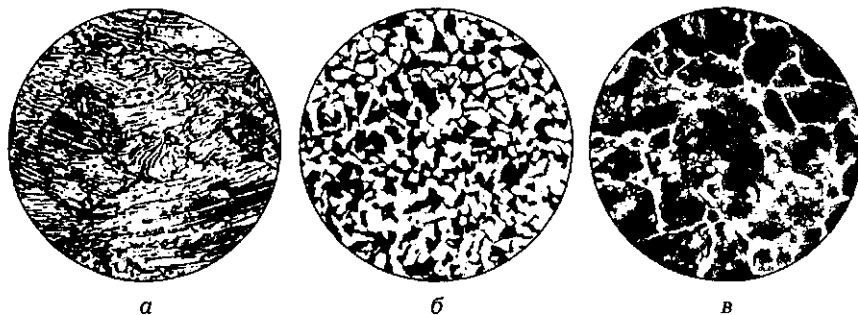
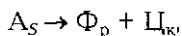


Рис. 8.2. Микроструктуры и эскизы микроструктур углеродистых сталей после отжига:

a — эвтектоидная сталь; *б* — доэвтектоидная сталь; *в* — заэвтектоидная сталь

идная сталь состоит из зерен аустенита. При температуре, соответствующей линии PSK , происходит эвтектоидное превращение по реакции



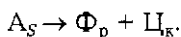
в результате которой образуется эвтектоид, состоящий из смеси феррита с содержанием 0,02 % С и цементита (6,67 % С). Эвтектоидное превращение идет при постоянной температуре и составе фаз. Так как после травления поверхность шлифа приобретает перламутровый оттенок, эвтектоид называют перлитом.

Перлит имеет пластинчатое строение: пластины феррита более широкие, у цементита более узкие. По окончании полного распада аустенита в эвтектоидной стали образуются перлитные колонии различной ориентации (рис. 8.2, а).

Дозэвтектоидные стали. Эти стали после окончания кристаллизации состоят из аустенита, который не претерпевает изменений вплоть до температуры, соответствующих линии GS .

При охлаждении доэвтектоидной стали ниже линии GS происходит полиморфное превращение: $A \rightarrow \Phi$. Суть этого превращения заключается в изменении типа кристаллической решетки: A (ГЦК) $\rightarrow \Phi$ (ОЦК).

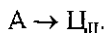
При температуре 727 °С происходит эвтектоидное превращение:



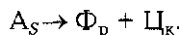
Таким образом, при комнатной температуре структура доэвтектоидной стали состоит из двух структурных составляющих — феррита и перлита (рис. 8.2, б). Чем больше углерода в доэвтектоидной стали, тем меньше в ее структуре феррита.

Доля феррита — 100 % в точке P и 0 % в точке S . Феррит зарождается как на границах аустенитных зерен, так и внутри них в виде равноосных или слегка вытянутых кристаллов с искривленными границами. После травления 1...5%-ным раствором HNO_3 феррит — светлый, а перлит — темный.

Заэвтектоидные стали. При медленном охлаждении заэвтектоидной стали из аустенитной области ниже линии ES из аустенита происходит выделение вторичного цементита в виде тонкой сетки по границам аустенитных зерен:



При переохлаждении аустенита (температура ниже 727 °С) происходит эвтектоидный распад аустенита с образованием перлита:



В результате в структуре заэвтектоидных сталей при комнатной температуре имеем две структурные составляющие: вторичный цементит (светлая сетка) и перлит (темные участки) (рис. 8.2, в). Чем больше углерода в заэвтектоидной стали, тем больше в ней вторичного цементита. Относительная доля вторичного цементита в заэвтектоидных сталях может изменяться в узких пределах — от 0 до 20 %.

В связи с тем что перлит присутствует как в доэвтектоидной так и в заэвтектоидной стали, отличить при микроанализе одну сталь от другой можно только по избыточным выделениям: если в структуре находится феррит, то сталь доэвтектоидная, а если вторичный цементит, то сталь заэвтектоидная.

Металлографическое определение содержания углерода в отожженных сталях. Если углеродистая сталь хорошо отожжена, т. е. приведена в равновесное состояние, то микроструктурным анализом можно определить содержание в ней углерода.

Углерод в доэвтектоидной стали распределен между ферритом и перлитом. В феррите содержатся сотые доли процента углерода которыми можно пренебречь и считать, что практически весь углерод в доэвтектоидной стали находится в перлите. В перлите содержится 0,8 % С. В доэвтектоидной стали на перлит приходится только часть сплава, и содержание углерода (в процентах по массе) пропорционально площади шлифа, занимаемой перлитом. Эта пропорция вытекает из примерного равенства плотностей феррита и перлита; в противном случае по микроструктуре можно было бы судить только об объемных соотношениях.

Содержание углерода в доэвтектоидной стали определяют по формуле

$$X_C = 0,8F/100,$$

где F — площадь шлифа, занятая перлитом, % (оценивается визуально).

Такой метод дает хорошие результаты. Если абсолютная ошибка в оценке площади, занимаемой перлитом, составляет 10 %, то абсолютная ошибка в определении содержания углерода — всего 0,08 %.

Стандартные марки углеродистых сталей. По назначению стали классифицируются на конструкционные (с содержанием углерода менее 0,7 %) и инструментальные (с содержанием углерода более 0,7 %).

Углеродистые конструкционные стали делятся на две группы обыкновенного качества и качественные.

Таблица 8.2. Марки углеродистых конструкционных сталей обыкновенного качества (ГОСТ 380--2005)

Марка	Ст0	Ст1	Ст2	Ст3	Ст4	Ст5	Ст6
С, %	0,23	0,06...0,12	0,09...0,15	0,14...0,22	0,18...0,27	0,28...0,37	0,38...0,49

Таблица 8.3. Марки углеродистых инструментальных сталей (ГОСТ 1435--99)

Марка	У7	У8	У9	У10	У11	У12	У13
С, %	0,66...0,73	0,75...0,84	0,85...0,94	0,95...1,04	1,05...1,14	1,15...1,24	1,25...1,35

Стали обыкновенного качества (ГОСТ 380—2005) (табл. 8.2) в зависимости от назначения и гарантируемых свойств поставляют трех групп: А, Б, В.

Они маркируются сочетанием букв «Ст» и цифрой (от 0 до 6), показывающей номер марки. Стали групп Б и В имеют перед маркой буквы Б или В, указывающие на принадлежность к этим группам. Группа А в обозначении марки стали не указывается.

Степень раскисления обозначают добавлением в конце марки букв кп — для кипящих сталей, пс — для полуспокойных и сп — для спокойных сталей. Концентрация марганца в разных марках составляет от 0,25 до 0,8 %. Буква Г в марке стали указывает на повышенное содержание марганца (0,8... 1,1 %). Например, Ст3Гпс. При переходе от марки Ст1 к марке Ст6 временное сопротивление возрастает от 300 до 600 МПа, а пластичность снижается. Стали этой группы широко используют для производства различных деформированных полуфабрикатов: листов, прутков, труб и т. д.

Качественные стали (ГОСТ 1050—88) маркируют двумя цифрами, которые указывают на среднее содержание углерода в сотых долях процента: 08, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 58, 60. Концентрация марганца в этих сталях составляет 0,35... 0,8 %, а кремния — менее 0,3 %. Механические свойства качественных сталей выше, чем у сталей обыкновенного качества, поэтому их применяют для изделий более ответственного назначения: стали марок 08—25 используют для сварных конструкций, марки 30—45 — для производства деталей машин.

Инструментальные качественные углеродистые стали (ГОСТ 1435—99) маркируют буквой У и числом, указывающим на среднее содержание углерода в десятых долях процента (табл. 8.3). Если в конце марки находится буква А, то сталь относится к высококачественным, т. е. с уменьшенным содержанием серы и фосфора.

Концентрация примесей составляет: $Mn < 0,3 \%$, $Si < 0,3 \%$, $S < 0,028 \%$, $P < 0,03 \%$. Углеродистые стали обладают высокой твердостью и износостойкостью, поэтому их используют для изготовления ударно-штампового (У7—У9) и режущего инструмента (У10, У11). Структура всех рассмотренных сталей в отожженном состоянии определяется концентрацией углерода и, следовательно, может быть проанализирована по диаграмме железо—углерод.

Раскисление — процесс удаления из жидкого металла кислорода. Спокойные стали раскисляют марганцем, кремнием и алюминием, кипящие — только марганцем. Полуспокойные стали по степени раскисления занимают промежуточное положение между спокойными и кипящими.

ПРИБОРЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Для выполнения работы необходимы:

- металлографический микроскоп;
- готовые микрошлифы углеродистых сталей (доэвтектоидных, эвтектоидных, заэвтектоидных);
- изображения микроструктур углеродистых сталей.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Начертить диаграмму состояния системы железо — углерод с обозначениями фаз и структур.

2. Просмотреть набор приготовленных шлифов углеродистых сталей и чугунов при увеличении в 250 — 500 раз с помощью оптического микроскопа.

3. Шлиф эвтектоидной стали для выявления строения перлита просмотреть при увеличении не менее чем в 500 раз.

4. Используя атлас микроструктур, схематично зарисовать изученные микроструктуры сталей, заполнив табл. 8.4.

5. По микроструктурам стали определить содержание углерода и марку сплава.

Таблица 8.4. Микроструктура углеродистых сталей

Наименование сплава	Структурные составляющие	Микроструктура (зарисовка)	Площадь, занимаемая перлитом	Примерное содержание углерода	Марка	Примерное назначение
Техническое железо						
Доэвтектоидная сталь низкоуглеродистая						
Доэвтектоидная сталь среднеуглеродистая						

Наименование сплава	Структурные составляющие	Микроструктура (зарисовка)	Площадь, занимаемая перлитом	Примерное содержание углерода	Марка	Примерные значения
Доэвтектоидная сталь высокоуглеродистая						
Эвтектоидная сталь (перлит пластинчатый)						
Эвтектоидная сталь (перлит зернистый)						
Заэвтектоидная сталь						

ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. Сформулировать цель работы.
2. Начертить диаграмму $Fe-Fe_3C$, компоненты и фазы в системе железо — углерод. Показать на диаграмме характерные точки и линии превращений по диаграмме железо — углерод. Привести классификацию сталей и чугунов по микроструктуре.
3. Заполнить табл. 8.4.
4. Сделать выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие сплавы относятся к сталям?
2. Как классифицируют углеродистые стали?
3. Какова предельная растворимость углерода в α -Fe и в γ -Fe?
4. Какой процесс протекает в сталях при переохлаждении аустенита ниже температуры $727^\circ C$?
5. Что такое перлит, феррит, аустенит, цементит?

6. Сколько углерода содержит эвтектоидная сталь?
7. Какие структурные составляющие имеет доэвтектоидная сталь при комнатной температуре?
8. Какие структурные составляющие имеет заэвтектоидная сталь?
9. Как по микроструктуре отличить доэвтектоидную сталь от заэвтектоидной?
10. По какой формуле определяют содержание углерода в отожженной углеродистой стали?
11. В каких пределах может изменяться количество феррита в доэвтектоидных сталях разного состава?
12. Как маркируют углеродистые стали?

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ЧУГУНОВ

Цель работы — изучить микроструктуру чугунов с помощью металлографического микроскопа.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

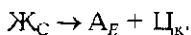
Разновидности чугунов. Чугунами называются железоуглеродистые сплавы, содержащие более 2,14 % С. Благодаря сочетанию высоких литейных свойств, достаточной прочности, износостойкости, а также относительной дешевизне чугуны получили широкое распространение в машиностроении. Их используют для производства качественных отливок сложной формы при отсутствии жестких требований к габаритным размерам и массе деталей.

В зависимости от того, в какой форме присутствует углерод в сплавах, различают белые, серые, высокопрочные и ковкие чугуны.

Белые чугуны. Белые чугуны на диаграмме состояния системы железо—углерод (см. рис. 8.1) находятся правее точки *E* (2,14 % С). В них, в отличие от сталей, обязательно кристаллизуется эвтектика аустенит—цементит, называемая ледебуритом. В отличие от серых чугунов, содержащих структурно-свободный углерод — графит, в белых чугунах углерод, не вошедший в твердый раствор на основе железа, образует с железом карбид Fe_3C (цементит). Чугуны с таким фазовым составом имеют светлый излом, и поэтому их называют белыми. По химическому составу и структуре белые чугуны подразделяют на эвтектические (4,3 % С), доэвтектические (менее 4,3 % С) и заэвтектические (более 4,3 % С).

Эвтектические белые чугуны. Эвтектический белый чугун кристаллизуется при эвтектической температуре 1 147 °С с одно-

временным выделением двух фаз (аустенита и цементита) по реакции



Образующаяся смесь этих фаз (эвтектика) называется ледебуритом.

Структура ледебурита обычно состоит из хорошо выраженных эвтектических колоний (рис. 9.1, а). Каждая эвтектическая колония в ледебурите — это двухфазный сросток двух разветвленных кристаллов цементита и аустенита. Каждая эвтектическая колония растет из одного центра.

При достижении температуры 727°C аустенит в эвтектическом чугуне приобретает состав точки S (см. рис. 8.1). При переохлаждении ниже этой температуры происходит эвтектоидный распад аустенита с образованием смеси феррита и цементита, называемой перлитом. Теперь уже ледебурит состоит не из аустенита и цементита, а из перлита, образовавшегося на месте эвтектического аустенита, и цементита, который не претерпевает никаких превращений. Ледебурит по окончании эвтектической кристаллизации, состоящий из аустенита и цементита, можно условно обозначать как $L(A + Ц)$. Ледебурит после эвтектоидного (перлитного) превращения называют превращенным. Он состоит из перлита и эвтектического цементита, причем сам перлит состоит из феррита и эвтектоидного цементита. Превращенный ледебурит обозначается как $L_{пр}(П + Ц)$.

При металлографическом анализе изучается только превращенный ледебурит. Двухфазное строение перлита в колониях

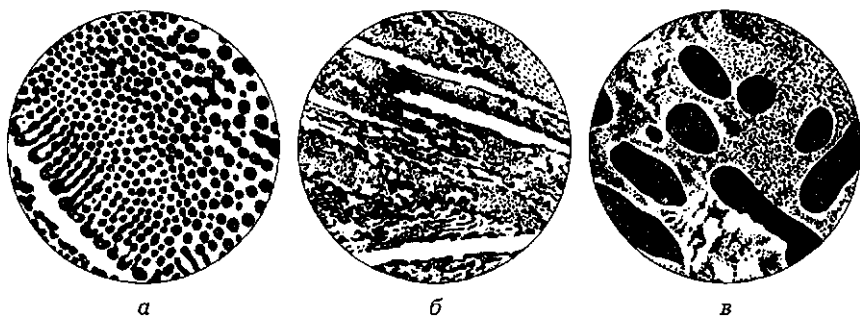


Рис. 9.1. Микроструктура белого чугуна:

а — ледебурит превращенный (эвтектический чугун); б — ледебурит превращенный и цементит (заэвтектический чугун); в — ледебурит превращенный, цементит и перлит (доэвтектический чугун)

превращенного ледебурита обычно при средних увеличениях не выявляется, и темные включения в превращенном ледебурите выглядят как принадлежащие одной фазе, хотя в действительности они являются эвтектоидной смесью феррита и цементита: $\Pi(\Phi + \text{Ц})$.

Заэвтектические белые чугуны. Структурообразование заэвтектического белого чугуна отличается от эвтектического чугуна только тем, что перед эвтектической кристаллизацией ледебурита при температурах ниже линии CD (см. рис. 8.1) протекает кристаллизация первичного цементита. Первичный цементит кристаллизуется в форме пластин (рис. 9.1, б).

После окончания эвтектической кристаллизации ледебурита $\Lambda(A + \text{Ц})$ при охлаждении в твердом состоянии происходят те же процессы фазовых превращений, что и в эвтектическом белом чугуне.

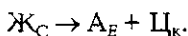
При переохлаждении ниже температуры 727°C происходит эвтектоидный распад эвтектического аустенита с образованием перлита, двухфазное строение которого на шлифе обычно не выявляется.

В результате заэвтектический белый чугун состоит из двух структурных составляющих: кристаллов первичного цементита Ц_1 и превращенного ледебурита $\Lambda_{\text{пр}}(\Pi + \text{Ц})$.

Дозэвтектические белые чугуны. В доэвтектических белых чугунах кристаллизация сплава начинается с выделения аустенита из жидкого раствора: $\text{Ж} \rightarrow \text{А}$.

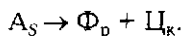
Первичный аустенит кристаллизуется в виде дендритов с округлыми ветвями. На рис. 9.1, в большие темные округлые участки — это дендритные ячейки, являющиеся сечениями ветвей дендритов первичного аустенита.

После первичной кристаллизации аустенита происходит эвтектическая кристаллизация ледебурита:



Строение колоний ледебурита в доэвтектическом чугуне такое же, как и в эвтектическом.

По окончании выделения вторичного цементита внутри первичного аустенита и аустенита эвтектического происхождения происходит эвтектоидный распад:



Дендриты первичного аустенита, превратившиеся в перлит, сохраняют свои первоначальные очертания.

Независимо от сочетания структурных составляющих как стали, так и белые чугуны при комнатной температуре состоят из одних и тех же двух фаз: феррита и цементита. В сталях цементит образуется только при превращениях в твердом состоянии (эвтектоидный распад аустенита, а также выделение вторичного цементита).

При комнатной температуре в доэвтектическом белом чугуне можно увидеть три структурные составляющие: перлит, вторичный цементит и превращенный ледебурит.

В белых чугунах цементит всегда образуется при кристаллизации расплава (при эвтектической кристаллизации ледебурита, а также в виде первичных кристаллов в заэвтектических чугунах). Поскольку в белых чугунах цементита больше, чем в сталях, и к тому же кристаллы цементита, образовавшиеся из расплава, более грубые, чем образовавшиеся из аустенита, то белые чугуны отличаются большой хрупкостью.

Серые чугуны. Если в структуре чугуна содержится графит, то излом имеет серый цвет, и такой чугун называют серым.

На нетравленном полированном шлифе графит обнаруживается в виде темных пластинок, расположенных в металлической основе чугуна. Пластины графита могут быть различной величины и формы (рис. 9.2). Механические свойства чугуна зависят от формы и размеров выделений графита, так как пластинки графита действуют как надрезы, являясь концентраторами напряжений. Поэтому серый чугун лишен пластичности, относительное удлинение δ почти равно нулю.

В сером чугуне выявляются различные структуры металлической основы в зависимости от того, насколько полно прошел процесс графитизации. По количеству связанного углерода возможны следующие типы структуры серых чугунов.

Ферритный (рис. 9.2, а). Структура — феррит и графит. Количество связанного углерода практически равно нулю ($C < 0,02\%$). Темные пластинки — графит, светлые зерна — феррит.

Ферритно-перлитный (рис. 9.2, б). Структура — феррит, перлит, графит. Количество связанного углерода меньше эвтектоидной концентрации ($C = 0,02 \dots 0,8\%$). Темные пластинки — графит, основное поле состоит из светлых участков феррита и темных участков пластинчатого перлита.

Перлитный (рис. 9.2, в). Структура — перлит и графит. Количество связанного углерода равно эвтектоидной концентрации ($0,8\% C$). Темные пластинки — графит, основное поле — пластинчатый перлит.

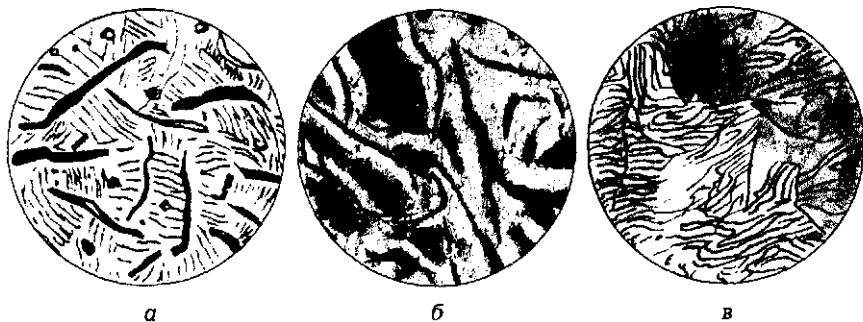


Рис. 9.2. Микроструктура серого чугуна:
а — ферритный; *б* — ферритно-перлитный; *в* — перлитный

Для обозначения серого чугуна используют сочетание букв СЧ (серый чугун) и числа, показывающего уменьшенное в 10 раз значение (МПа) временного сопротивления при растяжении σ_b , например, 10, 15, 25, 35.

Высокопрочные чугуны. Высокопрочными называют чугуны, в которых графит имеет шаровидную форму. Их получают модифицированием магнием, который вводят в жидкий чугун (0,02... 0,08 %). По микроструктуре металлической основы высокопрочные чугуны могут быть ферритные, ферритно-перлитные и перлитные (рис. 9.3).

Шаровидный графит — менее сильный концентратор напряжений, чем пластинчатый, поэтому чугуны с шаровидным графитом обладают более высокой прочностью и некоторой пластичностью.

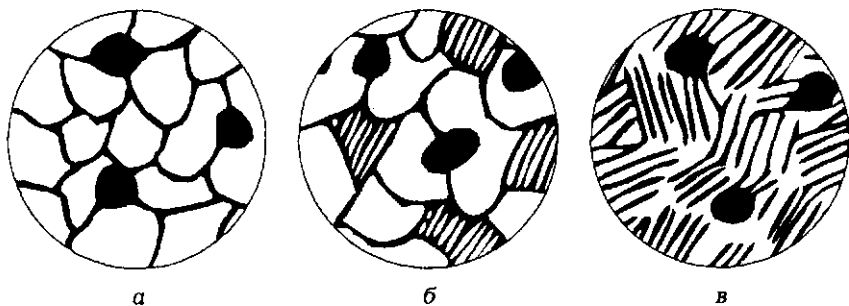


Рис. 9.3. Микроструктура высокопрочного чугуна:
а — ферритный; *б* — ферритно-перлитный; *в* — перлитный

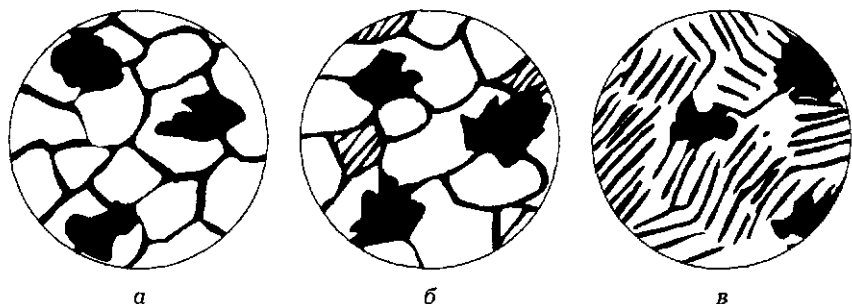


Рис. 9.4. Микроструктура ковкого чугуна:
 а — ферритный; б — ферритно-перлитный; в — перлитный

Марка высокопрочного чугуна обозначается буквами ВЧ и числом, обозначающим уменьшенное в 10 раз значение его временного сопротивления при растяжении $\sigma_{\text{в}}$. Например, ВЧ 35, ВЧ 45, ВЧ 60, ВЧ 80, ВЧ 100.

Ковкие чугуны — это чугуны, в которых графит имеет хлопьевидную форму. Их получают продолжительным отжигом (70...80 ч) белых доэвтектических чугунов. По структуре металлической основы, которая определяется режимом отжига, ковкие чугуны бывают ферритными, ферритно-перлитными и перлитными (рис. 9.4).

Маркируют ковкие чугуны буквами КЧ и числами, первое из которых указывает уменьшенное в 10 раз значение $\sigma_{\text{в}}$, второе — значение относительного удлинения δ , %. Например, КЧ 30—6, КЧ 35—8, КЧ 37—12, КЧ 45—7, КЧ 60—3, КЧ 80—1,5.

Из ковких чугунов изготавливают детали высокой прочности, работающие в тяжелых условиях износа, способные воспринимать ударные и знакопеременные нагрузки, детали водо- и газопроводных установок.

ПРИБОРЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Для выполнения работы необходимы:

- металлографический микроскоп;
- готовые микрошлифы чугунов (доэвтектического, эвтектического, заэвтектического белых чугунов, серого, ковкого, высокопрочного чугунов);
- изображения микроструктур чугунов.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Начертить диаграмму состояния системы железо — углерод с обозначениями фаз и структур.

2. Просмотреть набор приготовленных шлифов чугунов при увеличении в 250—500 раз с помощью оптического микроскопа.

3. Используя атлас микроструктур, схематично зарисовать изученные микроструктуры чугунов, заполнив табл. 9.1, 9.2, 9.3 (в зависимости от задания).

4. Изложить основные теоретические положения: классификация, структура, свойства, маркировка, область применения белых чугунов и чугунов с графитом; влияние формы графита и металлической основы на свойства чугунов.

ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. Сформулировать цель работы.

2. Заполнить табл. 9.1, 9.2, 9.3.

3. Сделать выводы по работе.

Таблица 9.1. Микроструктура белых чугунов

Наименование чугуна	Микроструктура	Структурные составляющие
Доэвтектический белый чугун		
Эвтектический белый чугун		
Заэвтектический белый чугун		

Таблица 9.2. Форма графита в чугунах

Наименование чугуна	Форма графита (название)	Микроструктура (зарисовка)
Серый чугун		
Ковкий чугун		
Высокопрочный чугун		

Таблица 9.3. Металлическая основа в чугунах

Наименование чугуна	Структурные составляющие	Микроструктура (зарисовка)	Марка	Примерное назначение
Серый чугун с ферритной основой				
Серый чугун с ферритно-перлитной основой				
Серый чугун с перлитной основой				
Ковкий чугун с ферритной основой				
Ковкий чугун с ферритно-перлитной основой				

Наименование чугуна	Структурные составляющие	Микроструктура (зарисовка)	Марка	Примерное назначение
Ковкий чугун с перлитной основой				
Высокопрочный чугун с ферритной основой				
Высокопрочный чугун с ферритно-перлитной основой				
Высокопрочный чугун с перлитной основой				

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой сплав называется чугуном?
2. Из каких фаз состоит заэвтектический серый чугун?
3. Как по микроструктуре отличить заэвтектический белый чугун от доэвтектического?
4. Какие структурные составляющие можно наблюдать в доэвтектическом белом чугуне при комнатной температуре?
5. Опишите структуру, свойства, маркировку и область применения серых, ковких и высокопрочных чугунов.
6. Какова температура плавления эвтектического белого чугуна?
7. Какое превращение происходит в железоуглеродистых сплавах при эвтектической температуре?

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТЖИГА И НОРМАЛИЗАЦИИ НА СТРУКТУРУ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Цель работы — изучить превращения, происходящие в стали при непрерывном охлаждении аустенита с различными скоростями; установить структуру и свойства стали после различных скоростей охлаждения аустенита и виды термической обработки в зависимости от охлаждающей среды.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Многие виды термической обработки осуществляются путем нагрева стали до аустенитного состояния и последующего охлаждения с различными скоростями (в различных средах). Структура и свойства стали после такой термообработки определяются достигнутой степенью переохлаждения.

Критические точки стали. Температура нагрева стали для термической обработки выбирается по стальному участку диаграммы состояния железо—углерод (рис. 10.1).

Температурные точки, соответствующие тем или иным превращениям в железоуглеродистых сплавах, называются **критическими**. Рассмотрим наиболее важные с практической точки зрения критические точки.

Все критические точки обозначаются буквой *A*. Ввиду того что положение критических точек при нагреве и охлаждении не совпадает, точки, полученные при нагреве, обозначаются индексом «с», а при охлаждении «г».

Первая из критических точек — точка A_1 лежит на линии *PSK*. Из этого следует, что превращение, имеющее место в этой критической точке, во всех сплавах происходит при одной и той же температуре. Это — эвтектоидное превращение. При нагреве в этой

точке перлит превращается в аустенит, а при охлаждении происходит превращение аустенита в перлит. Таким образом, в точке A_{C1} , перлит превращается в аустенит, а в точке A_{C1} аустенит превращается в перлит.

Точка A_3 лежит на линии GS . Превращение, соответствующее этой точке, происходит в доэвтектоидных сталях при температуре, которая зависит от содержания в стали углерода. При возрастании содержания углерода от 0 до 0,8% положение точки A_3 меняется от 910 до 727°. В точке A_{C3} , т.е. при охлаждении, из аустенита начинает выделяться феррит. Точка A_{C3} соответствует концу растворения феррита в аустените.

Точка A_{Cm} лежит на линии SE . На этой линии при охлаждении заэвтектоидной стали из аустенита начинает выделяться вторичный цементит. При нагреве эта точка соответствует окончанию растворения вторичного цементита в аустените.

Перечисленные точки имеют наибольшее практическое значение и их значение необходимо для правильного выполнения операций термической обработки. Кроме того, существуют и другие точки. Например, точка A_0 соответствует магнитному превращению цементита (210°). Точка A_2 — магнитное превращение железа (768°). Эти точки имеют значение при изучении магнитных свойств сплавов.

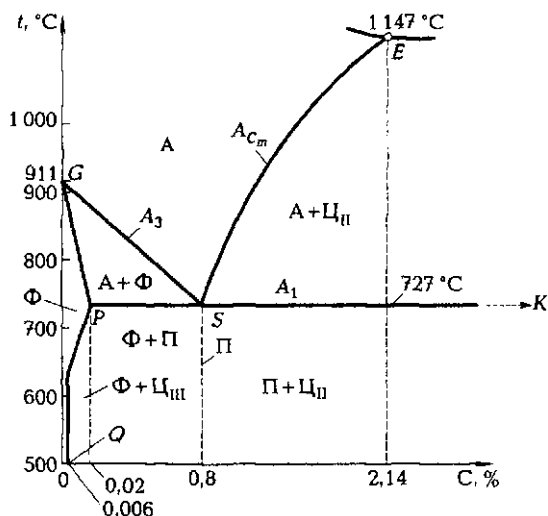
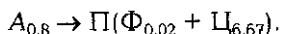


Рис. 10.1. Стальной угол диаграммы состояния сплава железо—углерод: А — аустенит; П — перлит; Ф — феррит; Ц — цементит; С — содержание углерода; t — температура

Превращения, протекающие в стали при охлаждении. При охлаждении аустенита при переходе через критическую точку A_1 происходит аустенитно-перлитное превращение:



При этом протекают следующие процессы:

- перестройка кристаллической решетки А (ГЦК) \rightarrow Φ (ОЦК) является бездиффузионным процессом и идет при любой скорости охлаждения;
- выделение и коагуляция частиц цементита — процессы диффузионные, полнота их протекания зависит от степени переохлаждения аустенита.

Увеличение степени переохлаждения аустенита ведет к замедлению диффузионных процессов, смещению превращения в область более низких температур и получению неравновесных структур. Частицы цементита в ферритно-цементитной смеси становятся настолько мелкими, что их практически не удается различить через обычный микроскоп.

При очень медленном охлаждении вместе с печью, т. е. при малой степени переохлаждения, превращение пройдет полностью, в результате чего из аустенита получится перлит, представляющий собой смесь двух фаз — феррита и цементита ($HV = 180 \dots 200$ МПа).

Отжигом называется нагрев стали выше температуры фазовых превращений, выдержки с последующим медленным охлаждением (обычно вместе с печью). После отжига сталь приобретает равновесную структуру. Для доэвтектоидных сталей такой структурой является смесь перлита с ферритом, для эвтектоидной — перлит, а для заэвтектоидных — перлит с вторичным цементитом (рис. 10.2).

В зависимости от температуры нагрева различают следующие виды отжига:

- неполный отжиг — нагрев стали выше точки A_{c1} , но ниже A_{c3} ;
- полный отжиг — нагрев стали выше точки A_{c3} на $30 \dots 50$ °С;
- гомогенизация, или диффузионный отжиг, — нагрев стали до температуры $1\ 150 \dots 1\ 250$ °С с длительной выдержкой;
- рекристаллизационный отжиг — нагрев детали выше температуры рекристаллизации — $T_{рек}$.

При неполном отжиге происходит частичная перекристаллизация. Целью такого отжига является снятие внутренних напряжений, снижение твердости и перекристаллизация перлита грубопластинчатого в тонкопластинчатый или пластинчатого в зернистый. Неполный отжиг применяется большей частью для заэвтектоидных сталей.

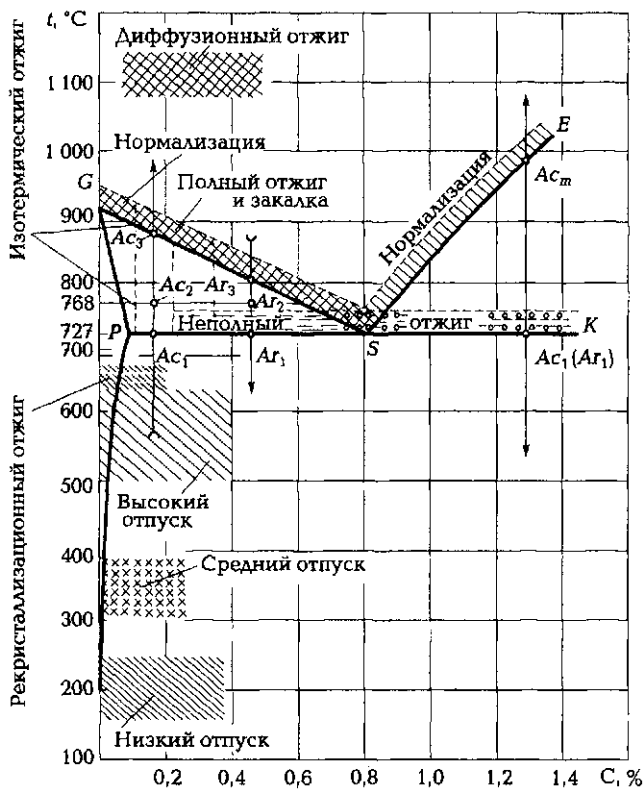


Рис. 10.2. Часть диаграммы состояния сплава железо—углерод, относящаяся к стали, с интервалами температур для термической обработки

При полном отжиге происходит перекристаллизация всего объема стали. Он применяется для доэвтектоидных углеродистых и легированных сталей. После полного отжига сталь приобретает мелкозернистую структуру с равномерным распределением перлита и феррита. Целью полного отжига является снижение твердости, повышение пластичности и вязкости, измельчение зерна, улучшение обрабатываемости резанием. Для заэвтектоидных сталей полный отжиг не применяется.

Диффузионный отжиг проводится с целью выравнивания химического состава литой стали. Он устраняет или уменьшает ликвацию, но не ликвидирует крупнозернистость структуры.

Рекристаллизационный отжиг проводится для снятия наклепа с целью уменьшения твердости и хрупкости стали. Температура ре-

кристаллизации зависит от состава стали. Чем больше в стали содержится углерода и легирующих элементов, тем выше температура рекристаллизации. Чаще всего нагрев при рекристаллизационном отжиге стали проводится до 680... 700 °С. Рекристаллизационный отжиг применяется как промежуточная операция при холодной обработке давлением (штамповка, прокатка, волочение и др).

Если аустенит этой же стали охлаждать с большей скоростью на воздухе, то процесс укрупнения цементита полностью произойти не успеет и в результате превращения получится мелкодисперсная смесь феррита и цементита — сорбит закалки — S_3 (28... 32 HRC).

Нормализацией называется нагрев доэвтектоидной стали до температуры выше A_{c3} , а заэвтектоидной — выше A_{cm} на 50... 60 °С с последующим охлаждением на воздухе. При нормализации происходит перекристаллизация стали, устраняющая крупнозернистую структуру, полученную при литье или ковке.

При охлаждении аустенита с еще большей скоростью (в масле) получается высокодисперсная смесь феррита и цементита — троостит закалки — T_3 (38... 43 HRC).

Структуры перлит, сорбит и троостит — ферритно-цементитные смеси с разной дисперсностью частиц цементита. Цементит в этих структурах имеет пластинчатую форму.

ПРИБОРЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Для выполнения работы необходимы:

- металлографический микроскоп;
- муфельная печь;
- твердомеры для определения твердости по методам Роквелла и Бринелля;
- специальная лупа для измерения диаметра отпечатка шарика твердомера;
- напильники и шлифовальная шкурка для зачистки образцов;
- образцы стали 45 в литом и в горячекатаном состоянии;
- готовые микрошлифы сталей 45 после отжига и нормализации.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. В каждую из пяти муфельных печей поместить образцы литой и горячекатаной стали и прогреть до указанной в табл. 10.1 температуры.

2. Охладить образцы: с печью, на воздухе.
3. Измерить твердость образцов после нормализации по Роквеллу (шкала С), после отжига — по Бринеллю.

ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. Сформулировать цель работы.
2. Заполнить табл. 10.1.
3. Сделать выводы по работе.

Таблица 10.1. Режимы отжига и нормализации стали 45

Марка стали	Температура нагрева, °С	Охлаждение	Твердость		Структура
			HRC	HB	
45 (литая)	650	С печью			
45 (литая)	750	То же			
45 (литая)	850	»			
45 (литая)	950	»			
45 (литая)	1 000	»			
45 (горячекатаная)	650	На воздухе			
45 (горячекатаная)	750	То же			
45 (горячекатаная)	850	»			
45 (горячекатаная)	950	»			
45 (горячекатаная)	1 000	»			

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите виды термической обработки.
2. Назовите охлаждающие среды, соответствующие различным видам термической обработки.

3. Какую термическую обработку называют отжигом?
4. Перечислите виды отжига.
5. При каких условиях и с какой целью проводят нормализацию?
6. Дайте определение перлиту.
7. Что такое сорбит закалки?
8. Дайте определение трооститу закалки.
9. Каковы основные факторы, влияющие на структуру и свойства стали после термообработки?
10. Перечислите критические точки и превращения, протекающие в этих точках.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ И ОТПУСКА

Цель работы — исследовать влияние температуры нагрева при закалке на структуру и свойства доэвтектоидной (сталь 45) и заэвтектоидной (У10) сталей; исследовать влияние температуры отпуска на структуру и твердость сталей.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Соответствие между наблюдаемыми в микроскоп структурами и ожидаемыми по диаграмме состояния может быть только после медленного охлаждения, когда достигается равновесное состояние. Увеличивая скорость охлаждения, можно так переохладить высокотемпературную фазу, например аустенит, что в результате появятся новые метастабильные фазы, которых нет на диаграмме фазового состояния (рис. 11.1).

Продолжительность изотермического превращения и характер образующихся при этом структур зависят от степени переохлаждения аустенита.

Структуры, получаемые при различных скоростях охлаждения, описываются диаграммой изотермического превращения аустенита (рис. 11.2). Для построения диаграммы используются данные кинетических кривых, каждая из которых позволяет зафиксировать момент начала и конца превращений при различных температурах изотермического превращения аустенита.

Диаграмма строится в координатах температура превращения — время (время откладывается по логарифмической шкале).

Выше линии, соответствующей A_1 , располагается аустенит. В области ниже указанной линии и левее кривой начала превращений находится переохлажденный аустенит.

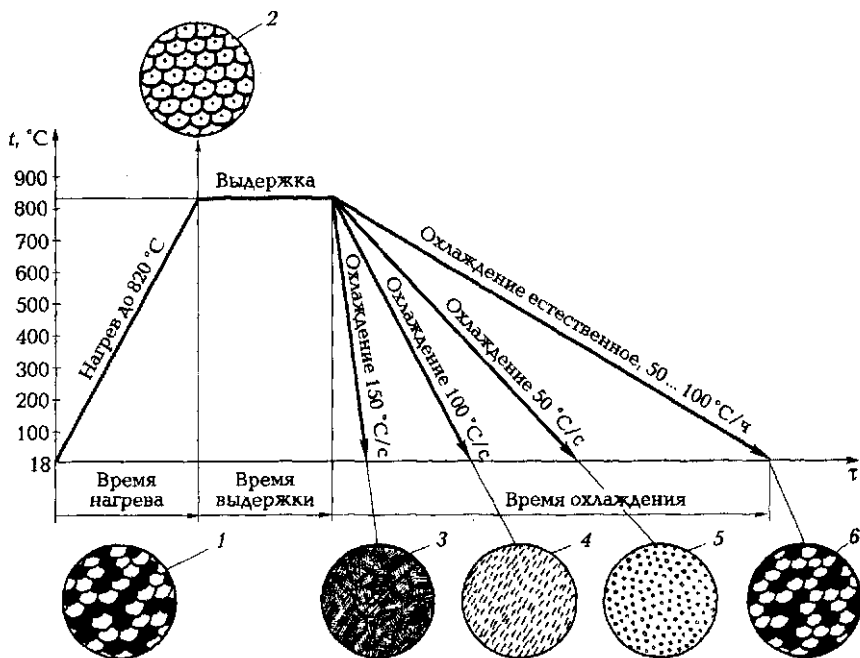


Рис. 11.1. Микроструктуры, полученные в результате нагрева и охлаждения дозвектоидной стали с различной скоростью:

1 — перлит + феррит; 2 — аустенит; 3 — мартенсит; 4 — троостит; 5 — сорбит; 6 — феррит + перлит; t — температура; τ — время

Правее кривой конца превращений аустенита нет. Между линиями начала и конца превращения имеется аустенит и продукты превращения.

Рассмотрим теперь, что представляют собой продукты превращения, полученные при различных температурах.

При небольших переохлаждениях (менее $300\text{ }^{\circ}\text{C}$) образуются следующие структуры: перлит, сорбит и троостит. Они представляют собой ферритно-цементитные смеси, отличающиеся дисперсностью частиц феррита и цементита. Дисперсность смеси зависит главным образом от степени переохлаждения и увеличивается с возрастанием последней.

Каждая структура углеродистой стали образуется в результате превращения переохлажденного аустенита в определенном интервале температур.

При переохлаждении аустенита эвтектоидной стали ниже $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ характер превращения меняется и в результате образуется

промежуточная структура, называемая бейнитом. Бейнит состоит также из феррита и цементита, но имеет иное строение. Различают структуру верхнего и нижнего бейнита. Переход от одного к другому происходит приблизительно при температуре переохлаждения 350 °С. Верхний бейнит имеет перистый вид, а нижний — игольчатый.

Переохлаждение аустенита ниже 230 °С приводит к образованию мартенсита. Мартенсит — это пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в α -железе. Кристаллы мартенсита в пространстве представляют собой пластины, суживающиеся к концу; в плоскости шлифа они имеют вид игл, поэтому говорят, что мартенсит имеет игольчатое строение. Иглы мартенсита расположены друг относительно друга под углом 60 и 120°. Размер игл зависит от размера зерен аустенита, при охлаждении которого был получен мартенсит. Чем мельче зерно аустенита, тем мельче иглы мартенсита, тем выше прочность и меньше хрупкость стали. Мартенсит обладает наибольшим удельным объемом, характеризуется очень высокой твердостью (порядка 60...70 HRC в зависимости от содержания углерода в стали) и почти полным отсутствием пластичности. Мартенсит в стали не является стабильной фазой и стремится к распаду, особенно при нагреве. Для получения структуры мар-

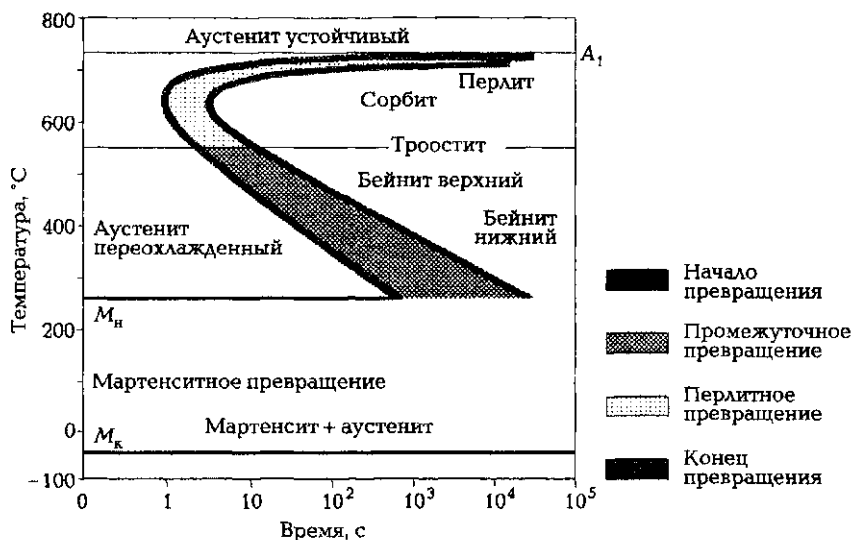


Рис. 11.2. Диаграмма изотермического превращения аустенита:

M_n, M_k — температуры начала и конца мартенситного превращения

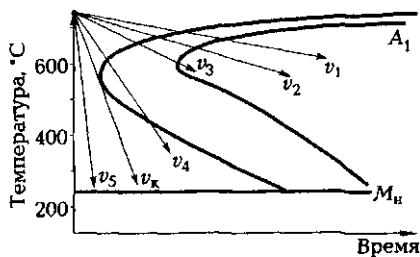


Рис. 11.3. Наложение кривых непрерывного охлаждения на диаграмму изотермического превращения аустенита:

M_n — температура начала мартенситного превращения, v_1 — v_3 — скорости охлаждения; v_k — критическая скорость охлаждения

тенсита проводят термическую обработку. Мартенсит закалки получается непосредственно после закалки и имеет объемно-центрированную тетрагональную решетку.

Наименьшая скорость охлаждения, при которой образуется мартенсит, называется критической v_k (рис. 11.3).

Закалкой углеродистых сталей называется нагрев до температуры выше критических точек, выдержка при данной температуре и последующим быстрым охлаждением.

Для получения структуры мартенсита доэвтектоидные стали нагревают выше A_{c3} на 30...50 °С и охлаждают в воде. Такая закалка называется полной.

Если нагреть сталь до температуры выше A_{c1} (см. рис. 10.1), но ниже A_{c3} , а затем охладить в воде, то структура будет состоять из феррита и мартенсита и такая операция называется неполной закалкой. Получение феррита связано с тем, что не вся часть феррита превратилась в аустенит. При последующем охлаждении в воде аустенит превратится в мартенсит, а феррит останется в закаленной стали. Феррит обнаруживается в виде светлых пятен на фоне мартенсита. Присутствие феррита снижает твердость и прочность закаленной стали, поэтому неполная закалка для доэвтектоидных сталей не применяется.

Заэвтектоидные стали следует нагревать до температуры выше A_{c1} на 30...50 °С и охлаждать в воде. В структуре после неполной закалки наряду с мартенситом будет присутствовать вторичный цементит. При таком нагреве в аустените сохраняется некоторое количество нерастворившегося вторичного цементита. При охлаждении стали в воде произойдет неполная закалка, т.е. образуется структура мартенсита и вторичного цементита. Вторичный цементит обнаруживается в виде мелких округленных светлых включений на фоне более темного мартенсита. Его оставляют в закаленной стали, так как он увеличивает ее твердость и износостойкость. Поэтому неполная закалка для заэвтектоидной стали является правильной.

Процесс нагрева закаленной стали ниже A_{c1} называется отпуском. Это окончательная операция термической обработки. В результате отпуска прочность и твердость стали понижаются, а пластичность и ударная вязкость повышаются (рис. 11.4).

Существует три вида отпуска:

- **низкий** (150...250 °С): образуется мартенсит отпуска (M_o), который отличается от мартенсита закалки меньшей степенью тетрагональности кристаллической решетки. С повышением температуры отпуска степень тетрагональности уменьшается и решетка становится почти кубической в связи с практически полным выделением углерода из пересыщенного твердого раствора. Низкий отпуск применяется при термообработке режущего и измерительного инструмента, подшипников качения и др.;
- **средний** (300...450 °С): получается структура в виде тонкой ферритно-цементитной смеси, называемая трооститом отпуска (T_o). Средний отпуск придает стали высокую упругость и применяется при термообработке пружин, рессор, торсионов;
- **высокий** (500...650 °С): образуется более грубая ферритно-цементитная смесь, называемая сорбитом отпуска (S_o). В результате закалки и высокого отпуска получается очень благоприятное сочетание твердости и прочности с пластичностью и вязкостью для большинства деталей машин. Поэтому термическую обработку стали, состоящую из закалки и последующего высокого отпуска, называют **улучшением**.

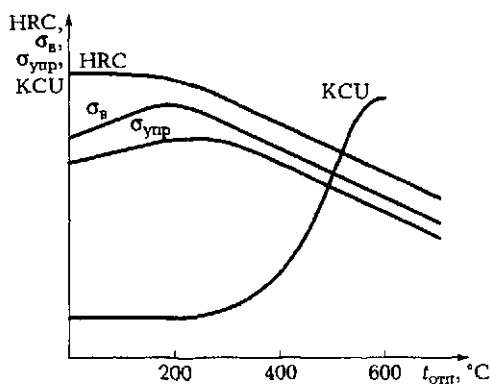


Рис. 11.4. Влияние температуры отпуска на структуру и механические свойства сталей:

σ_b — предел прочности; $\sigma_{упр}$ — предел упругости; KCU — ударная вязкость; HRC — твердость; $t_{отп}$ — температура отпуска

Улучшению, как правило, подвергаются конструкционные стали, содержащие 0,3...0,5 % углерода.

Троостит и сорбит отпуска характеризуются зернистым строением цементитных частиц в отличие от троостита и сорбита закалки, в которых цементит имеет пластинчатое строение.

Пластичность и вязкость стали с зернистым строением цементита более высокие, чем с пластинчатым строением.

ПРИБОРЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Для выполнения работы необходимы:

- металлографический микроскоп;
- 7 муфельных печей;
- твердомер для определения твердости по методу Роквелла;
- шлифовальная шкурка для зачистки образцов;
- образцы сталей 45 и У10;
- емкость с водой;
- готовые микрошлифы сталей 45 и У10 после закалки и отпуска;
- изображения микроструктур сталей 45 и У10 после закалки и отпуска.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Произвести закалку образцов сталей с различных температур.
2. Замерить твердость закаленных образцов.
3. Закаленные образцы по оптимальному режиму отпустить при температурах 200; 400 и 600 °С.
4. Измерить твердость отпущенных образцов.
5. Изучить и зарисовать микроструктуры закаленных и отпущенных образцов.

ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. Сформулировать цель работы.
2. Заполнить табл. 11.1.
3. Построить графики зависимости твердости от температуры нагрева и отпуска.
4. Сделать выводы по работе.

Таблица 11.1. Режимы закалки и отпуска сталей

Марка стали	Температура нагрева, °С	Охлаждающая среда	Твердость		Структура	Температура отпуска, °С	Твердость		Структура
			HRC	HB			HRC	HB	
45	750	Вода							
45	850	Вода				200			
45	850	Вода				400			
45	850	Вода				600			
45	950	Вода							
45	1 050	Вода							
У10	780	Вода				200			
У10	780	Вода				400			
У10	780	Вода				600			
У10	850	Вода							
У10	950	Вода							
У10	1 050	Вода							

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое закалка?
2. На чем основана термическая обработка стали?
3. Какие бывают виды закалки?
4. Что такое критическая скорость охлаждения?
5. Какова структура закаленной доэвтектоидной стали?
6. Какова структура закаленной заэвтектоидной стали?
7. При закалке с какой температуры нагрева изделия из стали марки 45 получат наибольшую твердость?
8. При закалке с какой температуры нагрева изделия из стали У12 получат наибольшую твердость?
9. Что такое отпуск?
10. Назовите виды отпуска.
11. Чем отличаются T_s от T_o и C_s от C_o ?
12. Чем отличается M_s от M_o ?
13. Какова должна быть структура и твердость стали У10 после закалки и низкого отпуска?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОКАЛИВАЕМОСТИ СТАЛИ

Цель работы — ознакомиться с методом испытания на прокаливаемость.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Факторы, влияющие на прокаливаемость стали. Под прокаливаемостью понимают глубину проникновения закаленной зоны. Прокаливаемость тесно связана с критической скоростью охлаждения при закалке. Если в сердцевине скорость охлаждения окажется больше критической, то прокаливаемость сквозная. Если на поверхности закаливаемой детали или образца скорость охлаждения будет больше, а в сердцевине меньше критической, то прокаливаемость будет несквозной.

Влияние прокаливаемости на структуру и твердость стали показано на рис. 12.1. При сквозной прокаливаемости структура —

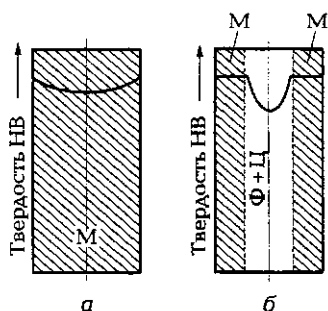


Рис. 12.1. Влияние прокаливаемости на структуру и твердость стали:

а — сквозная прокаливаемость; б — несквозная прокаливаемость; М — мартенсит; Ф — феррит; Ц — цементит

мартенсит и твердость одинакова по всему сечению (рис. 12.1, а), а при несковозной твердость уменьшается от поверхности к сердцевине (рис. 12.1, б).

Все факторы, увеличивающие устойчивость переохлажденного аустенита, а следовательно, уменьшающие критическую скорость охлаждения при закалке, увеличивают прокаливаемость стали. Такими факторами являются:

- легирование. Все легирующие элементы (кроме кобальта), растворенные в аустените, увеличивают прокаливаемость;
- содержание углерода. Наибольшей среди углеродистых сталей прокаливаемостью обладают стали эвтектоидного состава;
- величина действительного зерна аустенита. Чем крупнее зерно, тем глубже прокаливаемость. Однако, увеличение прокаливаемости за счет роста аустенитного зерна недопустимо, так как с увеличением зерна растет хрупкость стали. В тех случаях, когда требуется уменьшить прокаливаемость, эту задачу успешно решают измельчением зерна;
- однородность аустенита. Все виды неоднородности аустенита, как концентрационная, так и вызванная наличием в нем карбидов, нитридов, оксидов и т.д., уменьшают прокаливаемость.

Способы определения прокаливаемости. Для определения прокаливаемости стали существует несколько способов, однако наибольшее распространение получили только два.

Первый способ состоит в определении наибольшего диаметра цилиндра, который в данной охлаждающей среде прокаливается насквозь. Диаметр такого цилиндра называется критическим ($D_{кр}$). Сквозной прокаливаемостью считают такую, при которой в сердцевине имеется структура, состоящая из 50 % мартенсита и 50 % ферритно-цементитной смеси (троостита). Данная структура называется полумартенситной.

Трудоемкое количественное исследование структуры обычно заменяется измерением твердости. Это допустимо, потому что твердость полумартенситной структуры зависит только от содержания углерода в аустените.

Критический диаметр зависит от охлаждающей среды. Чем «мягче» охлаждающая среда, тем меньше критический диаметр. В качестве универсальной меры прокаливаемости стало вводится понятие «идеальный критический диаметр», под которым понимают наибольший диаметр цилиндрического образца, прокаливающегося насквозь в «идеальной охлаждающей среде». В данной среде поверхность закаливаемого стального тела мгновенно принимает температуру охлаждающей среды.

Идеальный критический диаметр определяется путем пересчета критического диаметра, определенного закалкой в реальной охлаждающей среде (например, в воде или масле).

Второй способ определения прокаливаемости состоит в том, что цилиндрический образец диаметром 25 мм и длиной 100 мм, нагретый до температуры закалки, охлаждается струей воды, направленной на один из торцов (рис. 12.2).

На закаленном таким способом образце определяется распределение твердости по высоте. Показателем прокаливаемости стала служить полученная кривая зависимости твердости от расстояния от торца. Этот способ называется *способом торцевой закалки*. Он положен в основу метода испытания на прокаливаемость, изложенного в ГОСТ 5657—69.

При нагреве под закалку торец образца, подлежащий охлаждению водой, предохраняют от окисления и обезуглероживания. Если нагрев производится в печи без контролируемой атмосферы, образец помещается в стальной цилиндрический стакан с крышкой. Торцом, предназначенным для охлаждения, образец ставится в графитовую пластинку или на слой молотого графита. Выдержка образца при температуре закалки после нагрева — 30 мин. Время с момента извлечения образца из печи до начала охлаждения не должно превышать 5 с.

Закалка производится в специальном приспособлении, состоящем из держателя образца и сопла для подачи воды. Образец устанавливается в приспособление вертикально торцевой поверхностью над соплом. Оси образца и сопла должны совпадать. Расстояние от сопла до торца образца должно быть равным 125 мм. Высота струи воды, выходящей из сопла, — 65 мм (регулируется до установки образца в приспособление). Образец выдерживают под струей воды до полного охлаждения (не менее 10 мин).

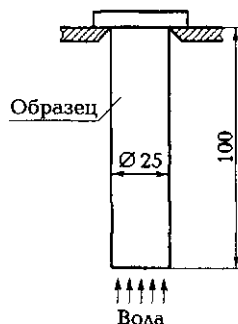


Рис. 12.2. Схема торцевой закалки образца

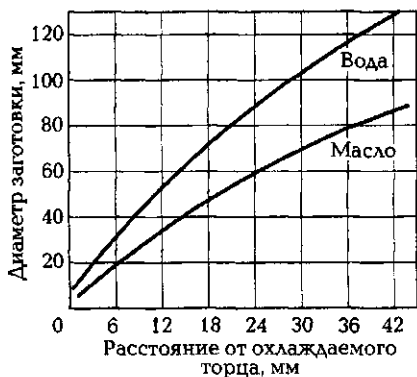


Рис. 12.3. Номограмма определения критического диаметра прокаливаемости стали

После закалки образца на нем по всей длине отшлифовывают на глубину 0,5 мм две диаметрально противоположные площадки. На этих площадках измеряют твердость. Первые 16 измерений производятся каждые 1,5 мм, а затем через 3 мм. Твердость определяют по Роквеллу (HRC). Если на определенном расстоянии от торца твердость не меняется, то измерение заканчивают.

По результатам измерений строится график зависимости твердости от расстояния до торца, называемый «кривой прокаливаемости». Прокаливаемость может быть выражена и индексами (цифровыми показателями). Индексами прокаливаемости являются значения твердости на заданных расстояниях от охлаждаемого торца: l_c (l — расстояние от охлаждаемого торца до точки, имеющей твердость слоя с полумартенситной структурой; c — значение этой твердости HRC).

Зная содержание углерода в стали, по табл. 12.1 определяют значения твердости полумартенситной зоны. Используя кривую

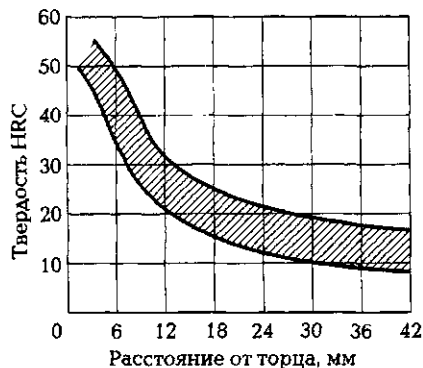


Рис. 12.4. Кривая прокаливаемости стали с 0,4% C

Таблица 12.1. Твердость полумартенситной структуры в зависимости от содержания углерода в стали

Содержание углерода, %	Твердость полумартенситной структуры HRC
0,08... 0,17	15
0,18... 0,22	25
0,23... 0,27	30
0,28... 0,32	35
0,33... 0,42	40
0,43... 0,52	45
0,53... 0,62	50

прокаливаемости, находят расстояние от торца, соответствующее твердости полумартенситной зоны. По этому расстоянию, используя специальную номограмму (рис. 12.3), определяют критический диаметр заготовки.

На номограмме приведены два значения критического диаметра: для быстрого (в воде) и медленного (в масле) охлаждения, так как при увеличении скорости охлаждения прокаливаемость уменьшается.

Прокаливаемость стали одной и той же марки колеблется в значительных пределах в зависимости от изменений химического состава, температуры нагрева (размера зерна аустенита), размера и формы детали и т. д. Поэтому прокаливаемость стали характеризуется не кривой, а полосой прокаливаемости (рис. 12.4).

ПРИБОРЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Для выполнения работы необходимы:

- установка для торцевой закалки;
- две муфельные печи;
- образцы сталей (диаметр 25 мм, длина 100 мм);
- твердомер для определения твердости по методу Роквелла.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. По справочнику выбрать температуру закалки для предоставленных образцов.

2. В муфельной печи произвести нагрев образцов до указанной в табл. 10.2 температуры закалки.
3. Отрегулировать высоту струи воды в закалочном приспособлении.
4. Произвести закалку образцов.
5. Отшлифовать на образцах по две площадки для измерения твердости.
6. Произвести измерения твердости.
7. Построить кривые прокаливаемости.
8. По табл. 12.1 определить твердость полумартенистной структуры стали.
9. Определить расстояние от охлаждаемого торца до сечения с полумартенистной структурой по кривой прокаливаемости.
10. По номограмме (см. рис. 12.3) определить критический диаметр при закалке в воду и при закалке в масло.

ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. Сформулировать цель работы.
2. Изложить основные теоретические положения: определение прокаливаемости; факторы, влияющие на величину прокаливаемости; способы определения прокаливаемости.
3. Заполнить табл. 12.2.

Таблица 12.2. Определение прокаливаемости сталей

Марка стали	Температура закалки, °С	HRC полумартенистной зоны	Расстояние от охлаждаемого торца, мм	$D_{кр}$ (вода), мм	$D_{кр}$ (масло), мм
35					
30ХГСА					
40					
40Х					
У10					
ШХ15					

4. Сделать выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое прокаливаемость?
2. Какие факторы влияют на величину прокаливаемости?
3. Назовите способы определения прокаливаемости.
4. Какая структура должна быть на границе закаленного и незакаленного слоев?
5. Как зависит критический диаметр от охлаждающей среды?
6. Как производится испытание на прокаливаемость методом торцевой закалки?
7. Что такое индекс прокаливаемости?

ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Цель работы — изучить влияние термической обработки на структуру и твердость улучшаемой (40Х), быстрорежущей (Р18) и коррозионно-стойкой стали аустенитного класса (12Х18Н9).

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Легированными называются стали, в состав которых намеренно, с целью изменения структуры и свойств стали, в определенных количествах введены легирующие элементы. В отожженном состоянии у легированных сталей прочность и твердость выше, а ударная вязкость и пластичность ниже (рис. 13.1).

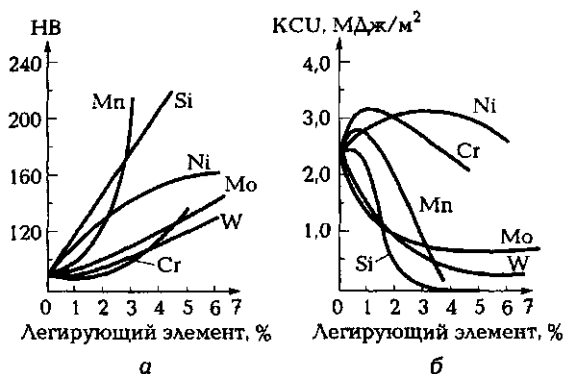


Рис. 13.1. Влияние легирующих элементов на свойства феррита:
а — изменение твердости; б — изменение ударной вязкости; НВ — твердость по Бринеллю; KCU — ударная вязкость

Маркировка легированных сталей. В маркировке сталей легирующие элементы обозначаются буквами русского алфавита (табл. 13.1).

Таблица 13.1. Обозначение легирующих элементов в сталях

Название	Химический символ	Обозначение в марках сталей	Название	Химический символ	Обозначение в марках сталей
Хром	Cr	Х	Марганец	Mn	М
Никель	Ni	Н	Кремний	Si	С
Вольфрам	W	В	Ванадий	V	Ф
Титан	Ti	Т	Алюминий	Al	Ю
Молибден	Mo	М	Медь	Cu	Д
Кобальт	Co	К	Бор	B	Р
Азот	N	А*	Ниобий	Nb	Б
Фосфор	P	П			

* В середине марки.

Обозначения марок легированных сталей состоят из цифр и букв, указывающих примерный состав стали.

Двухзначное число в начале марки означает среднее содержание углерода в сотых долях процента (для конструкционных сталей), однозначное — среднее содержание углерода в десятых долях процента (для инструментальных сталей). Каждый легирующий элемент обозначается в марке стали соответствующей буквой. Цифры, идущие после букв, указывают примерное содержание данного легирующего элемента в целых единицах, если оно превышает 1 %. При содержании легирующего элемента меньше 1 % цифра после его буквенного обозначения не ставится.

Например, марка 18Х2Н4МА означает, что сталь содержит 0,18 % углерода, 2 % хрома, 4 % никеля, 1 % молибдена, а сталь марки 38ХС — 0,38 % углерода, 1 % хрома и 1 % кремния. Буква А в конце марки стали обозначает, что эта сталь высококачественная,

т. е. с уменьшенным содержанием вредных примесей — серы и фосфора.

В маркировке сталей встречаются и другие условные обозначения, указывающие их применение:

А (в начале марки) — автоматные стали, например А20 (0,15... 0,25 % углерода). Эти стали хорошо обрабатываются на металлорежущих станках-автоматах вследствие повышенного содержания серы и фосфора;

Р — быстрорежущие стали, например Р18. Число указывает содержание основного легирующего элемента (17,5... 19 % вольфрама);

Ш — шарикоподшипниковые стали, например ШХ15 (15 — содержание хрома в десятых долях процента, т. е. 1,5 %).

Улучшаемые стали. Улучшением называется термическая обработка, состоящая из закалки и последующего высокого отпуска (500... 650 °С). В результате данной термической обработки образуется сорбит отпуска. К числу улучшаемых относятся стали с содержанием углерода 0,3... 0,5 %, как углеродистые, так и легированные.

Улучшаемые стали предназначены для изготовления ответственных деталей машин (валов, штоков, шатунов и т. п.), работающих в условиях циклических или ударных нагрузок. Поэтому они должны иметь высокую пластичность, вязкость в сочетании с умеренной прочностью и твердостью.

Высокий комплекс механических свойств, обеспечиваемый улучшением, возможен лишь при сквозной прокаливаемости, поэтому она служит важнейшей характеристикой этих сталей.

Быстрорежущие стали. Быстрорежущие стали широко применяют для изготовления разнообразного режущего инструмента, работающего при высоких скоростях резания. Они являются высоко- и сложнелегированными сталями. Быстрорежущие стали сохраняют высокую твердость до 600 °С. Такое свойство называется теплостойкостью. Химический состав стали Р18: 0,7... 0,8 % С; 3,8... 4,4 % Сг; 17,0... 18,5 % W; 1 % Мо; 1,0... 1,4 V (ГОСТ 19265—73).

По структуре быстрорежущие стали принадлежат к ледебуритному классу. В литом состоянии они имеют ледебуритную эвтектику. Для устранения ледебуритной эвтектики и хрупкости литую быстрорежущую сталь подвергают горячей обработке давлением (прокатка, ковка), а затем отжигу при 860... 880 °С. После обработки давлением и отжига структура стали состоит из сорбита, вторичных и более крупных первичных карбидов с твердостью НВ 2 070... 2 550.

Высокие режущие свойства быстрорежущая сталь приобретает после соответствующей термической обработки (рис. 13.2). Ввиду малой теплопроводности быстрорежущих сталей для устранения термических напряжений и трещин, для закалки их медленно нагревают. На практике получил широкое распространение трехступенчатый нагрев в соляных ваннах с температурами 600...650, 800...850 °С и с температурой, равной температуре закалки стали.

Высокие температуры нагрева при закалке стали Р18 (1 270...1 290 °С) необходимы для более полного растворения карбидов в аустените. После нагрева до указанных температур и надлежащей выдержки инструмент охлаждают в масле или на воздухе.

В результате закалки получают структуру, состоящую из мартенсита, остаточного аустенита и сложных карбидов твердостью 61...63 HRC. После закалки не достигается максимальная твердость сталей, так как в структуре содержится примерно 40 % остаточного аустенита. Для получения необходимых свойств закаленный инструмент подвергают высокому отпуску при температуре 560 °С. При этом из остаточного аустенита выделяются карбиды вольфрама и ванадия, что уменьшает его легированность, поэтому

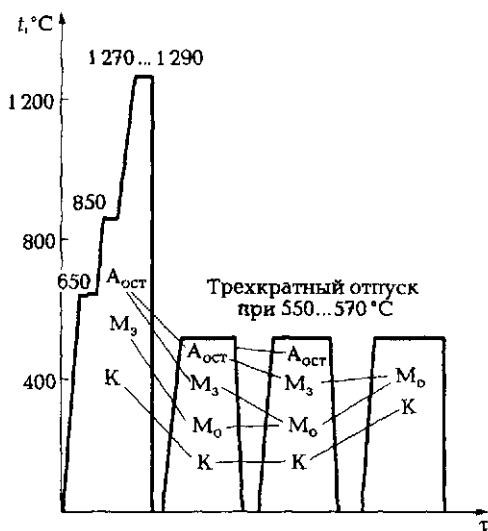


Рис. 13.2. Режим термической обработки быстрорежущей стали:

t — температура; τ — время; $A_{ост}$ — остаточный аустенит; К — карбиды; M_z — мартенсит закалки; M_o — мартенсит отпуска

при последующем охлаждении он претерпевает мартенситное превращение (при температурах ниже 150 °С).

Однократный отпуск стали Р18 не обеспечивает перевода всего остаточного аустенита в мартенсит, поэтому для получения наилучших режущих свойств применяют трехкратный отпуск при 560 °С с выдержкой 45... 60 мин.

Структура быстрорежущей стали после окончательной термической обработки представляет собой мартенсит отпуска и карбиды (63... 65 HRC).

Коррозионно-стойкие стали аустенитного класса. Из сталей этого класса наибольшее распространение получили хромоникелевые стали с содержанием углерода примерно 0,12%, 18 % хрома и 8... 10 % никеля. Наиболее применяемой сталью этого класса является сталь марки 12Х18Н9.

Коррозионно-стойкие стали устойчивы против электрохимической коррозии, что обеспечивается содержанием хрома более 12 %.

Высокую коррозионную стойкость эти стали имеют при однофазной структуре аустенита, когда хром находится в твердом растворе.

При нагреве или медленном охлаждении стали по границам зерен выделяются карбиды хрома. Твердый раствор в этих микрообъемах обедняется хромом до содержания его меньше 12 %, что вызывает межкристаллитную коррозию (МКК). Такой металл теряет коррозионную стойкость и разрушается от приложения даже незначительных нагрузок.

Для того чтобы избавить сталь от склонности к межкристаллитной коррозии, необходимо предупредить образование карбидов хрома. Для этого используется один из следующих способов:

- уменьшение концентрации углерода в стали (например, стали марок 08Х18Н10 и 04Х18Н10). Требуется применение очень чистой шихты, поэтому такие стали дороги и используются только в очень ответственных случаях;
- легирование элементами, образующими более стойкие карбиды, чем хром (например, стали марок 12Х18Н10Т и 12Х18Н12Б). Такими элементами могут служить титан и ниобий. Для того чтобы предупредить образование карбидов хрома, титана, необходимо вводить в 5 раз больше, а ниобия в 8 раз, чем имеется углерода в стали;
- избавление от карбидов хрома путем термической обработки стали (например, сталь 12Х18Н9).

Для устранения склонности к межкристаллитной коррозии стали типа 12Х18Н9 закаляют от температуры, превышающей 1 050 °С. Охлаждение при закалке должно быть достаточно бы-

стрым, чтобы избежать повторного выделения карбидов. Так как аустенитная сталь является очень вязкой, то ее закаливают погружением в воду без опасения возникновения закалочных трещин. После закалки структура стали состоит из однородного аустенита. В таком состоянии сталь обладает наименьшей твердостью и наибольшей пластичностью. Нагрев закаленной стали до температуры 600... 800 °С вызывает выделение карбидов хрома, восстановление склонности к межкристаллитной коррозии. Следовательно, отпуск ухудшает свойства стали и поэтому не применяется.

Закалка в воду от температуры 1050 °С является практически единственным видом термической обработки для всех хромоникелевых коррозионно-стойких сталей аустенитного класса. Она применяется и как окончательная термообработка для готовых изделий, и как промежуточная для заготовок, предназначенных для холодной обработки давлением.

ПРИБОРЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Для выполнения работы необходимы:

- муфельная печь;
- емкости с водой и маслом;
- образцы из сталей 40X, P18 и 12X18H9;
- шлифовальный круг;
- твердомер для определения твердости по методу Роквелла;
- металлографический микроскоп;
- готовые микрошлифы сталей 40X, P18 и 12X18H9 после закалки и отпуска;
- изображения микроструктур сталей 40X, P18 и 12X18H9 после закалки и отпуска.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Произвести закалку образцов всех трех классов:

- сталь марки 40X закалить в масло после нагрева до температуры 860 °С;
- сталь марки P18 закалить в масло после нагрева до температуры 1280 °С. Нагрев произвести последовательно в трех печах с температурами 650; 850 и 1280 °С;
- сталь марки 12X18H9 закалить в воду после нагрева до температуры 1050 °С.

Таблица 13.2. Влияние закалки и отпуска на твердость и структуру легированных сталей

Марка стали	Температура нагрева, °С	Охлаждающая среда	Твердость	Структура	Температура отпуска, °С	Твердость			Структура
						HRC	HRB	HB	
40X	860	Масло			200				
P18	650 ... 850 ... 1 280	Масло			200				
					400				
					560 (1)				
					560 (2)				
12X18H9	1 050	Вода			560 (3)				
					200				
					400				
					600				

2. Измерить твердость закаленных образцов.
3. Закаленные образцы сталей марок 40X и 12X18H9 отпустить при температурах 200; 400; 600 °С; марки P18 при 200; 400; 560 (1); 560 (2); 560 °С (3).
4. Измерить твердость отпущенных образцов.
5. Изучить микроструктуры закаленных и отпущенных сталей по готовым микрошлифам.

ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. Сформулировать цель работы.
2. Кратко описать теорию термической обработки легированных сталей марок 40X, P18, 12X18H10.
3. Заполнить табл. 13.2.
4. Построить графики зависимостей твердости сталей от температуры отпуска.
5. Зарисовать микроструктуры закаленных и отпущенных сталей по готовым микрошлифам.
6. Сделать выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое улучшение?
2. Какие стали применяются для изделий упрочняемых улучшением?
3. Какую охлаждающую среду чаще всего применяют при закалке легированных улучшаемых сталей?
4. Что такое теплостойкость и какова ее природа?
5. Как выбирается температура нагрева для закалки улучшаемых и быстрорежущих сталей?
6. Какую структуру имеет быстрорежущая сталь после закалки?
7. Почему быстрорежущую сталь для закалки нагревают медленно или ступенчато?
8. Чем определяется выбор температуры отпуска для быстрорежущих сталей?
9. Почему производят многократный отпуск быстрорежущих сталей?
10. Какую охлаждающую среду чаще всего применяют для закалки быстрорежущих сталей?
11. Какова структура быстрорежущей стали после окончательной термической обработки?

12. Что такое межкристаллитная коррозия и какова ее природа?
13. После какой обработки сталь 12Х18Н9 приобретает склонность к межкристаллитной коррозии?
14. Какие существуют способы борьбы со склонностью к интеркристаллитной коррозии хромоникелевых сплавов?
15. Чем определяется выбор температуры нагрева для закалки стали 12Х18Н9?
16. Какую охлаждающую среду применяют для закалки стали 12Х18Н9?
17. Какую структуру имеет закаленная сталь 12Х18Н9?

ЦЕМЕНТАЦИЯ СТАЛИ

Цель работы — изучить влияния цементации и последующей термической обработки на структуру и твердость цементированного слоя.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Химико-термическая обработка. Химико-термической обработкой называется процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя металла каким-либо элементом. В результате химико-термической обработки (ХТО) происходит изменение химического состава, структуры и свойств поверхностного слоя деталей. Основными видами ХТО являются цементация, азотирование (насыщение поверхности азотом), нитроцементация (одновременное насыщение поверхности азотом и углеродом), диффузионная металлизация. Насыщение поверхностного слоя происходит при нагреве детали до определенной температуры в среде, выделяющей насыщающий элемент. Поверхностный слой, насыщенный этим элементом, называется диффузионным. Материал детали под диффузионным слоем, имеющий неизменившийся химический состав, называется сердцевиной.

Цементация стали. Цементацией называется процесс насыщения поверхностного слоя стальных изделий углеродом. Цель цементации — получение твердой поверхности детали в сочетании с вязкой сердцевиной. Такое сочетание свойств обеспечивает детали высокую износостойкость и способность воспринимать ударные нагрузки.

Для изготовления цементруемых деталей применяются углеродистые и легированные стали с содержанием углерода 0,1...



Рис. 14.1. Концентрация углерода в зависимости от глубины насыщения

0,25 %. Для достижения максимальной твердости поверхности цементацию проводят с насыщением стали углеродом до 0,8...1,2 % (рис. 14.1). Более высокое содержание углерода приводит к увеличению вторичного цементита, придающего слою повышенную хрупкость. Цементацией достигается лишь выгодное распределение углерода по сечению. Окончательное формирование свойств цементированных деталей достигается последующей закалкой с низким отпуском. После закалки структура поверхностного слоя состоит из высокоуглеродистого мартенсита. Низкотемпературный отпуск (150...200 °С) применяют для снятия внутренних напряжений. Поверхностный слой после цементации, закалки и низкого отпуска имеет твердость 58...62 HRC.

Процесс цементации включает в себя следующие процессы:

- образование активного (атомарного) углерода;
- адсорбцию углерода поверхностью цементируемой детали;
- диффузию углерода от поверхности в глубину.

Цементация подразделяется на цементацию твердыми углеродосодержащими смесями (твердым карбюризатором), цементацию газовую и в жидкой среде (в расплавах солей). Последний вид применяется очень редко.

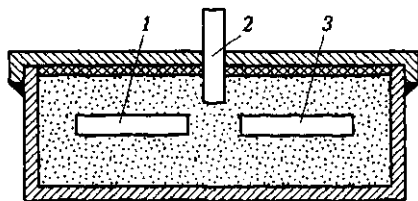


Рис. 14.2. Цементационный ящик с образцами:

1, 3 — образцы для цементации; 2 — образец для контроля глубины цементации

При цементации твердым карбюризатором изделия закладывают в стальной ящик, наполненный карбюризатором — науглероживающим веществом (рис. 14.2). Карбюризатором является древесный уголь с различными добавками. В качестве добавок применяют углекислые соли (обычно BaCO_3). При нагреве до температуры цементации ($900 \dots 950 \text{ }^\circ\text{C}$) в результате термической диссоциации углеродистых солей и взаимодействия кислорода воздуха, оставшегося в ящике, с углем, образуется углекислый газ (CO_2). Так как образование углекислого газа происходит при высокой температуре в окружении угля, то углекислый газ взаимодействует с углеродом и образуется оксид углерода:



В контакте с железом эта реакция происходит в обратном направлении, в результате чего образуется атомарный углерод, который и поглощается поверхностью цементированного изделия. Следовательно, при цементации твердым карбюризатором последний служит для образования газовой фазы, из которой и образуется активный углерод.

При газовой цементации в рабочее пространство цементационной печи подаются продукты неполного сгорания углеводородов (природного газа, керосина и т.д.), содержащие оксид углерода и метан. И в этом случае активный углерод образуется в результате

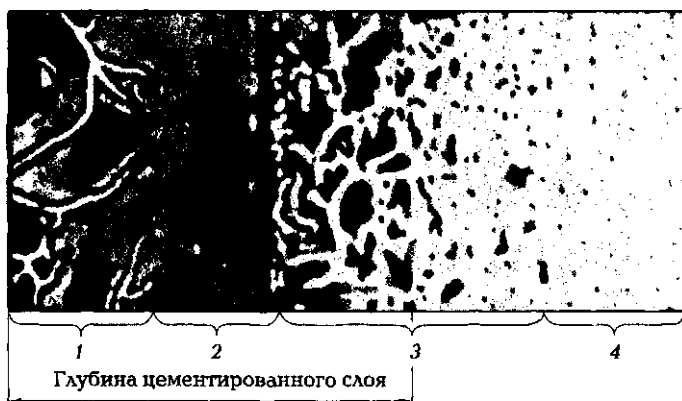


Рис. 14.3. Различные микроструктуры, образующиеся при цементации, в зависимости от глубины насыщения углеродом:

1 — заэвтектоидная зона; 2 — эвтектоидная зона; 3 — доэвтектоидная зона; 4 — сердцевина

термической диссоциации этих соединений у поверхности цементованных изделий.

Глубину цементированного слоя определяют на образцах, медленно охлажденных после цементации. Если у поверхности концентрация углерода превышает эвтектоидную, то структура состоит из перлита, окруженного сеткой вторичного цементита. При удалении от поверхности из-за непрерывного уменьшения концентрации углерода постепенно исчезает вторичный цементит и структура становится чисто перлитной, а затем во все возрастающих количествах появляется феррит (количество перлита соответственно уменьшается) (рис. 14.3).

За глубину цементированного слоя принимают расстояние от поверхности до исходной структуры либо до появления в структуре феррита, либо, чаще всего, до половины перлитного слоя.

Для получения науглероженного слоя требуемой толщины цементация должна продолжаться 6... 12 ч. За это время в стали может вырасти крупное аустенитное зерно. Поэтому задачей последующей термической обработки является не только получение мартенсита, но и исправление структуры перегрева, т. е. измельчение зерна. Термическую обработку проводят по одному из трех вариантов:

- закалка с подстуживанием (рис. 14.4, а) — с нагрева под цементацию и низкий отпуск; для уменьшения закалочных напряжений и коробления детали перед закалкой подстуживать до тем-

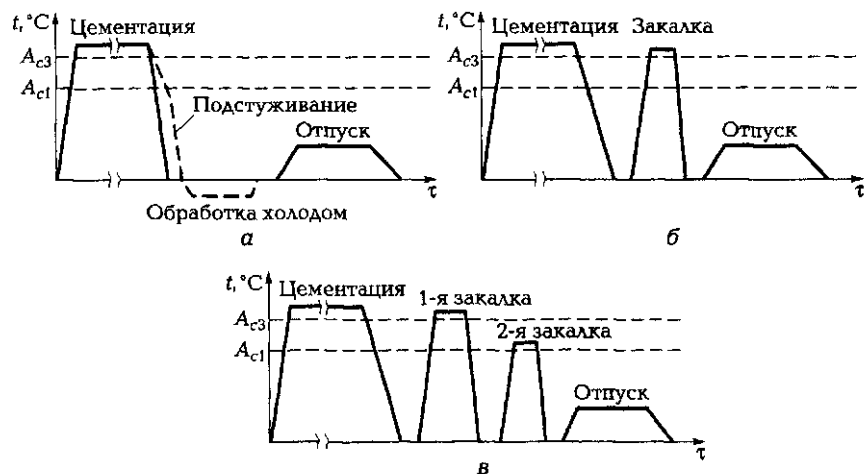


Рис. 14.4. Технологии цементации и последующей термической обработки: а — закалка с подстуживанием; б — одинарная закалка; в — двойная закалка; t — температура; τ — время

пературы, равной точке A_{c3} (см. рис. 10.2), т.е. примерно до 850°C ; применяется для природно-мелкозернистых сталей;

- одинарная закалка (рис. 14.4, б) — закалка остывших после цементации деталей и низкий отпуск; применяется для сравнительно неответственных деталей;
- двойная закалка (рис. 14.4, в) — закалка ($t_3 = A_{c3}$, см. рис. 10.1) и высокий отпуск для обработки сердцевины, затем закалка ($t_3 = A_{c1}$) и низкий отпуск для обработки поверхности; применяется для ответственных деталей.

После термообработки структура поверхности — мартенсит отпуска, карбиды и остаточный аустенит.

ПРИБОРЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Для выполнения работы необходимы:

- металлический ящик для цементации;
- твердый карбюризатор (древесный уголь + 20 % карбоната бария (BaCO_3));
- образцы стали 15;
- огнеупорная глина;
- муфельная печь;
- готовые микрошлифы стали 15, медленно охлажденные после цементации;
- изображения микроструктур стали после цементации.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подготовить твердый карбюризатор.
2. Заложить образцы стали 15 в цементационный ящик, засыпать их карбюризатором, закрыть ящик крышкой и замазать щели огнеупорной глиной.
3. Произвести цементацию при 930°C в течение 8 ч, медленно охладить от температуры цементации.

Примечание. В работе используются образцы, заложенные в цементационный ящик предыдущей группой. К началу занятия цементация заканчивается, и студенты после подготовки образцов для следующего занятия приступают к выполнению лабораторной работы.

4. Исследовать готовые микрошлифы стали 15, медленно охлажденные после цементации (заэвтектоидной, эвтектоидной и доэвтектоидной зон).

ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. Сформулировать цель работы.
2. Выбрать режимы термической обработки для цементированных изделий из углеродистой стали марки 15.
3. Зарисовать микроструктуру цементированного слоя после медленного охлаждения с температуры цементации.
4. Сделать выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое цементация стали?
2. Какие стали применяются для цементации?
3. Как производится цементация твердым карбюризатором?
4. Как производится газовая цементация?
5. Какова структура цементированного слоя после отжига или медленного охлаждения после цементации?
6. Как измеряется глубина цементированного слоя?
7. Какая структура цементированного слоя после окончательной термической обработки?
8. Какие свойства приобретают стали после цементации?

ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ НА ИХ ОСНОВЕ

Цель работы — ознакомиться с микроструктурой и свойствами важнейших технических цветных металлов и сплавов.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Медь и ее сплавы. Медь обладает высокой электро- и теплопроводностью, пластичностью, достаточно высокой коррозионной стойкостью. Удельный вес чистой меди $8,9 \text{ г/см}^3$, температура плавления $1083 \text{ }^\circ\text{C}$, предел прочности при растяжении $\sigma_b = 250 \dots 260 \text{ МПа}$; относительное удлинение $\delta = 40 \dots 50 \%$.

Многие примеси в ничтожно малых количествах (сотые доли процента) резко снижают электропроводимость меди и ухудшают деформируемость. Поэтому для изготовления проводников тока применяют меди высокой чистоты (например, марки М00, где меди содержится 99,99 %).

Латуни — сплавы меди с цинком. Практическое применение имеют сплавы, содержащие до 45 % цинка.

Латуни бывают однофазные (до 39 % цинка) и двухфазные (от 39 до 45 % цинка). Микроструктура однофазной латуни — это α -твердый раствор цинка в решетке меди. Однофазная латунь пластична как в горячем, так и в холодном состоянии. Эскиз микроструктуры однофазной латуни показан на рис. 15.1.

Структура двухфазной латуни состоит из кристаллов α - и β -фаз. Последняя фаза также является твердым раствором на базе химического соединения электронного типа CuZn . Выше $453 \text{ }^\circ\text{C}$ эта фаза — неупорядоченный твердый раствор с высокой пластичностью. При $453 \text{ }^\circ\text{C}$ происходит процесс упорядочения твердого раствора, и ниже этой температуры раствор обозначается β^1 . При упо-



Рис. 15.1. Эскиз микроструктуры однофазной латуни (марка П70)

рядочении обычно теряется пластичность и ухудшается обрабатываемость, поэтому двухфазные латуни обрабатывают в горячем состоянии.

Латуни маркируются буквой Л (латунь) и числом, показывающим содержание меди в процентах. В многокомпонентных деформируемых латунях после Л ставятся буквы — символы элементов, а затем числа, указывающие содержание меди и каждого элемента. Например, латунь Л68 содержит 68 % меди, латунь ЛЖМц59-1-1 содержит 59 % меди, 1 % железа и 1 % марганца, остальное цинк.

Однофазные латуни типа Л68 (медь — 68 %, цинк — 32 %) применяются для изготовления листов, лент, проволоки.

Двухфазные латуни типа Л59 (медь — 59 %, цинк — 41 %) идут в горячий прокат и прессование прутков, профилей и в дальнейшую обработку резанием для получения втулок, гаек, колец и др.

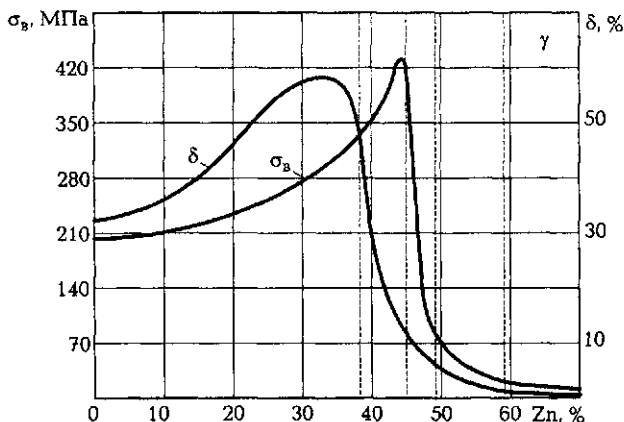


Рис. 15.2. Влияние содержания цинка на предел прочности σ_b и пластичность δ латуней

Для улучшения свойств латуней в них вводят легирующие элементы: никель, алюминий, свинец и др.

Бронзы — сплавы меди с различными элементами кроме цинка.

Оловянные бронзы являются лучшими литейными сплавами, особенно для художественного литья, имеют самую малую величину линейной усадки из всех известных сплавов. Такие бронзы обладают очень высокой стойкостью против коррозии и хорошо сопротивляются воздействию морской воды.

На практике наибольшее применение получили бронзы, содержащие до 10 % олова, так как уже при 5 % пластичность начинает резко падать, а при 15 % олова уменьшается и прочность.

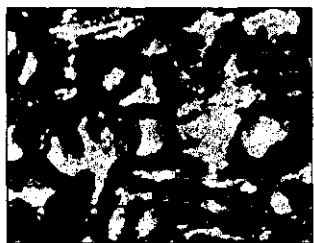
Структура сплавов, содержащих до 6...8 % олова, является α -твердым раствором. При содержании олова более 8 % обнаруживается вторая фаза — ϵ . Структура при этом будет состоять из неоднородного твердого раствора α и эвтектидных участков ($\alpha + \epsilon$) (рис. 15.3).

Высокооловянные бронзы используются только для изготовления литых деталей (паровая арматура, втулки, сложное фасонное литье).

Бронзы маркируются буквами Бр и цифрами, показывающими наличие элемента кроме меди. Например, БрО10 — 10 % олова, остальное — медь или БрОФ10-1 — 10 % олова, 1 % фосфора, остальное медь.

Алюминиевые бронзы обладают хорошей жидкотекучестью, большой плотностью отливок, хорошими механическими свойствами.

Алюминиевые бронзы могут упрочняться термической обработкой (закалкой и старением), особенно бронзы с добавлением никеля, железа и других элементов. Бронзы с низким содержанием



а



б

Рис. 15.3. Микроструктура бронзы:

а — литой оловянной; б — литой оловянной после обработки давлением

ем алюминия типа БрА5 (5 % алюминия, остальное — медь) хорошо обрабатываются давлением. Высокоалюминиевые бронзы типа БрА10 подвергаются горячей обработке и литью. Сплавы с большим содержанием алюминия не применяются из-за резкого падения прочности и пластичности.

Алюминиевые бронзы широко используются в машиностроении для деталей конструкционного назначения (шестерни, втулки) и для производства полуфабрикатов (ленты, листы, проволока).

Алюминий и его сплавы. Одним из ценнейших свойств является малый удельный вес ($2,7 \text{ г/см}^3$). Температура плавления технического алюминия 660°C , $\sigma_b = 50 \dots 90 \text{ МПа}$; $\delta = 30 \dots 45 \%$. Алюминий имеет высокую электропроводность, обладает хорошей стойкостью против коррозии в атмосферных условиях.

Алюминиевые сплавы делятся на деформируемые и литейные (рис. 15.4).

Литейные алюминиевые сплавы. Наиболее распространены литейные сплавы системы алюминий—кремний, называемые силуминами. Чаще всего применяется сплав с 12 % кремния марки АЛ2 (всего кремния может быть 11... 14 %).

В литом состоянии структура силумина представляет собой грубоигольчатые включения кремния на фоне твердого раствора α -фазы. Для измельчения зерна и улучшения механических свойств литейные алюминиевые сплавы подвергают модифици-

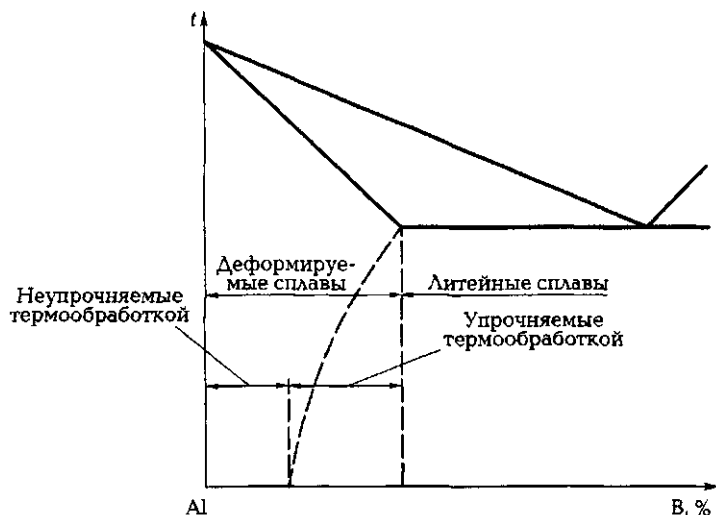


Рис. 15.4. Диаграмма состояния системы алюминий—легирующий элемент

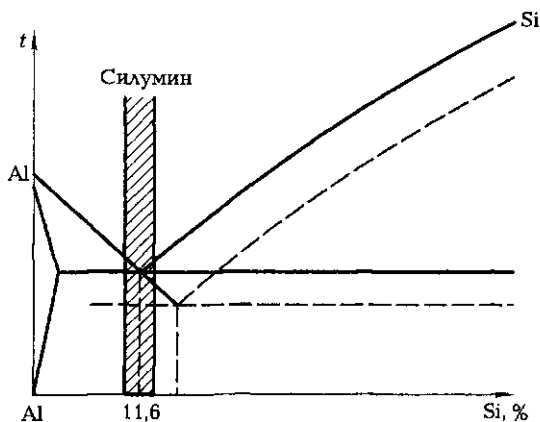


Рис. 15.5. Влияние модифицирования на условия кристаллизации сплавов системы Al—Si:

————— без модифицирования; - - - - с модифицированием

рованию (рис. 15.5). В качестве модификаторов в расплав перед разливкой добавляют небольшое количество (2...3% от массы сплава) смеси солей NaF и NaCl. После модифицирования прочность силуминов увеличивается на 25%, а относительное удлинение в два раза.

Силумины обладают высокими литейными свойствами, малой усадкой и пористостью, хорошей жидкотекучестью и заполняемостью форм, вместе с тем высокими твердостью и прочностью.

Деформируемые алюминиевые сплавы. Из алюминиевых сплавов, подвергаемых деформации и упрочняемых термической обработкой, наиболее распространены сплавы типа дуралюмин (маркируют буквой Д). Состав так называемого нормального дуралюмина марки Д1: медь — 4%, магний — 0,6%, марганец — 0,6%, остальное — алюминий.

В дуралюмине всегда присутствуют примеси железа и кремния в количестве примерно 0,6...0,7% каждого. Если железо является вредной примесью, то кремний образует с магнием фазу Mg_2Si , являющуюся одним из упрочнителей в процессе термообработки. Кроме этой фазы упрочняющее действие оказывают другие фазы: $CuAl_2$, $CuAl_2Mg$ и пр.

Микроструктура литого дуралюмина представляет собой зерна твердого раствора α , по границам которых залегают включения $CuAl_2$.

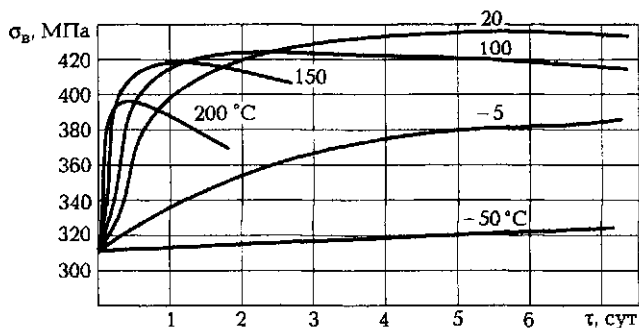


Рис. 15.6. Зависимость предела прочности σ_b дуралюмина от продолжительности старения τ при различных температурах

В отожженном состоянии свойства дуралюмина Д1 невысоки. Для повышения свойств дуралюмин подвергают закалке ($\approx 500^\circ\text{C}$) с последующим старением (рис. 15.6).

Сплавы типа дуралюмин применяются в виде листов, лент, проволоки, профилей, прутков и др.

Подшипниковые сплавы (бabbиты). Бabbитами называются сплавы на основе олова или свинца (или на основе смеси этих двух металлов). Применяются для заливки вкладышей подшипников скольжения. В эти сплавы добавляют сурьму и медь (сурьма до 18%).

Структура подшипников скольжения состоит из мягкой основы и твердых включений (рис. 15.7). Мягкой основой является либо олово (точнее твердый раствор на основе олова), либо свинец. Роль твердых включений выполняет сурьма или ее соединение SnSb. Медь в эти сплавы вводится исключительно для предотвращения ликвации по удельному весу более легких кристаллов сурьмы.



а



б

Рис. 15.7. Микроструктура (а) и эскиз микроструктуры (б) бabbита

Лучшими антифрикционными свойствами обладает баббит марки Б83 (11 % сурьмы, 6 % меди, остальное — олово). Антифрикционность — способность материала обеспечивать низкий коэффициент трения скольжения и тем самым низкие потери на трение и малую скорость изнашивания сопряженной детали.

Подшипниковые сплавы условно можно разделить на сплавы:

- на оловянной основе (Б83, Б90, Б93);
- свинцовой основе (БС, БК);
- оловянно-свинцовой основе (Б19, БН, БТ, Б6).

Баббиты применяют только для тонкого (менее 1 мм) покрытия рабочей поверхности опоры скольжения.

ПРИБОРЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Для выполнения работы необходимы:

- металлографический микроскоп;
- готовые микрошлифы цветных сплавов: латуни, бронзы, дуралюмина, силумина и баббита;
- изображения микроструктур цветных сплавов.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. По готовым микрошлифам изучить микроструктуру сплавов цветных металлов.

2. Установить вид обработки сплавов, который привел к формированию данной структуры.

3. Оформить отчет.

ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. Сформулировать цель работы.

2. Изложить основные теоретические положения: структура, свойства и маркировка латуней и бронз. Дуралюмин, его термообработка, структура, свойства. Силумин, структура и свойства без модифицирования и модифицированного. Антифрикционные сплавы.

3. Заполнить табл. 15.1.

4. Сделать выводы по работе.

Таблица 15.1. Микроанализ сплавов цветных металлов

№ п/п	Марка сплава	Наименование сплава	Химический состав	Обработка	Структурные составляющие	Микроструктура (зарисовка)
1	Л69					
2	Л59					
3	БрО6					
4	БрО10					
5	А16					
6	АЛ2					
7	Б83					

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите основные свойства меди.
2. Как изменяется структура латуней от содержания цинка?
3. Какова структура бронзы БрО10?
4. На какие группы по технологическим свойствам подразделяются алюминиевые сплавы?
5. Каким способом упрочняются изделия из дуралюмина?
6. Каким способом улучшают грубую структуру эвтектических силуминов?
7. Опишите структуру баббита Б83.

Переводная таблица по Бринеллю (НВ)

Н	НВ	Н	НВ	Н	НВ	Н	НВ	Н	НВ
356	92	400	132	444	173	488	215	532	259
358	94	402	134	446	175	490	217	534	261
360	96	404	136	448	177	492	219	536	263
362	98	406	138	450	179	494	221	538	265
364	100	408	139	452	181	496	223	540	267
366	101	410	141	454	182	498	225	542	269
368	103	412	143	456	184	500	227	544	271
370	105	414	145	458	186	502	229	546	273
372	107	416	147	460	188	504	231	548	276
374	109	418	149	462	190	506	233	550	278
376	110	420	151	464	192	508	235	552	280
378	112	422	152	466	194	510	237	554	282
380	114	424	154	468	196	512	239	556	284
382	116	426	156	470	198	514	241	558	286
384	118	428	158	472	200	516	243	560	288
386	119	430	160	474	202	518	245	562	290
388	121	432	162	476	204	520	247	564	292
390	123	434	164	478	205	522	249	566	294
392	125	436	165	480	207	524	251	568	297
394	127	438	167	482	209	526	253	570	299
396	128	440	169	484	211	528	255	572	301
398	130	442	171	486	213	530	257	574	303

Н	НВ	Н	НВ	Н	НВ	Н	НВ	Н	НВ
576	305	604	335	632	367	660	399	688	433
578	307	606	338	634	369	662	402	690	436
580	309	608	340	636	371	664	404	692	438
582	311	610	342	638	374	666	407	694	441
584	314	612	344	640	376	668	409	696	443
586	316	614	347	642	378	670	411	698	445
588	318	616	349	644	381	672	414	700	448
590	320	618	351	646	383	674	416	702	450
592	322	620	353	648	385	676	419	704	453
594	324	622	356	650	388	678	421	706	455
596	327	624	358	652	390	680	423	708	458
598	329	626	360	654	392	682	426	710	460
600	331	628	362	656	395	684	428		
602	333	630	365	658	397	686	431		

Переводная таблица по Роквеллу (HRC)

H	HRC	H	HRC	H	HRC	H	HRC	H	HRC
522	20,1	572	29,1	622	37,3	672	44,8	722	51,6
524	20,5	574	29,4	624	37,6	674	45,1	724	51,8
526	20,9	576	29,8	626	37,9	676	45,4	726	52,1
528	21,2	578	30,1	628	38,3	678	45,7	728	52,3
530	21,6	580	30,5	630	38,6	680	46,0	730	52,6
532	22,0	582	30,8	632	38,9	682	46,2	732	52,9
534	22,3	584	31,1	634	39,2	684	46,5	734	53,1
536	22,7	586	31,5	636	39,5	686	46,8	736	53,3
538	23,1	588	31,8	638	39,8	688	47,1	738	53,6
540	23,4	590	32,1	640	40,1	690	47,3	740	53,8
542	23,8	592	32,5	642	40,4	692	47,6	742	54,1
544	24,2	594	32,8	644	40,7	694	47,9	744	54,3
546	24,5	596	33,1	646	41,0	696	48,2	746	54,6
548	24,9	598	33,5	648	41,3	698	48,4	748	54,8
550	25,2	600	33,8	650	41,6	700	48,7	750	55,1
552	25,6	602	34,1	652	41,9	702	49,0	752	55,3
554	25,9	604	34,4	654	42,2	704	49,2	754	55,5
556	26,3	606	34,8	656	42,5	706	49,5	756	55,8
558	26,7	608	35,1	658	42,8	708	49,8	758	56,0
560	27,0	610	35,4	660	43,1	710	50,0	760	56,2
562	27,4	612	35,7	662	43,4	712	50,3	762	56,5
564	27,7	614	36,1	664	43,7	714	50,6	764	56,7
566	28,1	616	36,4	666	44,0	716	50,8	766	56,9
568	28,4	618	36,7	668	44,2	718	51,1	768	57,2
570	28,7	620	37,0	670	44,5	720	51,3	770	57,4

Н	HRC	Н	HRC	Н	HRC	Н	HRC	Н	HRC
772	57,6	800	60,7	828	63,5	856	66,1	884	68,5
774	57,8	802	60,9	830	63,7	858	66,3	886	68,6
776	58,1	804	61,1	832	63,9	860	66,5	888	68,8
778	58,3	806	61,3	834	64,1	862	66,6	890	68,9
780	58,6	808	61,5	836	64,3	864	66,8	892	69,1
782	58,7	810	61,7	838	64,5	866	67,0	894	69,3
784	59,0	812	61,9	840	64,6	868	67,1	896	69,4
786	59,2	814	62,1	842	64,8	870	67,3	898	69,6
788	59,4	816	62,3	844	65,0	872	67,5	900	69,7
790	59,6	818	62,5	846	65,2	874	67,6	902	69,9
792	59,8	820	62,7	848	65,4	876	67,8	904	70,0
794	60,0	822	62,9	850	65,6	878	68,0		
796	60,3	824	63,1	852	65,7	880	68,1		
798	60,5	826	63,3	854	65,9	882	68,3		

Список литературы

1. *Агаскин А. М.* Материаловедение (металлообработка) : учеб. пособие / А. М. Агаскин, В. М. Зуев. — М. : Изд. центр «Академия», 2014. — 288 с.
2. *Геллер Ю. А.* Инструментальные стали / Ю. А. Геллер. — М. : Металлургия, 1983. — 526 с.
3. *Волков Г. М.* Материаловедение : учебник / Г. М. Волков, В. М. Зуев. — М. : Издательский центр «Академия», 2013. — 448 с. — (Сер. Бакалавриат).
4. *Геллер Ю. А.* Материаловедение : учеб. пособие / Ю. А. Геллер, А. Г. Рахштадт. — М. : Металлургия, 1989. — 455 с.
5. *Гуляев А. П.* Металловедение / А. П. Гуляев. — М. : Металлургия, 1976. — 647 с.
6. *Кучер А. М.* Технология металлов / А. М. Кучер. — Л. : Машиностроение, 1987. — 207 с.
7. *Кузьмин Б. А.* Технология металлов и конструкционных материалов / Б. А. Кузьмин, Ю. Е. Абраменко. — М. : Машиностроение, 1989. — 496 с.
8. *Лахтин Ю. М.* Материаловедение / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьев. — М. : Машиностроение, 1990. — 528 с.
9. *Макиенко Н. И.* Общий курс слесарного дела / Н. И. Макиенко. — М. : Высш. шк., 1989. — 528 с.
10. Материаловедение : учебник для вузов / [Б. Н. Арзамасов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухин и др.] ; под ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. — 648 с.
11. *Покровский Б. С.* Слесарное дело : учебник / Б. С. Покровский, В. А. Скакун. — М. : Издательский центр «Академия», 2011. — 320 с.

Содержание

Предисловие.....	4
Лабораторная работа № 1. Изучение структуры стали при помощи металлографического микроскопа ММР-1	8
Лабораторная работа № 2. Ознакомление с методикой измерения твердости по Роквеллу и Бринеллю	15
Лабораторная работа № 3. Ознакомление с методикой измерения твердости по Роквеллу и Бринеллю с применением программного обеспечения	21
Лабораторная работа № 4. Исследование макроструктуры металла (макроанализ)	26
Лабораторная работа № 5. Исследование кристаллизации металлов и сплавов	33
Лабораторная работа № 6. Изучение структуры металла после пластической деформации и последующего нагрева	42
Лабораторная работа № 7. Определение основных характеристик прочности и пластичности при испытании на одноосное растяжение	48
Лабораторная работа № 8. Исследование микроструктуры сталей	54
Лабораторная работа № 9. Исследование микроструктуры чугунов	64
Лабораторная работа № 10. Изучение влияния отжига и нормализации на структуру углеродистой стали	74
Лабораторная работа № 11. Исследование структуры и свойств углеродистых сталей после закалки и отпуска	81
Лабораторная работа № 12. Определение прокаливаемости стали	89
Лабораторная работа № 13. Изучение термической обработки легированных сталей	96
Лабораторная работа № 14. Цементация стали	105
Лабораторная работа № 15. Цветные металлы и сплавы на их основе	111
Приложения.....	120
Список литературы	124

Учебное издание

**Соколова Елена Николаевна,
Борисова Алла Олеговна,
Давыденко Людмила Васильевна**

Материаловедение

Лабораторный практикум

Учебное пособие

Редактор *М. С. Кубай*

Компьютерная верстка: *С. Ф. Фёдорова*

Корректор *С. Ю. Свиридова*

Изд. № 101119268. Подписано в печать 12.07.2017. Формат 60×90/16.
Бумага офс. № 1. Гарнитура «Валтика». Печать офсетная. Усл. печ. л. 8.0.
Тираж 1000 экз. Заказ № 4887

ООО «Издательский центр «Академия». www.academia-moscow.ru
129085, Москва, пр-т Мира, 101В, стр. 1.
Тел./факс: (495) 648-0507, 616-00-29.
Санитарно-эпидемиологическое заключение № РОСС RU.АД44.Н01603 от 31.05.2017.

Отпечатано с электронных носителей, предоставленных издательством,
в АО «Первая образцовая типография».

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум

ISBN 978-5-4468-5799-9



Издательский центр «Академия»
www.academia-moscow.ru