

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БАРАНОВИЧСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум
для студентов инженерных специальностей
высших учебных заведений

Рекомендовано к печати
научно-методическим советом университета

Барановичи
РИО БарГУ
2010

УДК 620.2(076)
ББК 30.3я73
М33

С о с т а в и т е л ь

Г. И. Лециловская

Р е ц е н з е н т ы:

В. А. Дремук, кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой общенаучных дисциплин;
В. Ф. Барышников, кандидат технических наук, доцент кафедры
оборудования и автоматизации производства БарГУ

М33 **Материаловедение** [Текст] : лаб. практикум для студентов инженер. специальностей высш. учеб. заведений / сост. Г. И. Лециловская. — Барановичи : РИО БарГУ, 2010. — 96, [4] : ил. — 90 экз. — ISBN 978-985-498-293-9.

Содержит десять лабораторных работ по дисциплине «Материаловедение» для специальностей 1-36 01 01 Технология машиностроения, 1-36 01 03 Технологическое оборудование машиностроительного производства, 1-53 01 01 Автоматизация технологических процессов и производств, в которых приводятся теоретические сведения и методические указания по их выполнению, составлению письменных отчетов и подготовке к их защите.

Рис. 54. Табл. 6. Прил. 1.

УДК 620.2(076)
ББК 30.3я73

ISBN 978-985-498-293-9

© БарГУ, 2010

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Введение</i>	3
<i>Лабораторная работа 1.</i> Макроструктурный анализ металлов и сплавов	5
<i>Лабораторная работа 2.</i> Микроструктурный анализ металлов и сплавов	13
<i>Лабораторная работа 3.</i> Изучение диаграммы состояния сплавов железо — цементит.	24
<i>Лабораторная работа 4.</i> Структура и свойства сталей в равновесном состоянии	33
<i>Лабораторная работа 5.</i> Изучение микроструктуры чугунов	42
<i>Лабораторная работа 6.</i> Структуры углеродистых сталей в неравновесном состоянии.	53
<i>Лабораторная работа 7.</i> Исправление структуры литой и перегретой стали	59
<i>Лабораторная работа 8.</i> Химико-термическая обработка стали.	64
<i>Лабораторная работа 9.</i> Изучение инструментальных сталей.	74
<i>Лабораторная работа 10.</i> Структура и свойства медных и подшипниковых сплавов	84
Приложение А	96
Список источников	99

Введение

Объектом изучения материаловедения являются материалы, используемые в различных областях промышленности.

В настоящее время от специалистов, работающих в машиностроении, требуются определенные знания в области материаловедения, умения рационально выбрать и использовать обширную номенклатуру материалов и методы их обработки для достижения высоких эксплуатационных свойств изделий.

С этой целью используются методы макро- и микроструктурного анализа, а также методы определения твердости металлических материалов.

Лабораторный практикум состоит из десяти лабораторных работ, каждая из которых содержит основные методы исследования металлических материалов, изучение их структуры и свойств, технологию термической и химико-термической обработки.

В рамках подготовки и проведения экспериментов студенты приобретают знания по основным вопросам теоретического курса, навыки планирования проведения исследований, умения использовать современное оборудование и средства измерений.

В издании приведены справочные данные (приложение А) о химическом составе, механических свойствах конструкционных, инструментальных легированных и быстрорежущих сталей, а также твердость структурных составляющих, которые помогут студентам в освоении учебного материала и в правильном оформлении лабораторных работ.

Основная часть работ написана из расчета двухчасового академического занятия.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

МАКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цель работы:

- 1) ознакомиться с методикой проведения макроструктурного анализа;
- 2) изучить коллекцию образцов с макродефектами и коллекцию изломов.

Приборы и материалы: микроскоп бинокулярный БМ-51-2, коллекция макродефектов, коллекция изломов, коллекция макрошлифов, 50%-й раствор соляной кислоты в воде, фильтровальная бумага, вата, спирт, набор наждачной бумаги различной зернистости.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

I Основные теоретические сведения

1 Назначение и методика проведения макроструктурного анализа

Макроструктурный анализ (макроанализ) — это метод исследования металлов и сплавов, выполняемый невооруженным глазом или при небольшом увеличении (до 30 крат) с помощью лупы или специального микроскопа.

Существуют следующие основные *способы изучения макроструктуры*:

- 1) осмотр поверхности готового изделия;
- 2) изучение специально приготовленных макрошлифов;
- 3) изучение изломов.

Возможности макроструктурного анализа велики, по выполнению он прост и не требует сложного оборудования. Преимуществом макроанализа является то, что ему может быть подвергнут большой объем металла, т. е. все изделие или его основные части. Поэтому в государственных стандартах на большинство металлоизделий различные виды макроанализа включены как обязательные.

Макроанализ проводится с целью изучения макроструктуры и выявления макродефектов, возникающих на различных этапах производства заготовок и изделий.

Оценка макроструктуры стали производится по ГОСТ 10243-75 Сталь. Метод контроля макроструктуры.

Макроанализ позволяет установить:

- строение металла или сплава в литых деталях и слитках; наличие дефектов и распределение зон кристаллизации;
- химическую неоднородность (ликвацию), получаемую в процессе кристаллизации;
- строение металла после горячей обработки давлением;
- неоднородность состава и структуры, созданной термической или химико-термической обработкой, глубину и характер распределения закаленного, цементированного, азотированного и других слоев;
- характер излома и характер разрушения.

1.1 Оценка поверхности металла

При осмотре поверхности отливки или детали можно обнаружить некоторые дефекты.

Газовые раковины — пустоты, расположенные на поверхности или внутри отливки. Форма раковин — сферическая или округленная. Причина их образования может быть связана с большим содержанием газов.

Песочные раковины — закрытые или открытые раковины, полностью или частично заполненные формовочным материалом. Причинами их образования могут быть:

- а) недостаточная прочность формовочной и стержневой смеси;
- б) применение неисправных моделей;
- в) слабая или неравномерная набивка формы или стержней;
- г) местное разрушение и засорение формы при сборке и др.

Пригар — поверхность отливки шероховатая или бугристая и связана с пригоранием формовочной земли к стенкам отливки из-за очень высокой температуры заливаемого металла.

Пористость (рыхлость) — крупнозернистое и неплотное строение сплава с наличием межкристаллических пустот.

Причинами брака могут быть:

- а) неправильная конструкция отливки;

б) недостаточное питание отливки жидким металлом в процессе за-
твердевания;

в) чрезмерно высокая температура заливки и др.

Спай — сквозные или поверхностные щели в теле отливки, образо-
ванные неслившимися потоками металла.

Причина их образования может быть связана с:

а) низкой температурой расплава при заливке;

б) неправильным устройством литниковой системы;

в) низкой скоростью заливки.

Трещины — сквозные или несквозные разрывы в стенках отливок
или деталей.

Причинами трещин в отливках могут быть:

а) неправильная конструкция отливки с резким переходом от тол-
стых к тонким сечениям отливки;

б) острые углы в отливках;

в) чрезмерная плотность набивки;

г) неправильный состав формовочных и стержневых смесей;

д) неправильный режим заливки.

Горячие трещины в отливках имеют «рваные», а холодные — ров-
ные и гладкие края.

Причинами трещин в стальных поковках и заготовках могут быть:

а) большое загрязнение слитка неметаллическими включениями;

б) наличие литейных дефектов;

в) чрезмерные обжатия по сечению и др.

Трещины в термически обработанных деталях возникают из-за высо-
ких напряжений термического или структурного характера вследствие:

а) неправильного температурного режима термической обработки;

б) неправильного выбора охлаждающей среды;

в) нетехнологичности конструкции и др.

Шлифовочные трещины в виде сетки на поверхности детали возни-
кают в результате больших растягивающих напряжений при неправиль-
ных режимах шлифования. Такие трещины выявляются после шлифо-
вания и травления поверхности. В качестве раствора для травления
можно использовать 10...15%-й спиртовой или водный раствор азотной
кислоты или персульфата аммония.

Трещины в сварных швах возникают в результате больших внут-
ренних растягивающих напряжений при охлаждении наплавленного
металла в результате:

– неправильного режима сварки;

- насыщения шва водородом при использовании влажных электродных покрытий из флюсов и из окружающего воздуха;
- плохой свариваемости металлов.

1.2 Изучение макрошлифов

Макрошлифом (темплетом) называется образец, вырезанный в определенном месте детали и имеющий плоскую шлифованную поверхность, которая в зависимости от цели исследования протравливается специальным раствором для травления.

Для изучения строения металла слитков, отливок, катаных и кованых заготовок и готовых деталей образцы вырезают в направлении, перпендикулярном продольной оси. При изучении строения сварного шва образцы вырезают в продольном направлении.

Контролируемую поверхность образцов торцуют, строгают и шлифуют. Шлифование ведут до полного уничтожения рисок, оставшихся после торцовки. Когда на шлифе останутся риски только от шлифовальной бумаги, шлифование прерывают и повторяют обработку поверхности на бумаге с более мелким зерном, каждый раз изменяя направление движения шлифа на 90° .

Уже на шлифованной поверхности можно обнаружить после внимательного исследования невооруженным глазом или в лупу некоторые внутренние дефекты металла: пузыри, пустоты, трещины и крупные шлаковые включения. Но такие дефекты, как мелкая пористость, волосовины (еле заметные трещины), мелкие раковины, неоднородность металла (ликвация), а также кристаллическая структура металла выявляются только в результате так называемого макроскопического травления растворами кислот (серной, азотной, соляной, пикриновой, хромистой или их смесями) или же специальными реактивами.

Для выявления кристаллической структуры литой стали наиболее подходящим реактивом является 10...20%-й водный раствор персульфата аммония.

Макротравлением можно определить способ изготовления изучаемой детали, в частности, является ли она литой или изготовлена ковкой (штамповкой) или резанием.

Для определения глубины поверхностного слоя, образованного после закалки или цементации, образец травят 20%-м раствором соляной кислоты при 80°C в течение 3 минут, а затем промывают водой. После травления цементованный или закаленный слой имеет более темную окраску.

1.3 Изучение изломов

Изломом называется поверхность, по которой произошло разрушение образца или детали.

Изучение излома позволяет выявить причины и характер эксплуатационного разрушения, оценить качество стали, выявить дефекты, которые не выявляются при анализе макроструктуры на темплетах, позволяет с достаточной для практических целей точностью выявить глубину закаленного и цементованного слоев, оценить вязкость металлов. В зависимости от состава, строения, режима термической обработки и условий эксплуатации изделия могут разрушаться вязко или хрупко. В соответствии с этим изломы делятся на вязкие, хрупкие и смешанные. Большинство металлов и сплавов могут разрушаться и вязко, и хрупко,

Состояние поверхности — один из важнейших факторов, влияющих на механические свойства материала. Поверхностные неровности при плохой обработке, небольшие выступы или впадины могут играть роль хрупких трещин и снижать прочность материала. На увеличение хрупкости материала влияет масштабный фактор, так как вероятность существования опасного дефекта уменьшается при уменьшении размеров образца. Тщательная полировка поверхности, а также создание на поверхности сжимающих напряжений дробеструйной обработкой, обкаткой роликами, термической и химико-термической обработкой, препятствующих раскрытию поверхностных трещин, существенно увеличивает срок службы деталей. Для обеспечения конструктивной прочности изделий излом материала должен быть вязким, так как хрупкий излом происходит мгновенно и создает ситуацию, называемую «аварией».

Вязкий излом (рис. 1.1, *а*; рис. 1.2, *б*) (волокнистый) имеет пепельно-серый цвет.

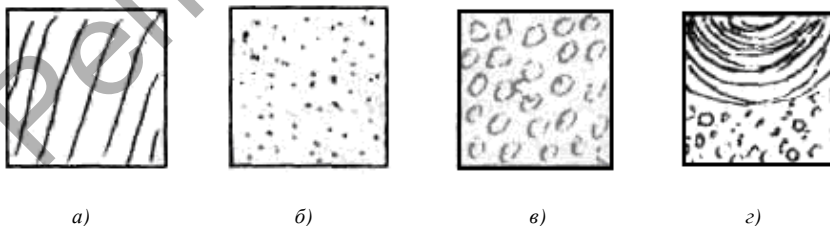


Рисунок 1.1 — Схема изломов:
а — вязкий; *б* — мелкозернистый хрупкий;
в — крупнозернистый хрупкий; *з* — смешанный

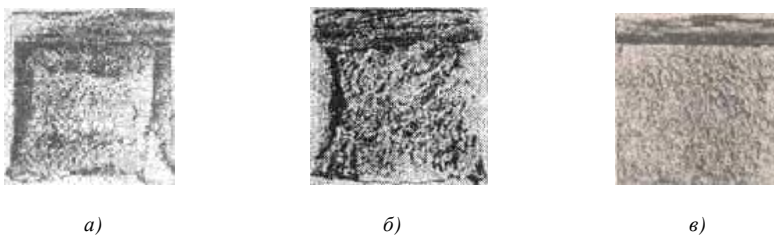


Рисунок 1.2 — Изломы стали:
a — смешанный; *б* — вязкий; *в* — хрупкий

На поверхности отсутствуют кристаллические фасетки. В связи с этим по излому нельзя судить о форме и размере зерна. Волокнистая структура образуется при длительном воздействии напряжения, превышающего предел текучести, и свидетельствует о пластической деформации зерен поликристалла. В результате вязкого разрушения образуется «косой» излом.

Вязкий излом может образоваться в результате:

а) соскальзывания одной части кристалла по другой или уменьшения сечения при деформации до нуля;

б) зарождения трещины и ее дальнейшего распространения.

Вязкому разрушению предшествует значительная макропластическая деформация. Вязкая трещина является тупой, скорость ее распространения мала. Матовый излом указывает на достаточную вязкость материала.

Хрупкий излом (рис. 1.1, б, в; рис. 1.2, в, рис. 1.3) имеет кристаллическое строение. Обычно в хрупком изломе можно видеть форму и размер зерен металла, так как излом происходит без значительной пластической деформации и зерна при разрушении металла не искажаются. Такие

изломы бывают крупно- и мелкокристаллические. Чем крупнее зерно на изломе, тем выше хрупкость материала.

Хрупкий излом прямой. По характеру отражения света излом может быть светлым (для сталей и белых чугунов), серым (для серых чугунов) и темным, бархатистым (для ковких и высокопрочных чугунов).



Рисунок 1.3 — Хрупкий межкристаллический излом стали

Хрупкий излом, как и вязкий, образуется в результате зарождения трещины и дальнейшего ее распространения. «Хрупкая» трещина является острой, ветвящейся, ее распространение происходит при низких напряжениях и рост трещины на определенной стадии становится неуправляемым. Скорость распространения трещины близка к скорости звука.

Разновидностями хрупкого излома является также шиферный, или слоистый, нафталинистый и дендритный изломы.

Шиферный излом (рис. 1.4) выявляется в кованой и катанной стали после закалки и отпуска. Получил свое название по аналогии с изломом шифера, легко раскалывающегося по плоскости в одном направлении.

Причинами шиферного излома являются:

а) наличие неметаллических включений, вытягивающихся вдоль направления прокатки;

б) наличие разнородных по пластическим свойствам участков металла, как результат неравномерного распределения примесей и фаз.

Таким образом, шиферный (слоистый) излом свидетельствует о загрязнении материала неметаллическими включениями и низком качестве материала.

Нафталинистый излом (рис. 1.5) характеризуется крупнозернистостью и наличием своеобразного блеска, напоминающего блеск чешуек нафталина. Такой излом указывает на повышенную хрупкость стали. Обнаруживается чаще всего у быстрорежущей стали при нарушении технологии обработки этой стали, а также у других сталей, как результат сильного перегрева.

Дендритный излом выявляется у литого металла. Разрушение в этом случае происходит по границам сопряженных дендритных кристаллов и наблюдается у белых чугунов.

Смешанный излом (рис. 1.1, з, рис. 1.2, а) — излом кристаллический в одних участках и волокнистый в других. Смешанный излом наблюдается

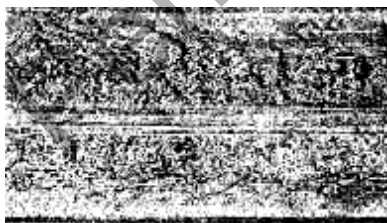


Рисунок 1.4 — Шиферный излом стали

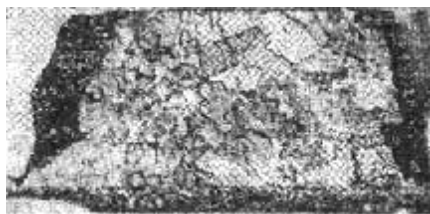


Рисунок 1.5 — Нафталинистый излом быстрорежущей стали

в условиях усталостного разрушения (усталостный излом) у сталей с несквозной прокаливаемостью. Этот излом можно также наблюдать на образцах после ударных испытаний: темная каемка на периферии образца — вязкая составляющая — довольно резко отличается от светлой сердцевины, где имеет место хрупкое разрушение.

Усталостный излом всегда имеет две зоны разрушения. Одна из них соответствует участку развития усталостной трещины и имеет характерный (иногда блестящий) вид. На поверхности этой зоны часто видны контуры фронта распространения трещин, которые сходятся в очаге разрушения. Вторая зона — зона долома — возникает в результате быстрого окончательного разрушения. Она может иметь либо хрупкое, либо вязкое, либо смешанное строение в зависимости от условий испытания или работы детали. Такой излом наблюдается у деталей, работающих в условиях повторно-переменных нагрузок (шатунуны, коленчатые валы и др.).

На поверхности изломов можно обнаружить различные дефекты: поры — пузыри, грубую пятнистую ликвацию, которая в изломе имеет вид темных полос и флокены. Флокены (трещины, заполненные водородом) в изломе имеют вид светлых округлых пятен с кристаллической поверхностью серебристого или светлого оттенка.

При оценке вида излома необходимо учитывать характер прилагаемой нагрузки, так как один и тот же материал в одном и том же структурном состоянии может иметь волокнистый излом при статическом нагружении и кристаллический излом — при ударном нагружении.

II Экспериментальная часть

1. Изучить коллекцию макродефектов и перечислить обнаруженные макродефекты.
2. Изучить коллекцию макрошлифов и сварных швов.
3. Изучить и зарисовать коллекцию изломов.
4. Оформить отчет по работе.

III Содержание отчета

1. Изучить и составить краткий конспект основных теоретических данных о назначении и методике проведения макроструктурного анализа.
2. Представить результаты изучения поверхности деталей.

3. Представить рисунки макрошлифов с указанием имеющихся дефектов.
4. Представить рисунки макроструктуры коллекции изломов.
5. Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение макроструктурного анализа? Назовите его задачи.
2. Какими основными способами проводится макроструктурный анализ?
3. Какие дефекты можно обнаружить с помощью макроструктурного анализа?
4. Что такое ликвация? Назовите ее виды.
5. Назовите и охарактеризуйте виды изломов, их связь со свойствами металла.
6. Что можно сказать о металле по его излому?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2 МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цель работы:

- 1) ознакомиться с процессом приготовления микрошлифов;
- 2) изучить устройство металлографического микроскопа и приобрести практические навыки работы на нем;
- 3) освоить технику проведения микроструктурного анализа в отраженном свете.

Приборы и материалы: микроскоп МЕТАМ ЛВ, комплект микрошлифов, шлифовальная бумага водостойкая с различным размером зерна, раствор для травления, спирт, фильтровальная бумага, вата.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

I Основные теоретические сведения

1 Назначение микроанализа. Устройство и работа микроскопа. Методы подготовки образцов для микроанализа

Микроструктурный метод исследования материалов заключается в изучении строения при помощи микроскопа специально приготовленных образцов — микрошлифов.

Микроанализ был впервые применен в 1831 году П. П. Аносовым, который указал на определенную связь между структурой и свойствами металлов. С этого времени микроанализ стал одним из основных методов исследования металлов и сплавов.

Строение материала, изучаемого при микроанализе, называется **микроструктурой**.

Назначение микроанализа следующие:

- выявить микроструктуру;
- определить количество структурных составляющих, их процентное соотношение, размер, форму и характер распределения отдельных составляющих;
- определить наличие неметаллических включений и микродефектов.

Анализ микроструктуры позволяет оценить влияние технологической операции (пластической деформации, термической и химико-термической обработки и др.) на свойства сплавов, а в ряде случаев определить причину разрушения изделия.

Микроанализ непрозрачных объектов проводится в отраженном свете на микроскопе МЕТАМ ЛВ (рис. 2.1).

В состав микроскопа входят следующие узлы: основание 2, осветитель 4, направляющая с отражателями, револьвер 5 с объективами,

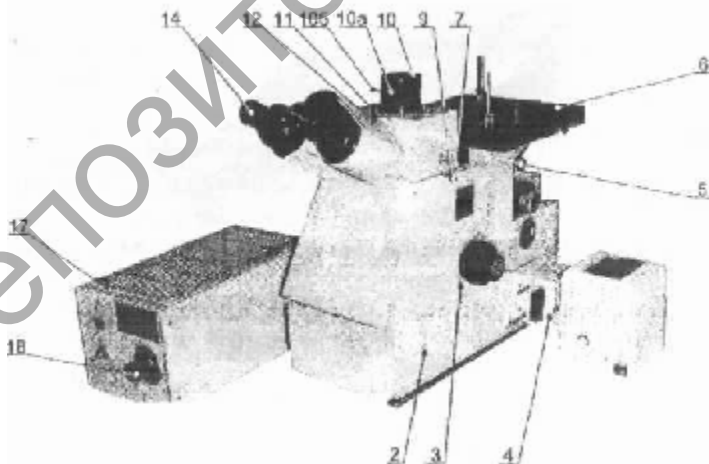


Рисунок 2.1 — Общий вид микроскопа МЕТАМ ЛВ

фокусировочный механизм с предметным столиком 6, фототубус 3, бинокулярная насадка 12 с окулярами и видеотубусом 10 а.

Принципиальная схема микроскопа представлена на рисунке 2.2.

Объект 1 помещают перед объективом 2, который создает увеличенное и перевернутое изображение объекта 3. Данное изображение расположено перед окуляром 4, который создает увеличенное мнимое изображение 5 объекта, расположенное от глаза наблюдателя 6 на расстоянии наилучшего видения ($D = 250$ мм).

Величина увеличения микроскопа показывает, во сколько раз угол зрения, под которым наблюдаемый объект виден в микроскоп, больше угла зрения, под которым невооруженный глаз видит этот объект на расстоянии 250 мм.

Общее увеличение микроскопа V равно:

$$V = V_{об} \cdot V_{ок},$$

где $V_{об}$ — увеличение объектива;

$V_{ок}$ — увеличение окуляра.

Увеличение микроскопа не может быть беспредельным. Оно ограничено величиной так называемой *разрешающей способности микроскопа* δ ,

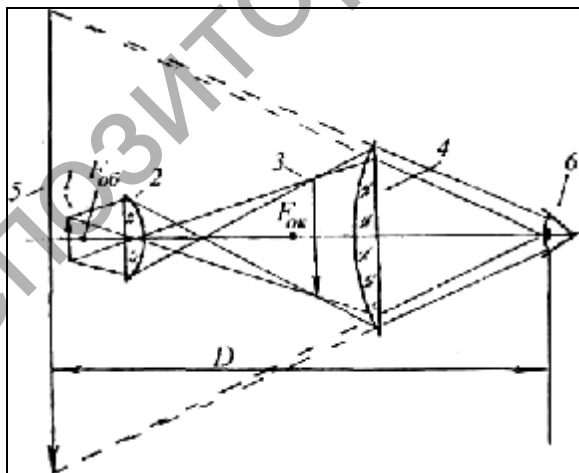


Рисунок 2.2 — Принципиальная схема микроскопа

под которой понимается минимальное расстояние между двумя точками на поверхности объекта, позволяющее различать их отдельно. Разрешающая способность микроскопа δ зависит от длины световой волны λ :

$$\delta = \lambda / 2A,$$

где A — числовая апертура объектива, определяемая по формуле

$$A = n \sin \alpha / 2,$$

где n — показатель преломления среды;

α — угол раскрытия входящего светового пучка.

Интервал увеличений, при котором две разрешаемые точки отчетливо воспринимаются глазом, называется полезным увеличением микроскопа.

1.1 Отбор образцов и их подготовка к микроанализу

Небольшой образец металла, имеющий особо приготовленную поверхность для микроанализа, называется **микрошлифом**.

В зависимости от цели исследования и формы исследуемой детали выбирают место вырезки образца.

Пробы и образцы отбирают из наиболее характерных зон металлопродукции. В случае выяснения причин разрушения деталей образцы вырезают вблизи места разрушения (ножовкой, фрезой, резцом, вулканитовым кругом). При отборе проб и при изготовлении образцов должны быть предусмотрены все меры, предохраняющие образцы от нагрева и наклепа (упрочнения под действием пластической деформации), которые искажают структуру и изменяют свойства.

Поверхность образца делают плоской и шлифуют вручную или на специальных шлифовальных станках наждачными шкурками с различными номерами зернистости, соблюдая последовательность перехода от грубозернистых шкурок к мелкозернистым шкуркам. После шлифования для удаления абразива шлиф промывают водой. Для удаления мелких рисок образец после шлифования полируют на специальном полировальном станке, диск которого обтянут материалом (фетр, бархат, тонкое сукно). Материал периодически поливают водой с абразивным веществом (окись алюминия, окись железа, окись хрома и т. д.).

Полирование считается законченным, когда поверхность образца приобретает зеркальный блеск и на ней даже под микроскопом не видны риски или царапины. После полирования шлиф промывают водой или спиртом и просушивают фильтровальной бумагой.

Для микроанализа обычно применяют образцы диаметром 10...15 мм или со стороной квадрата 10...15 мм при высоте 10...20 мм. Образцы, размеры которых значительно меньше общепринятых, помещают для удобства обращения с ними в различные оправки, зажимы, заливают легкоплавкими сплавами, запрессовывают в пластмассу. Нетравленный полированный шлиф металла под микроскопом имеет блестящую светлую поверхность. При изучении нетравленного шлифа можно наблюдать неметаллические включения (оксиды, сульфиды, силикаты и др.), поры, графитные включения.

1.2 Травление микрошлифов

Для выявления микроструктуры образец подвергают травлению одним из способов: химическим травлением, электролитическим травлением, тепловым травлением, травлением в расплавленных солях, катодным травлением, методом окисления, магнитным методом. Выбор метода травления определяется составом сплава и целью исследования. В настоящей работе студентами используется химическое травление.

Выявление микроструктуры металла при химическом травлении проводят различными способами: погружением образца в раствор для травления, втиранием раствора в поверхность шлифа и смачиванием поверхности шлифа реактивом.

Химическое травление основано на различии физико-химических свойств отдельных фаз и пограничных участков зерен. Зерна различного химического состава растворяются при травлении в агрессивных средах (кислоты, соли, щелочи) с различной скоростью. Если же зерна не отличаются по составу (например, у чистого металла), то в первую очередь металл растворяется на границах зерен, где сосредоточено большое количество примесей, способствующих образованию гальванических пар. Все это приводит к формированию рельефа поверхности шлифа (рис. 2.3). Если освещать такой шлиф падающим светом, то из-за присутствия косых лучей образуются теневые картины, по которым можно судить о структуре металла.

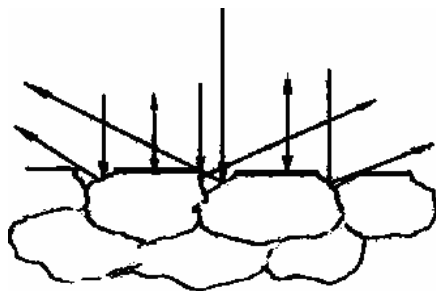


Рисунок 2.3 — Схема отражения лучей от полированной и протравленной поверхности микрошлифа

Травление считается законченным, когда полированная поверхность становится слегка матовой. Окончательно качество травления проверяется под микроскопом. Если наблюдаемая при этом поверхность шлифа очень светлая, отсутствует четкость контуров — шлиф не протравлен; если темная, с широкими затемненными границами структурных образований — шлиф перетравлен. В первом случае производят повторное травление, во втором — шлиф снова полируют, снимают поверхностный слой и травят. После окончания травления шлиф (во избежание окисления) промывают проточной водой, а затем протирают спиртом и высушивают, прикладывая фильтровальную бумагу. Для химического травления используют разнообразные реактивы (табл. 2.1).

Т а б л и ц а 2.1 — Рекомендуемые составы реактивов

Исследуемый материал	Состав реактива
Стали и чугуны	(1,5...4,0) %-й раствор азотной кислоты в воде или спирте (вода ускоряет травление)
Медь и все сплавы	10 г хлорного железа, 25 см ³ соляной кислоты, 100 см ³ воды; аммиачный раствор двойной соли (хлористой меди и хлористого аммония); 10 г двойной соли, 100 см ³ воды, аммиак (до получения нейтральной или щелочной реакции)
Алюминий и его сплавы	0,5 см ³ фтористой кислоты, 99,5 см ³ воды; 1,0 см ³ фтористой кислоты, 1,5 см ³ соляной кислоты, 2,5 см ³ азотной кислоты, 95,0 см ³ воды

1.3 Анализ микроструктуры сплавов

Микроструктура сплава может быть однофазной и многофазной.

При изучении однофазной структуры можно наблюдать темные границы зерен (рис. 2.4), так как они более глубоко протравились больше рассеивают свет, а, следовательно, определить форму и размер зерен.

При исследовании формы зерна можно различать равноосную зернистую (рис. 2.4, *а*), пластинчатую (рис. 2.4, *б*), полиэдрическую (рис. 2.4, *в*), шаровидную (рис. 2.4, *г*), вермикулярную (рис. 2.4, *е*), игольчатую (рис. 2.4, *ж*) структуры.

Многофазная структура состоит из двух или более типов кристаллов, различающихся степенью травления и формой (рис. 2.5, *а, б*). Если кристаллизация фаз происходит одновременно, то можно наблюдать смеси с пластинчатым (рис. 2.5, *а*) или с дендритным строением (рис. 2.5, *б*), а если не одновременно, то вторая фаза выделяется по границам зерен в виде цепочки (рис. 2.5, *в*) или сетки (рис. 2.5, *д*).

Пластическая деформация (вытяжка, осадка, прокатка и т. д.) приводит к появлению зерен, ориентированных по отношению направления действия деформирующего усилия. Такая структура называется **текстурой** (рис. 2.6).

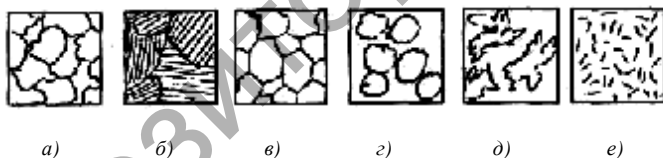


Рисунок 2.4 — Схема микроструктуры однофазных металлов и сплавов

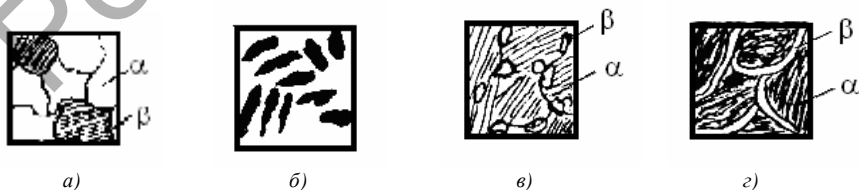


Рисунок 2.5 — Схема микроструктуры двухфазных сплавов

1.3 Определение цены деления окуляр-микрометра

При исследовании металла часто необходимо знать величину микроскопического объекта (размер зерен, глубину закаленного слоя и т. д.).

Величина изучаемого микрообъекта измеряется с помощью окуляр-микрометра, т. е. окуляра, в который вставлена пластинка с линейкой.

Прежде чем начать измерение, необходимо определить цену деления окуляр-микрометра при выбранном объективе. Для этого на предметный столик микроскопа устанавливается объект-микрометр, представляющий собой пластину, на которую нанесена шкала длиной в 1мм, разделенная на 100 равных частей (рис. 2.7). После наведения на фокус в поле зрения микроскопа видны шкалы объект-микрометра и окуляр-микрометра. Совместив обе шкалы, можно узнать, сколько делений шкалы объект-микрометра совмещается с делениями шкалы окуляр-микрометра.

Цену деления окуляр-микрометра ($\Pi_{ок}$) определяют по формуле

$$\Pi_{ок.-микр.-м} = A \Pi_{об.-микр.-м} / B,$$

где A — число совмещенных делений объект-микрометра;

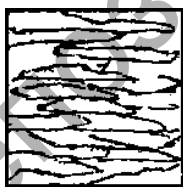


Рисунок 2.6 —
Схема
микроструктуры
(текстуры)
деформированного
образца

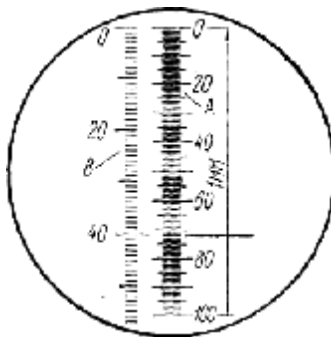


Рисунок 2.7 — Схема для
определения цены деления
окуляра микроскопа:
 A — шкала объект-микрометра;
 B — шкала окуляр-микрометра

$C_{\text{об.-микро.-м}}$ — цена деления шкалы объект-микрометра;

B — число совмещенных делений окуляр-микрометра.

Зная цену делений окуляр-микрометра, можно измерить им глубину упрочненного слоя, размер зерна и т. п.

1.4 Определение величины зерна

Величина зерна определяется составом металла, условиями его выплавки, кристаллизации, механической и термической обработки. Размеры зерен в металле влияют на многие его свойства. Для сплава с мелкими зернами характерны более высокие механические свойства: прочность, пластичность и вязкость.

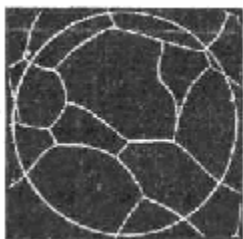
Методы выявления и определения величины зерна регламентированы ГОСТ 5639-82 Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. Для определения величины зерна применяют три метода: сравнение видимых под микроскопом зерен с эталонными изображениями шкал, подсчет количества зерен на единице поверхности шлифа, измерение среднего диаметра зерна. По методу сравнения шлиф изучают под микроскопом при увеличении в 100 раз и сравнивают величину зерна с эталонными изображениями на шкале (рис. 2.8).

Всего имеется 18 номеров зерна: $-3...+14$, которым соответствует изменение размеров зерен 1 мм...0,003 мм. С уменьшением величины зерна увеличивается номер.

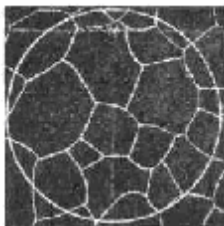
Величину зерен методом подсчета количества зерен, приходящихся на единицу поверхности шлифа, определяют на матовом стекле камеры микроскопа или на микрофотографиях, где ограничивают поле зрения окружностью диаметром 79,8 мм (что соответствует площади на шлифе 0,5 мм²). Увеличение подбирают так, чтобы на исследуемой поверхности насчитывалось не менее 50 зерен (ГОСТ 5639-82).

Измерение среднего диаметра зерна проводится с помощью окуляр-микрометра микроскопа. Зная цену деления окуляр-микрометра, вычисляют средний поперечный размер зерна (в мм), ГОСТ 5639-82.

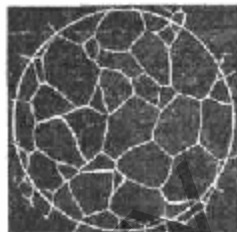
В производственных условиях в большинстве случаев применяют метод визуальной оценки величины зерна в стали. Стандартные номера зерен (1—10) определяются при 100-кратном увеличении. Если размер зерна исследуемого образца выходит за пределы номеров зерен 1—10 шкалы, пользуются другими увеличениями. Номера зерен $-3, -2, -1, 0$ при 25-кратном



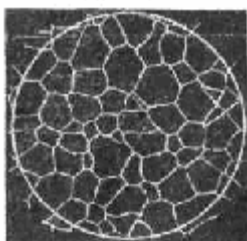
1)



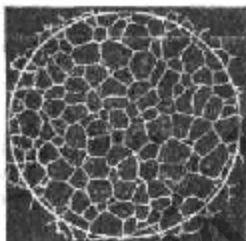
2)



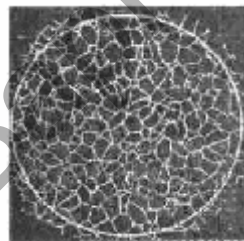
3)



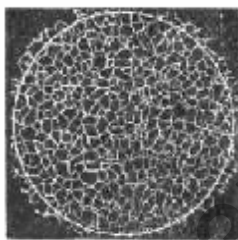
4)



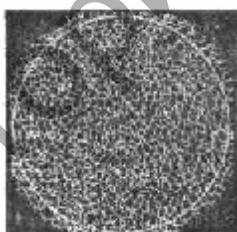
5)



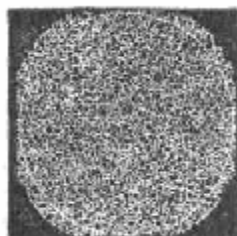
6)



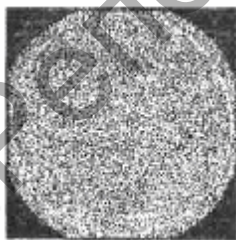
7)



8)



9)



10)

Рисунок 2.8 — Шкала для определения величины (номера) зерна стали

увеличении соответствуют номерам 1, 2, 3, 4 соответственно, а номера 11, 12, 13, 14 при 400-кратном увеличении — номерам 7, 8, 9, 10. Номера зерен до 4 считаются крупными, а свыше 6 — мелкими.

II Экспериментальная часть

1. Описать назначение микроанализа, основные методы подготовки образцов к микроанализу. Привести принципиальную схему микроскопа и схему формирования изображения при наблюдении в микроскоп, охарактеризовать увеличение микроскопа и его разрешающую способность.

2. Зарисовать картину, наблюдаемую при изучении полированной, не-протравленной поверхности образца. Сделать вывод о качестве подготовки поверхности и наличии неметаллических включений. Зарисовать микроструктуру, наблюдаемую после химического травления поверхности образца. Сделать вывод о количестве присутствующих фаз и форме зерен.

3. Определить цену деления окуляр-микрометра.

4. Определить размер зерна микроструктуры одним из методов, предложенных преподавателем, используя шкалу (рис. 2.8) или ГОСТ 5639-82 и зарисовать эту микроструктуру.

III Содержание отчета

1. Изучить и составить краткий конспект основных теоретических данных о микроструктурном анализе металлов и сплавов.

2. Представить цену деления окуляр-микрометра.

3. Зарисовать размер зерна микроструктуры одним из методов, представленных преподавателем, используя шкалу (рис. 2.8).

Контрольные вопросы

1. На чем основан принцип работы металлографического микроскопа?
2. Какие основные узлы входят в состав микроскопа?
3. Дайте определение понятия «увеличение микроскопа». Каким образом можно его определить.
4. В чем заключается подготовка образца к микроанализу?
5. Охарактеризуйте основные методы выявления структуры образцов.
6. Как влияют размеры зерна на свойства сплавов? Расскажите об основных методах определения величины зерна.
7. Как определить цену деления окуляр-микрометра при данном объективе?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

**ИЗУЧЕНИЕ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ
СПЛАВОВ ЖЕЛЕЗО — ЦЕМЕНТИТ**

Цель работы: изучить диаграмму состояния железо — цементит, анализируя превращения, происходящие в сплавах этой системы при образовании фаз и структур различных сплавов.

Приборы и материалы: диаграмма состояния сплава железо — углерод, схема для изучения превращений, происходящих в сплавах I и II при их охлаждении.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

I Основные теоретические сведения

Железоуглеродистые сплавы находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Основными компонентами сталей и чугунов являются железо и углерод. Железо в твердом состоянии может находиться в двух модификациях α и γ .

Углерод в сплавах с железом может существовать как в виде цементита (карбида железа Fe_3C), так и в виде графита. Цементит имеет орторомбическую решетку, графит — гексагональную. Цементит является неустойчивым химическим соединением. При высокой температуре и продолжительной выдержке цементит распадается с образованием графита и аустенита. Этот процесс имеет важное практическое значение для высокоуглеродистых сплавов — чугунов. В сталях, где концентрация углерода сравнительно невысока, цементит приобретает большую устойчивость.

Фазовый состав и структура промышленных сплавов, медленно охлажденных до комнатных температур, достаточно точно согласуются с диаграммой железо — углерод, первый вариант которой был построен «отцом металлографии железа» Д. К. Черновым в 1868 году.

В зависимости от внешних условий углерод в равновесии с жидкой фазой и твердыми растворами на базе железа может находиться в виде цементита (метастабильное равновесие) и графита (стабильное равновесие). В связи с этим существуют два варианта диаграммы железо — углерод (рис. 3.1): железо — цементит (метастабильная) и железо — графит (стабильная). Большее практическое значение имеет метастабильная диаграмма, так как с помощью этой диаграммы объясняют не только

превращения, происходящие в сталях и белых чугунах. Диаграмма является основой для рационального выбора оптимальных режимов термической обработки железоуглеродистых сплавов.

Преобразования в сплавах происходят при некотором их переохлаждении (перенагреве) ниже (выше) температуры равновесного состояния. Переохлаждение необходимо для создания термодинамически выгодных условий развития процесса в системе. В рассматриваемой системе выше линии ликвидус все сплавы находятся в жидком состоянии. Первичная кристаллизация их происходит в интервале температур между линиями ликвидус $ABCD$ и солидус $AHJECF$.

Кроме жидкой фазы L в системе железо — цементит присутствуют следующие фазы:

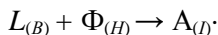
1) *феррит* (Φ) — твердый раствор внедрения углерода в α -железо. На диаграмме имеются две однофазные области феррита: высокотемпературная и низкотемпературная, которые расположены левее линии AHN и GPQ . Растворимость углерода в высокотемпературной модификации достигает 0,1% (1499°C), а в низкотемпературной модификации — 0,02% (727°C);

2) *аустенит* (A) — твердый раствор внедрения углерода в γ -железо. Однофазная область аустенита на диаграмме ограничена линией $NJESG$. Максимальная растворимость углерода в аустените составляет 2,14% (1147°C, точка E);

3) *цементит* (C) — химическое соединение железа с углеродом, соответствующее формуле Fe_3C , с концентрацией углерода 6,67% (вертикальная линия $DFKL$).

Все остальные области диаграммы являются двухфазными. В двухфазных областях в равновесии находятся: в области ABH — жидкий раствор и кристаллы феррита, HJN — кристаллы феррита и аустенита, $JBCE$ — жидкий раствор и кристаллы аустенита, CDF — жидкий раствор и кристаллы цементита, GPS — кристаллы аустенита и феррита, $SECFK$ — кристаллы аустенита и цементита, $QPSKL$ — кристаллы феррита и цементита.

Горизонтальные линии на диаграмме отвечают трехфазным равновесным состояниям сплавов. В сплавах с концентрацией углерода 0,1...0,51% при температуре 1499°C (линия HJB) происходит перитектическое превращение. В результате взаимодействия кристаллов феррита с окружающим жидким раствором образуется аустенит. Реакцию этого превращения можно записать следующим образом:

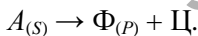


Перитектическое превращение в сплавах, расположенных левее точки J ($C = 0,1 \dots 0,16\%$), идет до исчезновения жидкой фазы, а в сплавах, расположенных правее точки J ($C = 0,16 \dots 0,51\%$) — до исчезновения феррита. При температуре 1147°C (линия ECF) в сплавах с концентрацией углерода $2,14 \dots 6,67\%$ происходит эвтектическое превращение:



В процессе превращения жидкий раствор затвердевает в виде механической смеси кристаллов аустенита и цементита, которая называется *ледебуритом* (Л).

Во всех сплавах системы с концентрацией углерода более $0,02\%$ при температуре 727°C (линия PSK) происходит эвтектоидное превращение, заключающееся в распаде аустенита на дисперсную механическую смесь чередующихся пластинок феррита и цементита, которая называется *перлитом* (П):



Причиной эвтектоидной реакции является полиморфное превращение $\text{Fe}_\gamma \rightarrow \text{Fe}_\alpha$ и резкое уменьшение растворимости углерода с $0,8\%$ в γ -фазе до $0,02\%$ в α -фазе. Перлитное превращение происходит аналогично эвтектическому и отличается от него тем, что перлит образуется из твердой фазы, а не из жидкой, как ледебурит.

Цементит может образовываться из жидкой и твердой фаз при различных температурах. Цементит, выделяющийся из жидкой фазы, называют *первичным*, из аустенита — *вторичным*, а из феррита — *третичным*.

Железоуглеродистые сплавы при температурах, соответствующих перитектическому, эвтектическому или эвтектоидному превращению, находятся в трехфазном равновесном состоянии. Все эти превращения происходят при определенных постоянных температурах и характеризуются остановкой (горизонтальным участком) на кривой охлаждения сплавов. Во всех остальных областях диаграммы в равновесии находятся одна и две фазы. Превращения в сплавах в однофазных и двухфазных областях происходят в интервалах соответствующих температур. На кривых охлаждения сплавов начало и конец превращений фиксируются перегибами.

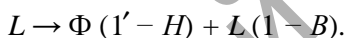
Железоуглеродистые сплавы с концентрацией углерода до $0,02\%$ называют *железом*, с концентрацией углерода от $0,02$ до $2,14\%$ — *стальями*, а с концентрацией углерода свыше $2,14\%$ — *чугунами*. Стали по содержанию углерода делятся на: доэвтектоидные ($C < 0,8\%$), эвтекто-

идные ($C \approx 0,8\%$) и заэвтектоидные ($C \approx 0,8—2,14\%$). В свою очередь чугуны делятся на доэвтектические ($C \approx 2,14—4,3\%$), эвтектические ($C \approx 4,3\%$) и заэвтектические ($C > 4,3\%$).

Формирование фаз или структур в сплавах можно изучить, рассматривая по диаграмме процессы, происходящие в них при охлаждении или нагреве.

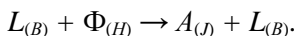
В качестве примера проследим за формированием структуры сталей с содержанием углерода 0,3% и 1,5% при их медленном охлаждении. Критические точки, соответствующие температурам превращений, показаны на линиях (рис. 3.2) сплавов I ($C = 0,3\%$) и II ($C = 1,5\%$).

Доэвтектоидная сталь с содержанием углерода 0,3% выше $1\ 525^\circ\text{C}$ находится в жидком состоянии. Кристаллизация ее начинается при $1\ 525^\circ\text{C}$ (точка I) с выделения из жидкого раствора кристаллов феррита. В процессе затвердевания сплава состав феррита изменяется согласно линии AH от точки I' до H , а жидкости — согласно линии AB от точки I до B . Эту стадию кристаллизации можно записать следующим образом:

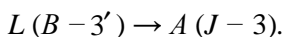


Выделение феррита идет при понижении температуры сплава ($C = K - \Phi + 1 = 2 - 2 + 1 = 1$; фазы: феррит и жидкий раствор).

При температуре $1\ 499^\circ\text{C}$ (точка 2) феррит (0,1% C) вступает во взаимодействие с жидким раствором (0,51% C); в результате этой реакции образуются кристаллы аустенита (0,16% C). Превращение называют *перитектическим*, которое протекает при постоянной температуре ($C = 2 - 3 + 1 = 0$; фазы: феррит, аустенит и жидкий раствор) до исчезновения феррита:



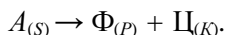
По окончании перитектического превращения из оставшейся жидкости выделяются кристаллы аустенита. Кристаллизация жидкости протекает в интервале температур $1499...1480^\circ\text{C}$ (точки 2, 3), так как система находится в моновариантном равновесии ($C = 2 - 2 + 1 = 1$; фазы: аустенит и жидкий раствор), в результате чего изменяется состав жидкой и твердой фаз:



Сплав затвердевает при $1\ 480^\circ\text{C}$ (точка 3) и при дальнейшем охлаждении до 870°C превращений не претерпевает.

При температуре 870°C (точка 4) в результате полиморфного превращения $\text{Fe}_{\gamma} \rightarrow \text{Fe}_{\alpha}$ из аустенита начинает образовываться феррит. Понижение температуры способствует выделению феррита ($C = 2 - 2 + 1 = 1$; фазы: аустенит и феррит) и изменению состава фаз: феррита согласно линии GP (точки $4' - P$), а аустенита согласно линии GS (точки $4 - S$).

На линии PSK (точка 5) происходит эвтектоидное превращение. Аустенит ($0,8\% C$) распадается на феррито-цементитную смесь — перлит:



В соответствии с правилом фаз эвтектоид формируется при постоянной температуре ($C = 2 - 3 + 1 = 0$; фазы: аустенит, феррит и цементит).

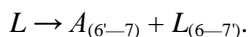
С понижением температуры сплава ниже 727°C растворимость углерода в феррите уменьшается (линия PQ). В связи с этим избыточный углерод из феррита выделяется в виде цементита третичного:



Выделение цементита третичного является моновариантным процессом ($C = 2 - 2 + 1 = 1$; фазы: феррит и цементит). Цементит третичный в структуре стали металлографическим анализом не различается, так как сливается с цементитом эвтектоида.

При комнатной температуре структура стали с содержанием углерода $0,3\%$ состоит из феррита и перлита.

До температуры 1450°C (точка 6) сталь с содержанием углерода $1,5\%$ находится в жидком состоянии. При температуре 1450°C начинается процесс ее кристаллизации. В интервале температур $1450 \dots 1250^{\circ}\text{C}$ (точки $6 - 7$) в сплаве сосуществуют две фазы: жидкий раствор и аустенит. По мере охлаждения сплава концентрация компонентов в аустените изменяется согласно линии IE от точки $6'$ к точке 7, а в жидкости — согласно линии BC от точки 6 к точке $7'$, что можно записать следующим образом:



Составы и количества фаз в этой области диаграммы (точка m) можно определить по правилу отрезков. Состав жидкой фазы найдем

проекцией точки n (конода kmn), а состав твердой фазы — проекцией точки k . Количество фаз находится из соотношения отрезков:

$$A = mn / kn \cdot 100\%;$$

$$L = km / kn \cdot 100\%.$$

Процесс первичной кристаллизации сплава идет при понижении температуры, что согласуется с правилом фаз ($C = K - \Phi + 1 = 2 - 2 + 1 = 1$; фазы: жидкий раствор и аустенит). Кристаллизация сплава заканчивается в точке 7 ($1\ 250^\circ\text{C}$). В интервале температур $1250 \dots 950^\circ\text{C}$ (точки 7, 8) сплав охлаждается, не претерпевая никаких превращений. При охлаждении сплава ниже 950°C (точка 8) аустенит с концентрацией углерода 1,5% становится перенасыщенным. Избыточный углерод из зерен аустенита диффундирует к их границам и здесь выделяется в виде цементита вторичного. Процесс формирования цементита вторичного ($C = 2 - 2 + 1 = 1$; фазы: аустенит и цементит) протекает с понижением температуры сплава. Концентрация углерода в аустените при охлаждении сплава от $950^\circ\text{C} \dots 727^\circ\text{C}$ изменяется согласно линии ES от точки 8 к точке S :



При температуре 727°C (точка 9) в сплаве происходит эвтектоидное превращение, в результате которого образуется перлит. Ниже температуры 727°C в сплаве протекают превращения, аналогичные ранее рассмотренным (сплав I).

Превращения в сплавах в процессе нагрева происходят в обратной последовательности при некотором их перегреве выше температур равновесного состояния. Влияние перегрева при изучении превращений, происходящих в сплавах, обычно не учитывают, так как фазовые изменения в сплавах соответствуют линиям диаграммы.

Таким образом, в структуре стали с концентрацией углерода 1,5% при комнатной температуре наблюдаются зерна перлита, окаймленные тонкой сеткой цементита вторичного. Цементит третичный металлографическим анализом не обнаруживается, так как сливается с одноименной фазой эвтектоида и цементитом вторичным.

Кривые охлаждения рассмотренных сплавов приведены на рисунке 3.2, б.

II Экспериментальная часть

1. Вычертить диаграмму состояния с указанием температур превращений и концентраций углерода характерных точек.
2. Указать фазы и структурные составляющие в различных областях диаграммы.
3. Написать реакции, происходящие при охлаждении сплавов на изотермах *HJB*, *ECF*, *PSK*.
4. Построить кривую охлаждения (нагрева) заданного преподавателем сплава с применением правила фаз.
5. Описать превращения при охлаждении (нагревании) сплава, концентрация углерода в котором задается преподавателем.
6. Определить составы фаз и структурных составляющих, их массовые доли (%) в данном сплаве при температуре, заданной преподавателем.

III Содержание отчета

1. Изучить и составить краткий конспект основных теоретических сведений по изучению диаграммы состояния сплавов железо — цементит.
2. Представить диаграмму состояния с указанием температур превращений и концентраций углерода характерных точек.
3. Сделать вывод.

Контрольные вопросы

1. Значение диаграммы состояния железо — углерод.
2. Сколько однофазных областей на диаграмме состояния железо — цементит?
3. Сколько двухфазных областей на диаграмме состояния железо — цементит?
4. Какое превращение происходит на линии *HJB* диаграммы? Напишите реакцию этого превращения.
5. Какое превращение происходит на линии *ECF* диаграммы? Напишите реакцию этого превращения.
6. Какое превращение происходит на линии *PSK* диаграммы? Напишите реакцию этого превращения.
7. Какие температуры соответствуют перитектическому, эвтектическому, эвтектоидному превращениям на диаграмме железо — цементит?
8. Какие фазы существуют в сплавах на диаграмме железо — цементит? Дайте их определение.
9. Что называется ледебуритом?
10. Что называется перлитом?

11. Какие сплавы называют сталями?
12. Какие сплавы называют чугунами?
13. Как по содержанию углерода делятся стали и чугуны?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СТАЛЕЙ В РАВНОВЕСНОМ СОСТОЯНИИ

Цель работы:

- 1) исследовать микроструктуру углеродистых сталей в равновесном состоянии и установить связь между структурой сталей и диаграммой состояния;
- 2) определить по микроструктуре марку стали; о
- 3) ознакомиться с маркировкой, назначением, свойствами и применением углеродистых сталей.

Приборы и материалы: микроскоп МЕТАМ ЛВ, раствор для травления, спирт, фильтровальная бумага, вата, коллекция микрошлифов.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

I Основные теоретические сведения

1 Изучение микроструктур сталей в равновесном состоянии.

Установление связи между структурой сталей и диаграммой состояния Fe—Fe₃C

Сталь — сплав железа с углеродом, в котором содержится 0,02...2,14% углерода. Также в сталях постоянно присутствуют примеси марганца, кремния, алюминия, фосфора, серы и газы (кислород, азот, водород). Если марганец, кремний, алюминий необходимы по условиям технологии выплавки, то сера, фосфор и газы относятся к вредным примесям, не поддающимся полному удалению. Чем меньше вредных примесей, тем выше качество стали.

Качество стали зависит от способа ее выплавки, разливки и обработки на металлургических заводах.

Углеродистые стали наиболее применимы в различных отраслях промышленности. Их доля в общем объеме производства сталей составляет около 80%. Свойства сталей очень разнообразны и зависят от

содержания углерода в них. Микроструктура углеродистых сталей в равновесном состоянии, полученная в результате оптимального нагрева и медленного охлаждения (отжига), может быть определена по диаграмме состояния железо — цементит (рис. 4.1).

Сплавы железа с углеродом, содержащие углерода до 0,02%, называют *технически чистым железом*. Его структура состоит из светлых зерен феррита с хорошо видимыми темными границами (рис. 4.2, *a*). Железоуглеродистые сплавы, содержащие углерода 0,02...2,14%, называются *сталями*. По структуре в равновесном состоянии стали делят на доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные.

Доэвтектоидные стали содержат 0,02...0,8% углерода. Структура этих сталей состоит из светлых зерен феррита и темных зерен перлита (рис. 4.2, *b*, *в*, *г*). С увеличением содержания углерода уменьшается количество феррита, возрастает количество перлита.

Эвтектоидная сталь содержит 0,8% углерода и состоит только из перлита (эвтектоидной смеси феррита и цементита), имеющего пластинчатое или зернистое строение (рис. 4.2, *д*).

Заэвтектоидные стали содержат 0,8%...2,14% углерода. Их структура состоит из перлита и вторичного цементита (рис. 4.2, *e*). При медленном охлаждении вторичный цементит располагается по границам зерен перлита

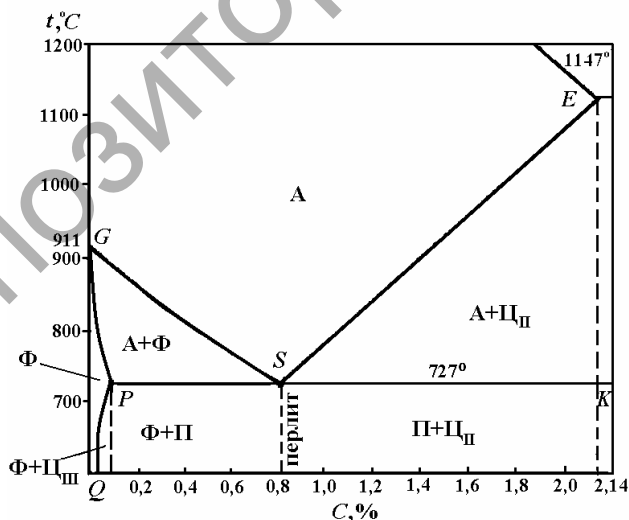


Рисунок 4.1 — Левый нижний угол диаграммы железо — цементит

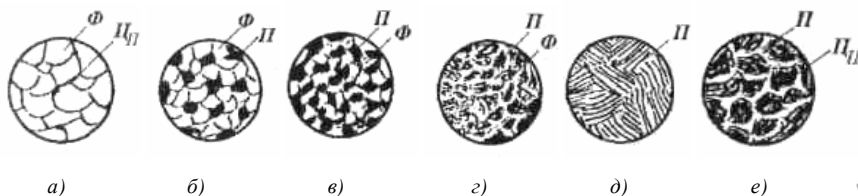


Рисунок 4.2 — Микроструктура стали в зависимости от содержания углерода

в виде сетки или ручейков белого цвета. Чтобы отличить цементит от феррита, применяют специальный реактив — пикрат натрия, который окрашивает цементит в темный цвет и совершенно не действует на феррит. Выделение вторичного цементита по границам зерен перлита нежелательно, так как такая структура обладает повышенной хрупкостью и плохо обрабатывается резанием. Чем больше содержание углерода, тем более широкой получается цементитная сетка и меньше образуется перлита.

Таким образом, с увеличением содержания углерода в углеродистых сталях, находящихся в равновесном состоянии, меняются их структура и фазовый состав: уменьшается количество феррита (80...—100HB), увеличивается количество цементита (800HB) и в соответствии с этим в сталях возрастают твердость HB, предел прочности σ_b , уменьшается пластичность δ и ударная вязкость KCU (рис. 4.3). При содержании углерода свыше 1,0% предел прочности снижается, что объясняется образованием в структуре стали по границам зерен сплошной цементитной сетки.

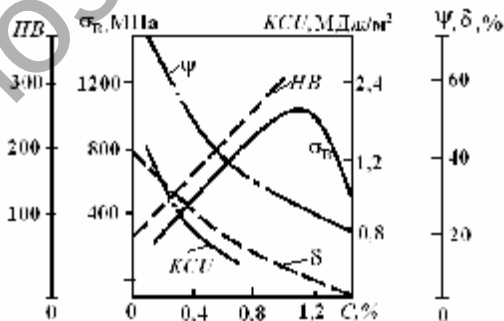


Рисунок 4.3 — Влияние углерода на механические свойства углеродистых сталей

По структуре стали, находящейся в равновесном состоянии, можно приблизительно определить содержание углерода, а затем установить марку стали. Для этого на микроструктуре, рассматриваемой под микроскопом, ориентировочно определяют площади, занимаемые перлитом, ферритом, цементитом. Принимают содержание углерода в феррите равным нулю, в 100% перлита — 0,8% С, а в 100% цементита — 6,67% С.

Например, пусть в доэвтектоидной стали перлит занимает 25% всей площади, феррит — 75%. Тогда содержание углерода в стали можно определить из следующей пропорции:

$$\begin{aligned} 100\% \text{ перлита} &— 0,8\% \text{ С,} \\ 25\% \text{ перлита} &— x\% \text{ С.} \end{aligned}$$

Получим

$$x = 25 \cdot 0,8 / 100 = 0,2\% \text{ С.}$$

Такое содержание углерода имеет конструкционная сталь марки 20. По структуре заэвтектоидной стали не рекомендуется определять содержание углерода, так как с увеличением его содержания мало изменяется площадь, занимаемая цементитом, и можно сделать грубую ошибку в расчете.

Что же представляют собой структурные составляющие углеродистых сталей: феррит, перлит, цементит и аустенит?

Феррит (Ф) — это почти чистое железо, модификации Fe_α с решеткой объемно-центрированного куба (ОЦК), в котором растворяется 0,006% С. При повышении температуры растворимость углерода увеличивается до 0,02% С. Это самая мягкая структурная составляющая сталей (80...100НВ, σ_в = 250 МПа, δ = 50%, ψ = 80%); стали с высоким содержанием феррита легко деформируются, но плохо обрабатываются резанием.

Перлит (П) присутствует во всех сталях. Из одного перлита состоит сталь с содержанием 0,8% углерода. Перлит — это эвтектоид — механическая смесь феррита и цементита, получающаяся при распаде аустенита с 0,8% С. При травлении шлифа стали 0,8% С, т. е. эвтектоидной стали, поверхность имеет перламутровый отлив, в связи с чем такую структуру и назвали перлитом.

В зависимости от режима отжига перлит имеет пластинчатое или зернистое строение (рис. 4.4).

Пластинчатым перлитом называют эвтектоидную смесь, в которой в кристаллах феррита равномерно распределены (чаще всего слегка



Рисунок 4.4 — Перлит:
a — пластинчатый; *б* — зернистый

изогнутые, параллельно расположенные) кристаллы цементита пластинчатой формы.

При больших увеличениях (в 500...1 000 раз) при рассмотрении в оптический микроскоп пластинчатое строение различимо всегда. При меньших увеличениях пластинчатое строение различимо только при достаточной толщине, а если перлит тонкопластинчатый, то зерна перлита при рассмотрении в микроскоп имеют однородный темный цвет.

Пластинчатая форма перлита образуется при нагреве углеродистых сталей выше температуры линии *GSE* и медленном охлаждении.

Зернистым перлитом называют эвтектоидную смесь, в которой в кристаллах перлита равномерно распределены округлые (глобулярные) кристаллы цементита. Образуется при нагреве стали выше температур линии *PSK* и медленном охлаждении.

Строение зернистого перлита хорошо выявляется при средних увеличениях (300...400 раз).

Пластинчатый перлит характеризуется более высокой твердостью и прочностью (твердость перлита пластинчатого составляет 180...250*HB*, предел прочности σ_b равен 550...820 МПа, пластичность δ — 5...15%; твердость перлита зернистого составляет 160...220*HB*, предел прочности σ_b равен 630 МПа, пластичность δ — 20%).

Цементит (Ц) — это химическое соединение Fe_3C (карбид железа). В цементите содержится 6,67% *C*. Характеризуется очень высокой твердостью (~ 800*HB*) и практически нулевой пластичностью ($\delta = 0\%$), т. е. хрупкий. Чем больше цементита в сталях, тем большей твердостью и меньшей пластичностью они обладают.

Аустенит (А) — структурная составляющая, появляющаяся в углеродистой стали только при нагреве выше 727°C (рис. 4.1). Аустенит

представляет собой твердый раствор внедрения углерода в γ -железо с решеткой гранцентрированного куба (ГЦК). Аустенит пластичен, твердость его составляет 160...200НВ, пластичность δ равна 40...50%, поэтому хорошо куется, штампуется, прокатывается.

2 Классификация и маркировка углеродистых сталей

Каждая партия стали сопровождается документом (сертификатом), который удостоверяет соответствие стали заказу и требованиям государственных стандартов (ГОСТ) или технических условий (ТУ).

В сертификате должны содержаться следующие сведения: марка стали, ее химический состав; номер соответствующего стандарта (ГОСТ, ТУ); номер плавки и номер партии; результаты всех испытаний, предусмотренных стандартом; данные о группах и категориях стали по свойствам, по назначению, качеству поверхности и др.

По назначению углеродистые стали разделяют на конструкционные, инструментальные и специального назначения.

Конструкционные углеродистые стали по качеству бывают обыкновенного качества и качественные, *инструментальные* — качественные и высококачественные.

Стали углеродистые обыкновенного качества маркируют сочетанием букв «Ст» (сталь) и цифрой (0...6) (условный номер стали). С увеличением номера возрастает содержание углерода, повышаются прочностные характеристики и одновременно снижается пластичность. Для обозначения степени раскисления после номера марки ставятся индексы: кп — кипящая, пс — полуспокойная, сп — спокойная (например: Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп).

В обозначении марки качественной конструкционной стали две цифры указывают среднее содержание в ней углерода в сотых долях процента. Например, сталь 20 — (0,17...0,22% С) — ~ 0,2% С, сталь 45 — (0,42...0,5%) — ~ 0,45% С.

Степень раскисления в марках спокойных сталей не отражается, а в марках полуспокойных и кипящих сталей, как и сталей обыкновенного качества, обозначается буквами «пс» и «кп» соответственно. В качественных конструкционных сталях всех марок допускается содержание серы не более 0,040% и фосфора — не более 0,035%.

Для обозначения инструментальных углеродистых сталей используется буква У. Содержание углерода указывается в десятых долях процен-

та. Буква А, стоящая в конце марки стали, указывает, что сталь является высококачественной. Например, У7 — сталь инструментальная, углеродистая с содержанием углерода 0,7%; У13А — сталь инструментальная углеродистая, среднее содержание углерода 1,3%, высококачественная.

3 Назначение и применение углеродистых сталей

Углеродистые стали обыкновенного качества относятся к числу наиболее дешевых и широко применяемых. Из них получают до 70% всего проката — горячекатанного, сортового и фасонного, толсто- и тонколистового. Из этих сталей изготавливают трубы, поковки, штамповки, ленту, проволоку, металлические изделия (метизы): гвозди, канаты, сетки, болты, гайки, заклепки, а также мало- и средненагруженные детали, штифты, шайбы, шпонки, крышки, кожухи, а из стали номеров 4...6 — валы, винты, зубчатые колеса и шпиндели. Стали обыкновенного качества хорошо свариваются и обрабатываются резанием.

Из углеродистых качественных конструкционных сталей (ГОСТ 1050-88 Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия) производят прокат, поковки, калиброванную сталь, сталь «серебрянку», сортовую сталь, штамповки и слитки. Эти стали являются основным материалом для изготовления таких деталей машин, как валы, шпиндели, оси, зубчатые колеса, шпонки, муфты, фланцы, фрикционные диски, винты, гайки, упоры, тяги, цилиндры гидроприводов, эксцентрики, звездочки цепных передач, т. е. деталей различной степени нагружения. Они хорошо обрабатываются давлением и резанием, льются и свариваются, подвергаются термической, термомеханической и химико-термической обработке. Различные специальные виды обработки обеспечивают вязкость, упругость и твердость сталей, позволяют делать из них детали, вязкие в сердцевине и твердые снаружи, что резко увеличивает их износостойкость и надежность.

Качественные конструкционные стали обладают более высокими механическими свойствами, чем стали обыкновенного качества, за счет меньшего содержания в них фосфора, серы и неметаллических включений. Но они на 10...15% дороже сталей обыкновенного качества, поэтому используются преимущественно для изготовления более нагруженных деталей. По видам обработки их делят на горячекатан-

ную, кованую, калиброванную и «серебрянку» (со специальной отделкой поверхности).

Государственные стандарты предусматривают следующие марки качественных конструкционных сталей: 05кп, 08кп, 08пс, 08, 10кп, 10пс, 10, 11кп, 15кп, 15пс, 18кп, 20кп, 20пс, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 58 (55пп), 60. В марке стали 58 (55ПП) буквы обозначают пониженную прокаливаемость.

Из инструментальных углеродистых сталей (ГОСТ 1435-99 Прутки, полосы и мотки из инструментальной нелегированной стали. Общие технические условия) получают горячекатаную, кованую и калиброванную сталь, сталь «серебрянку», сталь для сердечников, а также слитки, листы, ленту, проволоку и другую продукцию. Из этих сталей изготавливают режущий инструмент, штампы для холодного деформирования.

В качественных инструментальных углеродистых сталях допускается содержание 0,03% серы и 0,035% фосфора, в высококачественных — 0,02% серы и 0,03% фосфора. Стали, полученные методом электрошлакового переплава, содержат до 0,015% серы.

Инструментальная сталь должна обладать высокой твердостью, значительно превышающей твердость обрабатываемого материала, износостойкостью и теплостойкостью (способностью сохранять свойства при высоких температурах). Измерительный инструмент, изготовленный из такой стали, должен быть твердым и длительное время сохранять заданные размеры и форму. Рабочие детали штампов и накатных роликов для холодного деформирования (вытяжки, гибки, высадки, пробивки отверстий, накатки, раскатки), сделанные из этой стали, должны иметь высокую твердость, обладать износостойкостью при достаточной вязкости. Все это достигается путем закалки с отпуском, а для измерительного инструмента и за счет искусственного старения.

Из стали У9 производят деревообрабатывающий режущий инструмент (сверла, фрезы, ножи) и ножовочные полотна для обработки стали. Металлорежущий инструмент (фасонные резцы, сверла, метчики, плашки, развертки, фрезы, напильники и ходовые винты прецизионных станков) изготавливают из сталей У10, У11 и У12, бритвенные ножи, лезвийный хирургический инструмент и напильники — из стали У13, слесарные молотки, зубила, губки тисков — из сталей У7 и У8, шаблоны, скобы, детали микрометрического инструмента, гладкие и резьбовые калибры, цанги, фрикционные диски, штампы, пружины и др. — из сталей У8, У9 и У10. Как правило, изготовлению инстру-

мента предшествуют отжиг на зернистый цемент, который способствует лучшей обрабатываемости резанием и уменьшает коробление деталей при закалке.

К углеродистым сталям специального назначения относятся ресурсно-пружинные, выпускаемые следующих марок: 65, 70, 75, 80, 85. Цифры показывают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Стали нелегированные для отливок 15Л, 20Л, ... , 55Л используются для изготовления литых деталей, в том числе коленчатых валов (40Л, 45Л). В марке цифры соответствуют среднему содержанию углерода в сотых долях процента, буква Л означает «сталь литейная».

Стали повышенной и высокой обрабатываемости резанием (автоматные) выпускаются следующих марок:

- углеродистые сернистые (0,15...0,30% S; 0,8...1,55% Mn) — А12, А20, А30, А35, А40, А40Г;

- свинцово-содержащие (0,04...0,10 % Pb) — АС40, АС35Г и др.;

- сернисто-селеновые с комплексным легированием S(0,09 %) и Se(0,07 %) — А35Е, А45Е и др.

В марке буква А указывает, что сталь автоматная, цифры после нее показывают содержание углерода в сотых долях процента, затем следуют буквы, соответствующие легирующему элементу, и цифры, показывающие его содержание. Введение серы или серы совместно с другими элементами (селен, свинец) приводит к образованию по границам зерен ферритно-перлитной структуры сульфидов марганца MnS и свинца или селенидов. Это облегчает резание, способствует дроблению и легкому отделению стружки, увеличивается срок службы режущего инструмента, улучшается качество обрабатываемой поверхности изделий. Из этих сталей изготавливают мелкие детали массового спроса: детали швейных, текстильных, счетных, пишущих машин; оси, валики, втулки, шестерни, винты, болты, гайки и другие детали, к которым предъявляются повышенные требования к шероховатости поверхностей и точности размеров. Автоматные стали по содержанию углерода являются доэвтектоидными.

II Экспериментальная часть

1. Изучить коллекцию углеродистых сталей.

2. Зарисовать схематично микроструктуры и определить твердость каждой марки стали.

3. Изучить влияние содержания углерода и цементита в исследуемых сталях на их свойства (например, на твердость, прочность), построить график соответствующей зависимости.

4. Установить связь между структурами сталей и диаграммой железо — цементит.

III Содержание отчета

1. Охарактеризовать левый нижний угол диаграммы железо — цементит и фазы, составляющие структуру стали.

2. Раскрыть назначение и маркировку углеродистых сталей.

3. Зарисовать рисунки микроструктур сталей с указанием структурных составляющих.

4. Определить содержание углерода и марки предложенных преподавателем сталей, указать их свойства и область применения.

5. Сделать вывод.

Контрольные вопросы

1. Структурные составляющие сталей и их свойства.
2. Классификация углеродистых сталей по структуре, по назначению и по качеству.
3. Маркировка углеродистых сталей.
4. Назначение и применение углеродистых сталей.
5. Связь структуры и марки стали с диаграммой состояния железо — цементит.
6. Как изменяются структура и свойства сталей с увеличением содержания углерода?
7. Маркировка углеродистых сталей обыкновенного качества.
8. Как определить приблизительное содержание углерода в доэвтектоидной стали по ее структуре?
9. Маркировка автоматных и литейных сталей, их назначение.
10. Какими свойствами характеризуется пластинчатый и зернистый перлит?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ЧУГУНОВ

Цель работы: изучить маркировку, свойства и применение чугунов, их микроструктуры.

Приборы и материалы: микроскоп МЕТАМ ЛВ, раствор для травления, спирт, фильтровальная бумага, вата, коллекция микрошлифов чугунов.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

I Основные теоретические сведения

1 Маркировка, свойства, структура чугунов. Применение чугунов

Чугунами называются сплавы железа с углеродом, содержащие углерода 2,14%...6,67%. В состав чугунов входят также кремний (1,2...3,5%), марганец (0,5...1,4%), сера (0,05...0,2%), фосфор (0,05...0,8%).

Чугун — важнейший литейный материал, широко применяющийся в металлургии и машиностроении. Около 68% отливок изготавливается из чугуна. Чугуны находят широкое применение в качестве конструкционного материала благодаря сочетанию высоких литейных свойств, достаточной прочности, износостойкости, а также невысокой стоимости. Чугуны отличаются низкой чувствительностью к качеству поверхности и надрезам. Благодаря этому присутствующие в любой отливке отверстия, углы, резкие переходы, раковины, поры, неметаллические включения сравнительно мало влияют на ее реальную конструкционную прочность. Другими преимуществами чугуна являются высокая прочность при сжатии, высокое значение предела выносливости при кручении (у высокопрочного чугуна даже на 20...30% больше, чем у стали), хорошие антифрикционные свойства (графит выполняет роль смазки).

Особенностью чугунов является возможность существования двух высокоуглеродистых фаз: графита (стабильная фаза) и цементита (Fe_3C) (метастабильная фаза).

Цементит (Ц) — это химическое соединение Fe_3C (карбид железа). В цементите 6,67% C. Характеризуется очень высокой твердостью (~ 800 НВ) и практически нулевой пластичностью, т. е. хрупкий. Цементит имеет сложную ромбоэдрическую кристаллическую решетку.

Графит (Г) — одна из двух (алмаз, графит) кристаллических модификаций углерода (100% C). Прочность и пластичность графита весьма низки. Кристаллическая структура гексагональная слоистая (рис. 5.1).

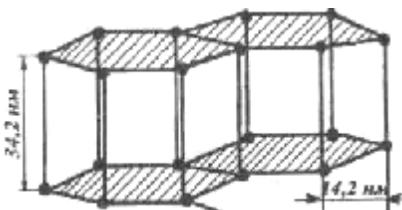


Рисунок 5.1 — Кристаллическая решетка графита

В чугунах встречается и менее устойчивая модификация графита — ромбическая. Из-за легкой подвижности слоев графит является наименее прочной и наименее пластичной фазой чугуна. Графит слабо электропроводен и химически стоек.

В зависимости от состояния углерода в чугуне различают:

– *белый чугун* (весь углерод находится в связанном состоянии в виде цементита);

– *серый чугун* (углерод в значительной степени или полностью находится в свободном состоянии в форме пластинчатого графита);

– *высокопрочный чугун* (углерод в значительной степени или полностью находится в свободном состоянии в форме шаровидного графита);

– *ковкий чугун* (углерод в значительной степени или полностью находится в свободном состоянии в форме хлопьевидного графита).

Примечание. В серых, ковких и высокопрочных чугунах та часть углерода, которая находится в связанном состоянии в виде цементита, входит в состав перлита — металлической основы чугуна.

Таким образом, чугун (кроме белого) отличается от стали наличием в структуре графитовых включений, а между собой чугуны различаются формой этих включений.

1.1 Белый чугун

Кристаллизация белых чугунов происходит в соответствии с метастабильной диаграммой железо — цементит (рис. 5.2) (сплошные линии при больших скоростях охлаждения расплавов).

При температуре 1147°C из металлической жидкости, содержащей 4,3% *C*, одновременно выделяется аустенит состава точки *E* и цементит. Образующаяся смесь этих фаз называется *ледебуритом*, а превращение *эвтектическим*: $L_C \rightarrow L_C (A_E + \text{Ц})$. При дальнейшем охлаждении концентрация углерода в аустените изменяется по линии *ES* вследствие выделения вторичного цементита и к моменту достижения температуры эвтектоидного превращения (727°C) принимает значение 0,8% *C*.

При температуре 727°C на линии *PSK* аустенит, находящийся как в структурно-свободном состоянии, так и входящий в состав ледебурита, претерпевает эвтектоидное превращение в перлит $A_S \rightarrow \text{П}_S (\text{Ф}_P + \text{Ц})$. По структуре белые чугуны разделяются:

– *доэвтектические*, содержащие до 4,3% углерода, со структурой ледебурит, перлит и цементит вторичный;

образованием графита хлопьевидной формы, и чугун наряду с высокой прочностью приобретает и удовлетворительную пластичность. Образующийся чугун называется *ковким*.

1.2 Ковкий чугун

Чугун с хлопьевидной формой графита называется *ковким*. Отжиг белого чугуна на ковкий обычно ведут по графику, показанному на рисунке 5.4.

Графит, образующийся в результате распада цементита, называют *углеродом отжига*.

Исходная структура доэвтектического чугуна состоит из перлита, ледебурита и цементита вторичного. При нагреве чугуна до температуры $950...1050^{\circ}\text{C}$ в сплаве протекает сначала превращение перлита в аустенит, а затем происходит растворение цементита вторичного в аустените. Во время длительной выдержки при указанных температурах цементит, являясь метастабильной фазой, распадается на аустенит и хлопьевидный графит.

Структура металлической основы чугуна зависит от режима охлаждения (рис. 5.5). Если после завершения графитизации провести охлаждение сразу до низких (комнатных) температур, то структура чугуна будет состоять из перлита и графита. Такой чугун называют *перлитным ковким чугуном*.

Если в температурном интервале $760...700^{\circ}\text{C}$ отливки охлаждать очень медленно ($3...5^{\circ}\text{C}$ в час), то происходит распад аустенита на феррит и графит, который наслаивается на уже имеющиеся хлопья. Медленное охлаждение можно заменить изотермической выдержкой при температурах $720...700^{\circ}\text{C}$, в результате которой происходит распад цементита, входящего в состав перлита, на феррит и графит. Такой режим отжига применяют чаще и называют второй стадией графитизации или второй стадией отжига. Структура чугуна после двухстадийного отжига состоит из феррита и графита, а чугун называют *ферритным ковким чугуном*. Если вторую стадию отжига сократить, то часть цементита, входящего в состав перлита, не распадется, и структура чугуна будет

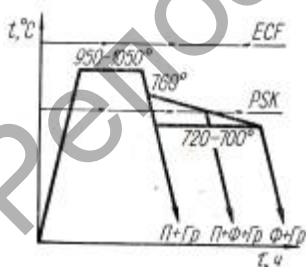


Рисунок 5.4 — График отжига белого доэвтектического чугуна на ковкий

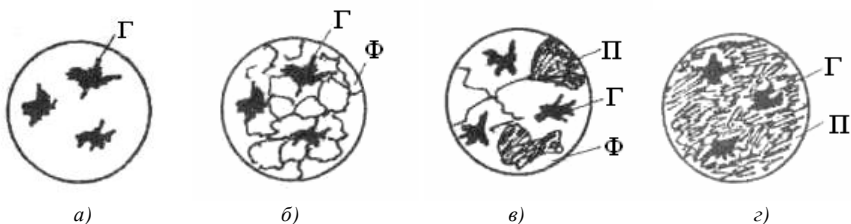


Рисунок 5.5 — Микроструктура ковких чугунов:
 а — хлопьевидный графит; б — ферритный чугун; в — ферритно-перлитный чугун;
 г — перлитный чугун

состоять из перлита, феррита и графита. Такой чугун называют *ферритно-перлитным ковким чугуном*; чем короче вторая стадия отжига, тем больше в структуре содержится перлита. Ферритный ковкий чугун характеризуется большей пластичностью, но меньшей прочностью, чем перлитный чугун. Для повышения пластичности перлитного чугуна с сохранением высокой прочности его подвергают сфероидизирующему (неполному) отжигу. Чугуны, подвергающиеся сфероидизирующему отжигу, содержат повышенное количество марганца (0,9...1,0%) или небольшие добавки хрома и никеля для предотвращения распада аустенита на феррит и графит. Ковкий чугун со структурой зернистого перлита обладает большей прочностью на разрыв ($\sigma_B = 400...600$ МПа), сравнительно хорошей пластичностью ($\delta = 10,0...4,0\%$), хорошей обрабатываемостью резанием, повышенными антифрикционными свойствами и более высокой, чем у серого и ковкого ферритного чугунов, коррозионной стойкостью.

Согласно ГОСТ 1215-79 имеются следующие марки ковкого чугуна:

- ферритные и ферритно-перлитные: КЧ30-6, КЧ33-10, КЧ37-12;
- перлитные: КЧ45-7, КЧ50-5, КЧ55-4, КЧ60-3, КЧ65-3, КЧ70-2, КЧ80-1,5, где буквы «КЧ» обозначают ковкий чугун,; цифры до дефиса — временное сопротивление разрыву в кгс / мм², а цифры после дефиса — относительное удлинение в %.

Ковкие чугуны нашли широкое применение в сельскохозяйственном, автомобильном и текстильном машиностроении, в судостроении, котло-, вагоно- и дизелестроении. Из них изготавливают башмаки, коробки, муфты, фланцы, головки, хомутики, ступицы, картеры редукторов, тормозные колодки, звездочки и звенья приводных цепей и другие детали.

Все указанные детали изготавливают тонкостенными. Они не должны иметь сечение более 50 мм, иначе в сердцевине при кристаллизации выделяется пластинчатый графит и чугун отжигать не имеет смысла.

В настоящее время выпуск ковкого чугуна сокращается и происходит замена его высокопрочным чугуном, так как себестоимость одной тонны годных отливок из высокопрочного чугуна ниже. Масса отливки из высокопрочного чугуна на 20...30% меньше.

1.3 Серый чугун

Серым чугуном называется чугун с пластинчатой формой графита. Содержание углерода в серых чугунах колеблется в пределах 2,2...3,7%. Чем выше концентрация углерода, тем больше выделений графита в чугуне и тем ниже его механические свойства. По этой причине его максимальное содержание ограничивается доэвтектической концентрацией. В то же время снижение содержания углерода отрицательно сказывается на жидкотекучести и, следовательно, на литейных свойствах. Нижний предел содержания углерода (2,2%) принимают для толстостенных отливок, верхний (3,7%) — для тонкостенных. Кристаллизация серого чугуна протекает в соответствии со стабильной диаграммой Fe — C (см. рис. 5.2) (пунктирные линии).

В системе железо — графит эвтектика образуется при температуре 1 153°C. Она содержит 4,26% C и состоит из аустенита и графита. Ее называют *графитной эвтектикой*.

В интервале температур 1 153...738°C из аустенита выделяется вторичный графит. При этом аустенит изменяет свой состав по линии $E'S'$ (см. рис. 5.2). Эвтектоидное превращение у сплавов в этой системе протекает при температуре 738°C, причем эвтектоидная точка (S') (см. рис. 5.2) соответствует содержанию 0,7% C. Эвтектоид в этом случае является смесью феррита и графита и называется *графитным*.

Таким образом, диаграмма состояния железо — графит принципиально не отличается от диаграммы железо — цементит, за исключением того, что во всех случаях из сплавов выделяется не цементит, а графит. Так как графитизация происходит в соответствии с рисунком 5.2 в узком температурном интервале, то для образования графитного зерна необходима малая скорость охлаждения и наличие примесей, способствующих графитизации.

Наиболее сильное влияние на графитизацию оказывает кремний, содержащийся в количестве 0,8...3%. Кристаллизации графита пластинчатой формы также способствуют микродобавки алюминия, кальция, меди, цезия.

Степень графитизации определяет характер металлической основы серого чугуна. В зависимости от того, какая часть углерода содержится в цементите, различают ферритные, феррито-перлитные и перлитные чугуны (рис. 5.6).

Значительное влияние на структуру чугуна также оказывают технологические факторы, главным из которых является скорость охлаждения. С уменьшением скорости охлаждения увеличивается количество графита. При выборе скорости охлаждения принимают во внимание толщину стенки отливки. Чем больше толщина стенки отливки, тем меньше скорость охлаждения и полнее протекает процесс графитизации.

Наличие пластинчатого графита всегда создает как бы внутренние надрезы, поэтому серый чугун характеризуется низкой прочностью и очень низкой пластичностью. Серый чугун обнаруживает заметные пластические деформации только в условиях сжатия (осадка 20...40%). При растяжении максимальные пластические деформации в момент разрушения не превышают 1...2%, так как разрушение происходит путем отрыва по выделениям графита. Чем мельче графитные пластины и чем больше они изолированы друг от друга, тем выше прочностные и пластические свойства чугуна при одной и той же металлической основе. Пластичность чугуна, в противоположность пластичности стали, может понижаться или возрастать с увеличением прочности: все зависит от того, за счет чего повышается прочность. Если увеличение прочности происходит за счет увеличения количества перлита и его измельчения,

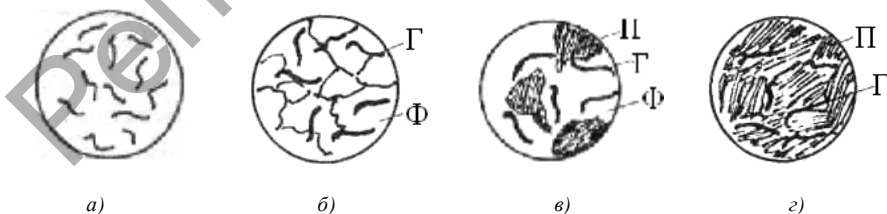


Рисунок 5.6 — Микроструктура серых чугунов:

a — пластинчатый графит; *б* — ферритный чугун; *в* — феррито-перлитный чугун; *з* — перлитный чугун

то пластичность уменьшается. Если увеличение прочности происходит за счет улучшения формы включений графита или уменьшения их количества, то увеличивается модуль упругости, пластичность повышается одновременно с прочностью. Сопротивление усталости у чугунов, как и у сталей, растет с увеличением статической прочности. Чем мельче графит и больше количество перлитной составляющей, тем больше предел выносливости. Таким образом, чугуны целесообразнее использовать для деталей, работающих в условиях сжатия и вибраций.

Номенклатура отливок из серого чугуна и их масса разнообразна: от деталей в несколько граммов (например, поршневые кольца двигателей) до отливок в 100 т и более (станины станков). Из серых чугунов изготавливают крышки, фланцы, маховики, корпуса редукторов, подшипников, насосов, а также блоки цилиндров, барабаны сцепления, станины станков, зубчатые колеса, шпиндели, поршни цилиндров, корпуса насосов и компрессоров и другие детали.

Согласно государственным стандартам предусматриваются следующие марки серого чугуна: СЧ10, СЧ15, СЧ20, СЧ25, СЧ30, СЧ35, СЧ40, СЧ45, (буквы «СЧ» обозначают серый чугун, а цифры — минимальное значение временного сопротивления при разрыве в МПа · 10⁻¹).

Примечание. Иногда в одной отливке можно встретить все структурные виды чугуна: ускоренно охлажденная зона имеет структуру белого чугуна, медленно охлажденная — структуру серого чугуна, а зона, кристаллизующаяся при средних скоростях охлаждения — структуру половинчатого чугуна. Такие чугуны называют *отбеленными*.

1.4 Высокопрочный чугун

Высокопрочным называют чугун, у которого графит имеет шаровидную, глобулярную форму. Чугуны с шаровидной формой графита получают модифицированием перед разливкой жидкого серого чугуна магнием в количестве 0,01...1,0% к весу металла или церием в количестве 0,03...0,08%. Большую часть высокопрочного чугуна производят сейчас с помощью Fe — Si — Mg лигатур с 3...10% Mg; такие лигатуры содержат до 11% Се и 0,2...4,0% Са. Совершенствование технологии процесса модифицирования — это один из методов улучшения качества высокопрочного чугуна. Чугун после модифицирования имеет следующий химический состав: 3,0...3,6% С, 1,1...2,9% Si, 0,3...0,7% Mn, до 0,02% S и до 0,1% P.

Высокопрочный чугун, получаемый в производственных условиях, как правило, не имеет 100%-й глобулярности графита. Увеличение доли нешаровидного графита в структуре чугуна снижает предел текучести, предел прочности при растяжении, относительное удлинение и модуль упругости.

По структуре металлической основы высокопрочный чугун может быть ферритным (допускается до 20% перлита) и перлитным (допускается до 20% феррита) (рис. 5.7).

Шаровидные включения графита являются меньшими концентраторами напряжений, чем пластинчатые, и поэтому меньше снижают механические свойства металлической основы. Металлическая основа является доминирующим фактором, определяющим величину ударной вязкости, в то время как изменение числа глобулярных включений графита не оказывает на нее влияние. Чем больше феррита и мельче перлит, тем выше ударная вязкость. Причем распределение феррита влияет на уровень ударной вязкости в большей степени, чем дисперсность перлита. Чугун с ферритной оторочкой вокруг шаровидного графита имеет более высокие показатели, чем чугун, в котором феррит распределен по границам зерен. Благоприятное влияние на ударную вязкость оказывает измельчение зерна феррита и увеличение чистоты границ зерен. Предел статической прочности увеличивается перлитной составляющей, но ферритный чугун обладает меньшей чувствительностью к надрезам, более высокой сопротивляемостью перегрузкам и большей эффективностью поверхностного упрочнения.

Примечание. Интересен факт, что предел текучести и относительное удлинение чугуна с шаровидным графитом выше, если заданная структура металлической основы получена за счет термообработки, а не в литом состоянии.

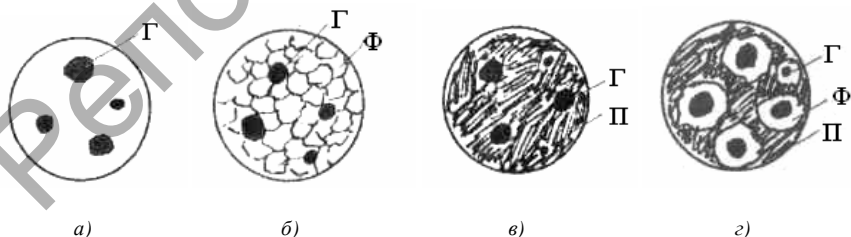


Рисунок 5.7 — Микроструктура высокопрочных чугунов:
 а — шаровидный графит; б — ферритный чугун; в — перлитный чугун;
 з — ферритно-перлитный чугун

Высокопрочный чугун эффективно заменяет сталь во многих изделиях. Из него изготавливают: прокатные валки, траверсы прессов, лопатки турбин, коленчатые валы, поршни, шестерни, звездочки, ступицы, кронштейны рессор, корпуса вентиля и т. д.

Согласно государственным стандартам высокопрочный чугун маркируется ВЧ35, ВЧ40, ВЧ45, ВЧ50, ВЧ60, ВЧ70, ВЧ80, ВЧ100 (буквы «ВЧ» обозначают высокопрочный чугун, а цифры — минимальное значение временного сопротивления при разрыве в МПа·10⁻¹).

II Экспериментальная часть

1. Изучить по нетравленной поверхности форму графитного зерна и определить, какой это чугун.

2. Определить после травления поверхности шлифа металлическую основу чугуна.

Перлит — темные зерна. Цементит первичный — крупные светлые пластины. Цементит вторичный частично виден в виде светлых выделений по границам зерен перлита, а частично сливается с цементитом ледебурита. Ледебурит — светлые поля цементита с равномерно расположенными на них темными перлитными участками.

III Содержание отчета

1. Изучить и составить краткий конспект основных теоретических данных о применении, свойствах и маркировке чугунов.

2. Зарисовать рисунки микроструктур чугунов из коллекции микрошлифов с указанием структурных составляющих.

3. Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Классификация чугунов по состоянию углерода, по форме графитного зерна и структуре металлической основы.

2. Маркировка и область применения белых, ковких, высокопрочных и серых чугунов.

3. Особенности получения белых, серых, ковких и высокопрочных чугунов.

4. Связь структуры чугуна с его свойствами.

5. Какой чугун рекомендуется для ответственных отливок (станины станков)?

6. Как получается в чугунах шаровидный графит?
7. Где используют высокопрочные чугуны с шаровидным графитом?
8. Для изготовления каких деталей используют ковкие чугуны?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6

СТРУКТУРЫ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ В НЕРАВНОВЕСНОМ СОСТОЯНИИ

Цель работы:

- 1) изучить влияние закалки и отпуска на структуру углеродистых сталей;
- 2) установить связь между структурой термически обработанных сталей и их твердостью.

Приборы и материалы: твердомер типа ТК, микроскоп МЕТАМ ЛВ, коллекция микрошлифов термически обработанных сталей, раствор для травления, спирт, фильтровальная бумага, вата.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

I Основные теоретические сведения

1 Влияние термической обработки (закалки и отпуска) на структуру углеродистых сталей

Современное машиностроение предъявляет высокие требования к конструкционным и инструментальным материалам. Хорошее сочетание свойств может быть получено в сталях. В связи с этим стали находят широкое применение для изготовления различных деталей и механизмов машин.

Свойства стали, особенно механические, зависят от химического состава и структуры стали. Желаемое изменение структуры и механических свойств достигаются термической обработкой.

Различные структуры стали формируются в процессе ее охлаждения из аустенитного состояния. Полнота фазовых превращений зависит от скорости охлаждения. При незначительных степенях переохлаждения аустенита (очень малые скорости охлаждения стали) образуются равновесные структуры сталей.

Распространенным видом упрочняющей термической обработки углеродистых сталей является комплексная обработка, сочетающая закалку

ку с последующим отпуском. Стали, подвергнутые закалке, имеют структуры неравновесного состояния. Последние являются продуктами превращения аустенита и образуются при различных степенях его переохлаждения.

Основными структурами неравновесного состояния углеродистой стали являются сорбит, троостит, бейнит и мартенсит. Структура и свойства сталей зависят от температуры превращения аустенита, которая понижается с увеличением скорости охлаждения стали.

Закалка сопровождается возникновением в изделиях значительных внутренних напряжений, которые могут вызвать коробление и даже трещины в закаленных изделиях. Внутренние напряжения снимаются в процессе отпуска. Поэтому закаленные детали и инструменты всегда подвергают отпуску. В процессе отпуска снимаются внутренние напряжения, из структур, полученных при закалке, образуются структуры отпуска (мартенсит, троостит и сорбит), которые отличаются по своему строению от аналогичных структур закалки.

Рассмотрим подробнее структуры углеродистых сталей, образующиеся при закалке, а затем при отпуске.

Получаемая структура стали зависит не только от скорости охлаждения аустенита, но и от температуры нагрева и химического состава стали.

Закалкой стали называется термическая операция, заключающаяся в нагреве стали до температуры выше критической точки A_{C_3} (доэвтектоидные

стали) или A_{C_1} (заэвтектоидные стали) на $30...50^\circ\text{C}$, выдержке при заданной температуре с последующим быстрым охлаждением, обеспечивающим получение неравновесной структуры (рис. 6.1).

Основная цель закалки стали — получение высокой твердости, прочности и износоустойчивости. Высокая твердость стали достигается переохлаждением аустенита до температуры ниже мартенситного превращения. В результате образуется перенасыщенный твердый раствор внедрения углерода в α -железе с тетрагональной кристаллической решеткой,

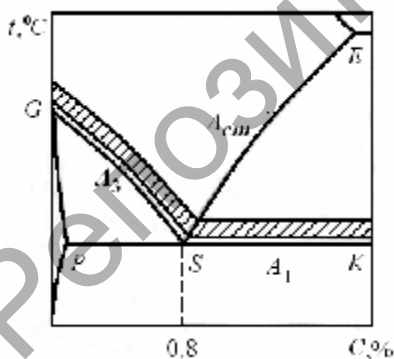


Рисунок 6.1 — Оптимальные температуры нагрева под закалку углеродистых сталей

называемый *мартенситом*. Содержание углерода в мартенсите вследствие отсутствия диффузионных процессов такое же, как в исходном аустените, т. е. в стали. При аустенитно-мартенситном превращении происходит перестройка решетки $Fe_\gamma C \rightarrow Fe_\alpha C$ без изменения состава фаз, т. е. без диффузионного перераспределения углерода.

Элементарная ячейка мартенсита является прямоугольным параллелепипедом, у которого соотношение параметров $c/a > 1$ (рис. 6.2). Образование тетрагональной решетки из кубической объясняется тем, что максимальная растворимость углерода в кубической решетке α -железа при комнатной температуре очень мала. Углерод, оказавшись в этой решетке в значительно большем количестве, искажает ее, способствуя увеличению параметра c и уменьшению a . Тетрагональность мартенсита c/a находится в прямой пропорциональной зависимости от содержания углерода в твердом растворе. С увеличением концентрации углерода в твердом растворе возрастает искаженность кубической решетки, что приводит к повышению твердости мартенсита.

Для превращения аустенита в мартенсит скорость охлаждения должна быть больше критической скорости закалки (кривая V_k , рис. 6.3). **Критической скоростью закалки** называется наименьшая скорость охлаждения, при которой весь аустенит переохлаждается до мартенситного превращения. Охлаждение углеродистой стали (от температуры закалки) со скоростью меньше критической не позволяет задержать распад аустенита до точки M_n . При медленном охлаждении углеродистой стали



Рисунок 6.2 — Элементарная кристаллическая ячейка тетрагонального мартенсита

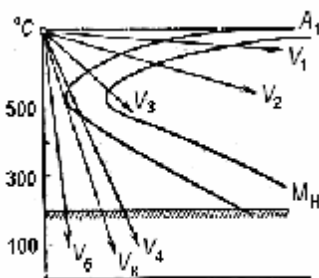


Рисунок 6.3 — Наложение кривых охлаждения на диаграмму изотермического аустенита

(например, в масле) аустенит при более высоких температурах распадается на феррито-цементитную смесь. Высокодисперсная феррито-цементитная смесь, образующаяся при распаде аустенита в интервале температур $600\dots 550^{\circ}\text{C}$ (V_3), называется **трооститом закалки**. Еще более медленное охлаждение стали (например, в струе холодного воздуха) вызывает в интервале температур $650\dots 600^{\circ}\text{C}$ (V_2) распад аустенита на более грубую, чем троостит, феррито-цементитную смесь пластинчатого строения, которая **называется сорбитом закалки**.

При еще большей скорости охлаждения (кривая V_4) не происходит полного распада аустенита на феррито-цементитную смесь, а часть его переохлаждается до точки M_n , в результате чего образуется структура, состоящая из троостита и мартенсита. При очень большой скорости охлаждения (кривая V_5) аустенит переохлаждается до температуры точки M_n и превращается в мартенсит.

Превращение аустенита в мартенсит сопровождается увеличением удельного объема, так как мартенсит имеет больший объем, чем аустенит. По мере образования мартенсита остающийся аустенит испытывает всестороннее сжатие, которое препятствует этому превращению. По окончании превращения в структуре закаленной стали наряду с мартенситом всегда присутствует аустенит, который называется *остаточным*. Количество последнего определяется положением температурного интервала мартенситного превращения. Значения температур начала и конца мартенситного превращения (M_n и M_k) зависят от химического состава стали.

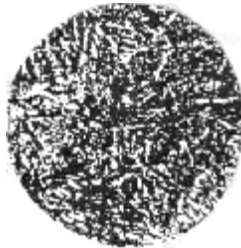
С увеличением содержания углерода снижается интервал мартенситного превращения стали. У сталей с концентрацией углерода более 0,60% линия конца мартенситного превращения находится в области отрицательных температур. Следовательно, охлаждение при закалке до комнатной температуры фиксирует повышенное количество остаточного аустенита в закаленной стали. Закалка на мартенсит обеспечивается охлаждением углеродистых сталей в воде со скоростью выше критической. По мере уменьшения скорости охлаждения твердость стали уменьшается.

В доэвтектоидных сталях после закалки от оптимальной температуры мартенсит имеет мелкокристаллическое строение (рис. 6.4, б), а остаточный аустенит при сравнительно небольших увеличениях металлографическим анализом не обнаруживается, так как его количество незначительно.

Заэвтектоидные углеродистые стали, подвергнутые неполной закалке, имеют структуру мелкоигольчатого мартенсита с равномерно



a)



б)

Рисунок 6.4 — Микроструктура:
a — крупноигльчатый мартенсит и остаточный аустенит;
б — мелкокристаллический мартенсит

распределенными зернами избыточного цементита. Повышение температуры закалки выше $A_{C_{ст}}$ способствует растворению цементита вторичного и росту аустенитного зерна. В структуре закаленной стали отчетливо видны крупные иглы мартенсита на светлом фоне остаточного аустенита (рис. 6.4, *a*), количество которого возрастает до 20...30%.

Мартенсит закалки (слабо травящаяся структурная составляющая) имеет высокую твердость 55...65HRC.

Структура закаленной стали, состоящая из мартенсита и остаточного аустенита, является неустойчивой. Нагрев стали при отпуске облегчает переход из метастабильного состояния перенасыщенного α -твердого раствора в более устойчивое. При отпуске с повышением температуры в закаленной стали происходит выделение углерода из мартенсита, что сопровождается уменьшением тетрагональности кристаллической решетки, образованием и коагуляцией частичек цементита. В зависимости от температуры нагрева в процессе отпуска формируются следующие структуры: отпущенного мартенсита, троостита и сорбита отпуска, при этом соответственно изменяются механические свойства стали.

При нагреве закаленной стали до температур 150...250°C (*низкий отпуск*) образуется структура кубического (отпущенного) мартенсита. При низком отпуске сохраняется высокая твердость 54...64HRC, снижаются внутренние напряжения и несколько повышается вязкость стали.

Структура стали после отпуска — отпущенный мартенсит.

В результате нагрева закаленной стали до температур 300...400°C (*средний отпуск*) образуется троостит отпуска, с твердостью

36...45HRC, обеспечивающий максимальный предел упругости при достаточном пределе прочности. Этот вид отпуска чаще всего применяют при изготовлении рессор, пружин и штампов.

Структура стали после такого отпуска — троостит (рис. 6.5).

При нагреве закаленной стали до температур 500...650°C (*высокий отпуск*) образуется сорбит отпуска с твердостью 25...35HRC. Сталь обладает наилучшим комплексом механических свойств и высокой конструктивной прочностью. Применяется для деталей, от которых требуется определенное сочетание прочности, ударной вязкости и твердости.

Термическую операцию — закалку с высоким отпуском — называют *улучшением*. Структура стали в улучшенном состоянии — сорбит.

Таким образом, при переохлаждении аустенита по мере увеличения скорости охлаждения образуются сорбит, троостит пластинчатого строения и мартенсит закалки, а при распаде мартенсита с увеличением температуры отпуска формируются мартенсит кубический, троостит и сорбит зернистого строения.

II Экспериментальная часть

1. Изучить микроструктуры углеродистых сталей в неравновесном состоянии на образцах, подвергнутых термической обработке.

2. Установить связь между структурой термически обработанных сталей и диаграммами изотермического распада аустенита. Провести анализ характерных особенностей микроструктур углеродистых сталей после закалки и различных видов отпуска.



Рисунок 6.5 — Микроструктуры:

a — троостита отпуска; *б* — сорбита отпуска; *в* — после закалки (мартенсит + троостит)

III Содержание отчета

1. Изучить и составить краткий конспект основных теоретических положений о влиянии термической обработки на структуру углеродистых сталей.

2. Вычертить часть диаграммы состояния системы железо — цементит и нанести температурные интервалы нагрева изучаемых сталей для различных видов термической обработки.

3. Зарисовать микроструктуры термически обработанных сталей с указанием фаз, структурных составляющих и твердости.

4. В случае отличия наблюдаемой структуры от ожидаемой дать пояснение происходящего.

5. Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Что называется закалкой?
2. С какой скоростью охлаждают сталь для превращения аустенита в мартенсит?
3. Что называется критической скоростью закалики?
4. Что называется мартенситом?
5. Какие структуры можно получить после закалки? Какое строение они имеют?
6. Назовите виды отпуска и температуры нагрева для каждого вида.
7. Чем отличаются структуры, образующиеся в результате распада аустенита, от структур, полученных при распаде мартенсита?
8. Чем достигается изменение структуры стали?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7

ИСПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЛИТОЙ И ПЕРЕГРЕТОЙ СТАЛИ

Цель работы:

- 1) изучить микроструктуры литой, перегретой и горячекатаной сталей;
- 2) приобрести практические навыки исправления их структуры;
- 3) изучить структуру и характер излома исправленной стали.

Приборы и материалы: твердомер типа ТШ, микроскоп МЕТАМ ЛВ, коллекция микрошлифов, раствор для травления, фильтровальная бумага, вата.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

I Основные теоретические сведения

1 Влияние режимов термической обработки на формирование структуры стали

Свойства стальных изделий зависят от размера действительного зерна аустенита, т. е. зерна, полученного в стали после литья или термической обработки. Крупное зерно аустенита отрицательно влияет на механические и некоторые технологические свойства стали. Размер зерна сильно воздействует на ударную вязкость стали. С ростом зерна ударная вязкость стали резко снижается, повышается порог ее хладноломкости, возрастает хрупкость. При закалке стали с крупным зерном возникают большие внутренние напряжения, которые могут вызвать трещины, коробление или снижение прочности изделий.

Крупные зерна чаще всего встречаются в литой стали, где величина зерна может достигать до нескольких сантиметров. Это получается при формировании зерна аустенита литой стали в процессе кристаллизации из жидкого состояния. Перегрев жидкого металла и малые скорости охлаждения при кристаллизации способствуют образованию крупных зерен.

Крупные зерна образуются также при продолжительном нагреве сталей до температур, значительно превышающих (на 200...300°C) A_{C_3} и $A_{C_{ct}}$, и сохраняются после охлаждения до комнатных температур. Перегрев возможен, когда металл нагревают до очень высоких температур в области аустенита и дают длительную выдержку (цементация, диффузионный отжиг, нагрев под горячую пластическую деформацию).

Согласно второму закону термодинамики, всякое тело стремится к наименьшему запасу поверхностной энергии. Мелкие зерна обладают большим запасом свободной энергии, чем крупные, поэтому они термодинамически неустойчивы и при подходящих условиях стремятся вырасти в крупные зерна за счет более мелких. Перемещение границ происходит путем диффузионного перехода атомов из одного зерна (убывающего) через границу в другое зерно (растущее).

Микроструктура перегретой стали имеет своеобразную форму выделения избыточных фаз феррита или цементита. Феррит и цементит в таких сталях выделяются в виде длинных игл (пластин), прорезающих зерно перлита. Такая структура называется *видманитеттовой* (рис. 7.1).

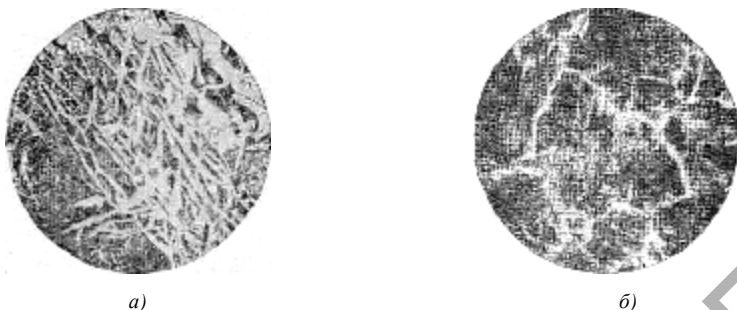


Рисунок 7.1 — Микроструктура перегретой стали (видманштеттовая):
a — доэвтектоидная сталь; *б* — заэвтектоидная сталь

Сталь, имеющая видманштеттовую структуру, обладает очень низкими пластическими и вязкими свойствами, т. е. склонна к хрупкому разрушению. Излом перегретой стали камневидный с характерным грубозернистым бугорчатым строением (рис. 7.2).

В горячекатаной стали иногда наблюдается строчечное расположение феррита и перлита (полосчатая структура), что обуславливает значительную анизотропию свойств. Размер зерна аустенита, получающийся после горячей обработки давлением, определяется температурой окончания обработки. Если температура окончания обработки давлением (окончание проката) лежит в межкуритическом интервале температур, между A_1 и A_3 (т. е. при низких температурах) возникает полосчатая структура (рис. 7.3).

Горячекатаная сталь с полосчатой структурой имеет худшие свойства прочности, пластичности и вязкости. Перечисленные недостатки литой, перегретой и горячекатаной сталей могут быть устранены термической обработкой. Для исправления структуры и улучшения механических

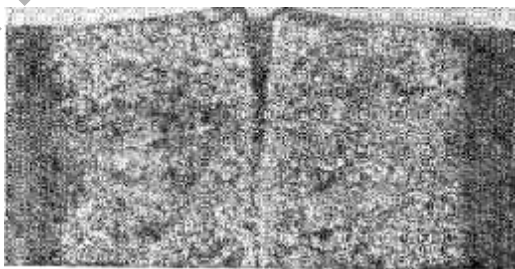


Рисунок 7.2 — Излом перегретой стали

свойств используют отжиг, нормализацию, нормализацию с высоким отпусксом, улучшение.

Что же происходит при нагреве перегретой доэвтектоидной стали?

При нагреве до температуры точки A_{C1} , т. е. до 727°C , за счет растворения цементита третичного происходит постепенное обогащение феррита углеродом, максимальная растворимость которого достигает 0,02%.

При температуре 727°C , соответствующей линии PSK (точка A_{C1}), в местах контакта фаз феррита и цементита образуется новая фаза — аустенит. Этот процесс происходит при возникновении центров кристаллизации и последующем росте зародышей кристаллов. В процессе фазовой перекристаллизации перлита образуется мелкозернистый аустенит. В процессе превращения имеет место трехфазное равновесие — феррит, цементит и аустенит. Процесс образования аустенита заканчивается полным исчезновением перлита (см. рис. 3.1).

При дальнейшем нагреве от температуры A_{C1} до A_{C3} (между линиями PSK и GS) избыточный феррит превращается в аустенит. В точке A_{C3} этот процесс заканчивается, образуется мелкозернистый аустенит по всему объему стали (рис. 7.4).

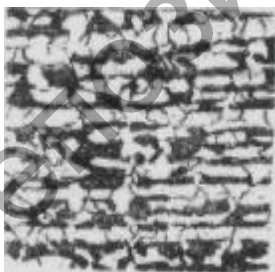


Рисунок 7.3 — Полосчатая феррито-перлитная структура: чередование ферритных и перлитных полос

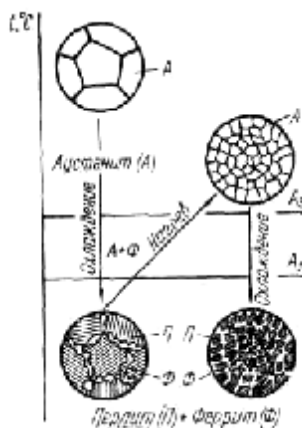


Рисунок 7.4 — Схема измельчения зерна аустенита при фазовой перекристаллизации

Для исправления структуры крупнозернистой доэвтектоидной стали, ее нагревают на 30...50°С выше температуры точки A_{C_3} и после выдержки медленно охлаждают (на воздухе), т. е. проводят нормализацию. При медленном охлаждении мелкозернистый аустенит превращается в ферритно-перлитную структуру, сохраняющую мелкое зерно (рис. 7.5). После термической обработки (нормализации) излом получается мелкозернистым, и следы перегрева исчезают.

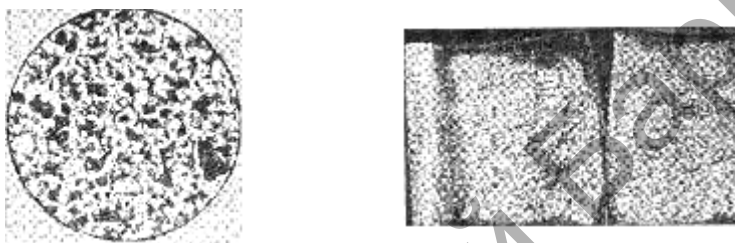


Рисунок 7.5— Микроструктура и излом стали после исправления нормализацией

Иногда нагрев, превышающий температуру точки A_{C_3} , не исправляет полностью последствий сильного перегрева.

Устойчивый перегрев устраняется многократной термической обработкой (двойной нормализацией, нормализацией и высоким отпуском, улучшением и т. д.).

II Экспериментальная часть

1. Изучить особенности микроструктуры и характер излома перегретой стали; приобрести навыки устранения крупнозернистой и полосчатой микроструктуры.

2. Изучить микроструктуры и изломы стали после исправления определенной термической обработкой.

III Содержание отчета

1. Изучить и составить краткий конспект основных теоретических положений влияния режимов термической обработки на формирование структуры стали.
2. Изучить и зарисовать изломы перегретой и литой сталей.
3. Провести микроанализ литой и перегретой сталей, определить величину зерна и зарисовать их микроструктуры.
4. Изучить и зарисовать полосчатую микроструктуру стали.
5. Изучить и зарисовать изломы, микроструктуры исправленных сталей, определить размер их зерна.
6. Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. На какие свойства стали влияет величина зерна?
2. Как называется микроструктура перегретой стали?
3. Что происходит при нагреве перегретой доэвтектоидной стали?
4. Чем удаляются недостатки литой, перегретой и горячекатаной сталей?
5. Какой термической обработкой можно устранить устойчивый перегрев?
6. Какая термическая обработка называется отжигом?
7. Что такое нормализация?
8. Чем отличаются процессы отжиг и нормализация?
9. Что такое улучшение?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8 ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ

Цель работы: изучить технологический процесс химико-термической обработки стали, микроструктуру и свойства диффузионных слоев.

Приборы и материалы: твердомеры типа ТК и ТШ, микроскоп МЕТАМ ЛВ, образцы после цементации и азотирования, раствор для травления, спирт, фильтровальная бумага, вата.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

I Основные теоретические сведения

1 Виды химико-термической обработки. Способы проведения процессов, их особенности

Поверхностное упрочнение деталей можно осуществить химико-термической обработкой (ХТО), при которой происходит диффузионное насыщение поверхностного слоя при высокой температуре соответствующим элементом или комплексом элементов.

Любой вид ХТО состоит из трех этапов:

- 1) диссоциации, т. е. выделения насыщающего элемента в атомарном состоянии;
- 2) адсорбции, т. е. поглощения активных атомов на поверхности насыщаемого металла;
- 3) диффузии, т. е. проникновения активных атомов в насыщаемый металл.

В промышленности применяются следующие виды химико-термической обработки: цементация, азотирование, нитроцементация, цианирование, диффузионная металлизация.

В массовом производстве широко применяют газовую цементацию, преимущества которой состоят в высокой производительности и возможности проведения термической обработки с цементационного нагрева.

Цементацией называется процесс насыщения поверхности стальных деталей углеродом. Цель цементации — получение на поверхности детали высокой твердости и износостойкости в сочетании с вязкой сердцевиной.

Диффузия углерода в сталь возможна, если углерод находится в атомарном состоянии, получаемом, например, диссоциацией газов, содержащих углерод ($2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}_{\text{ат}}$, или $\text{CH}_4 \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{C}_{\text{ат}}$ и др.). Атомарный углерод адсорбируется поверхностью стали, затем диффундирует в глубь нее. Цементация производится при температуре выше точки A_{C_3} , когда сталь находится в аустенитном состоянии, обычно при температуре 930...950°C.

Для цементации используют как углеродистые, так и легированные стали (например, стали марок 10, 20, 20X, 20XH, 12XH3A, 18XГТ, 18X2H4 и др.) с содержанием углерода 0,1...0,25%. Концентрация углерода в поверхностном слое достигается 0,8...1,0%.

Цементованный слой состоит из трех зон (рис. 8.1). *Первая зона* (от поверхности детали) — заэвтектоидная — содержит 1,2...0,90% углерода и состоит из перлита и тонкой сетки цементита вторичного; *вторая* — эвтектоидная — содержит 0,80% углерода и состоит из перлита; *третья* — доэвтектоидная — содержит менее 0,80% углерода и состоит из перлита и феррита. Третью зону обычно называют переходной. Глубиной цементованного слоя считают сумму заэвтектоидной, эвтектоидной и половину переходной (доэвтектоидной) зон до слоя, содержащего 0,4% углерода.

Для получения заданной концентрации углерода в поверхностном слое и светлой поверхности деталей применяется эндотермический газ (сокращенно эндогаз). Контролируемая эндотермическая атмосфера получается частичным сжиганием природного газа или другого газообразного углеводорода в специальном генераторе. Химизм процесса газовой цементации сводится в основном к диссоциации метана ($\text{CH}_4 \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{C}_{\text{ат}}$) и окиси углерода ($2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}_{\text{ат}}$).

Газовую цементацию проводят в шахтных газовых печах. Изделия в печь загружают на специальных подвесках и приспособлениях, которые помещают в реторте. Затем осуществляется нагрев стальных деталей в

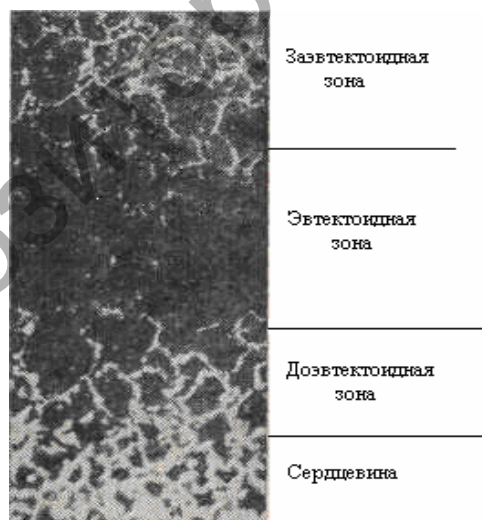


Рисунок 8.1 — Микроструктура цементованного слоя

среде углеродсодержащих газов. Заданную концентрацию углерода в поверхностном слое получают автоматическим регулированием состава газа. Скорость газовой цементации при температуре 930...950°C составляет 0,12...0,15 мм / ч. Для получения науглероженного слоя толщиной около 1 мм при газовой цементации требуется шесть — семь часов.

Для получения необходимых свойств детали после цементации подвергают термической обработке.

Целью термической обработки является упрочнение поверхности с одновременным измельчением зерна и получением вязкой сердцевины. В зависимости от назначения детали применяют различные варианты термической обработки.

Менее ответственные детали подвергают закалке непосредственно с цементационного нагрева. После газовой цементации наследственно мелкозернистых сталей применяют закалку непосредственно из цементационной печи после подстуживания до температуры 840...860°C с целью уменьшения коробления обрабатываемых изделий.

При более высоких требованиях к структуре детали после цементации подвергают охлаждению на воздухе и однократной закалке с нагревом выше A_{C_3} .

Особо ответственные детали после цементации подвергают охлаждению на воздухе и двойной закалке. При первой закалке или нормализации с температуры на 30...50°C выше A_{C_3} происходит перекристаллизация сердцевины детали и растворение цементитной сетки в поверхностном слое. Вторую закалку проводят с температуры 760...780°C для получения мелкого зерна в поверхностном слое и придания ему высокой твердости.

Во всех случаях после закалки производят низкий отпуск при температуре 160...200°C.

Структура цементованного слоя после термической обработки состоит из мелкоигльчатого мартенсита (иногда с включениями избыточных карбидов в виде глобулей и остаточного аустенита).

Твердость поверхностного слоя после термической обработки составляет 57...64HRC. Твердость сердцевины в зависимости от химического состава стали составляет 20...40HRC.

Азотирование — это процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали азотом при температурах 500...650°C в среде аммиака. Процесс применяют для повышения твердости поверхностного слоя, его износостойкости, предела выносливости и сопротивления

коррозии. Ему предшествует термическая обработка — улучшение (закалка и высокий отпуск) и полная механическая обработка.

Азотирование деталей производится в электропечах с закрывающимися муфелями. Детали помещают на сетках или в корзинах в холодный муфель. Печь постепенно нагревают до температуры процесса и одновременно подают аммиак. Аммиак при 400...450°C диссоциирует с выделением атомарного азота ($2\text{NH}_3 \rightarrow 3\text{H}_2 + 2\text{N}_{\text{ат}}$). Атомарный азот диффундирует в сталь, образуя в ней твердые растворы и химические соединения (нитриды).

Углеродистые и низколегированные стали азотируют для повышения коррозионной стойкости, высоколегированные — для повышения твердости, износостойкости, предела выносливости.

Простая углеродистая сталь малоприспособна для азотирования: ее поверхность получается недостаточно твердой (около 200HV) и вместе с тем хрупкой. Для азотирования чаще применяют стали, легированные алюминием, хромом и молибденом. В сталях марок 38X2MЮА, 35ХМА, 38ХН3МФА легирующие элементы обеспечивают образование устойчивых дисперсных нитридов (Fe_2N , VN, MoN, AlN, CrN и др.), создающих высокую твердость на поверхности после азотирования (около 1 200HV). Молибден устраняет отпускную хрупкость, которая может возникнуть вследствие длительного нагрева стали при температуре 500°C во время азотирования. Длительность процесса зависит от требуемой толщины азотированного слоя.

Скорость азотирования составляет около 0,01 мм / ч. Поэтому глубину слоя 0,3...0,6 мм можно получить в течение длительного времени (до 60 ч). Для ускорения процесса азотирования применяют двухступенчатый процесс: сначала азотирование проводят при 500...520°C, а затем при 540...560°C. При двухступенчатом азотировании сокращается продолжительность процесса, при этом сохраняется высокая твердость азотированного слоя. Охлаждение после азотирования производят вместе с печью в потоке аммиака во избежание окисления поверхности.

Структура азотированного слоя показана на рисунке 8.2. Светлая составляющая на поверхности — ϵ -фаза (Fe_2N), ниже — γ' -фаза, за ней — эвтектоид ($\alpha + \gamma'$) и α -фаза.

Азотирование имеет ряд преимуществ перед цементацией: твердость и износостойчивость азотированного слоя выше, чем цементованного, и сохраняется при нагреве до высоких температур (550...600°C), меньшая температура проведения процесса и меньше деформации. Недостатками

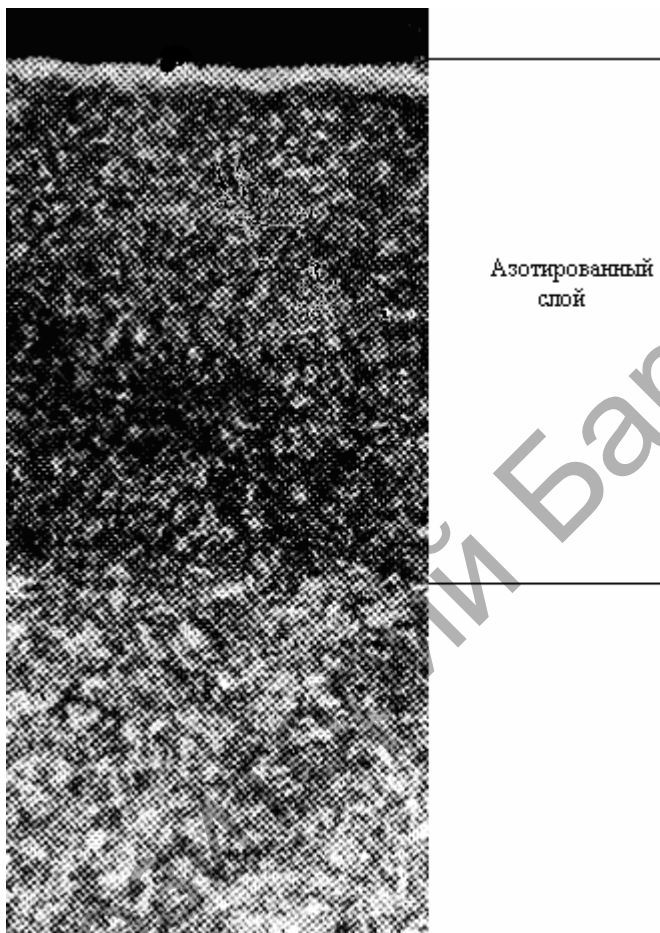


Рисунок 8.2 — Микроструктура азотированного слоя стали 38X2MЮA

являются большая продолжительность процесса и небольшая толщина получаемого слоя (не более 0,8 мм).

Нитроцементацией называется процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом в газовой среде, состоящей из науглероживающего газа и аммиака. Температура проведения процесса составляет 850...870°С, продолжительность — 4—10 ч, оптимальное содержание азота в слое — около 0,15%,

углерода — 1,4%. Толщина нитроцементованного слоя обычно составляет 0,2...0,8 мм. Основное назначение нитроцементации — повышение твердости, износостойкости, коррозионной стойкости. Нитроцементации подвергают детали сложной конфигурации (зубчатые колеса, втулки, валы и др.).

После нитроцементации следует закалка либо непосредственно из печи с подстуживанием до 800...825°C, либо после повторного нагрева. После закалки проводят отпуск при температуре 160...180°C.

Микроструктура слоя — мелкокристаллический мартенсит, небольшое количество мелких равномерно распределенных карбонитридов и 25...30% остаточного аустенита (рис. 8.3). Твердость — 58...62HRC.

Цианирование — процесс поверхностного насыщения стали углеродом и азотом в расплавленных солях, содержащих цианистые соли NaCN или KCN.

При цианировании детали нагревают в расплавленных солях, содержащих цианистый натрий NaCN, при температуре 820...900°C. Для получения небольшой толщины слоя (0,15...0,35мм) цианирование ведут при температуре 820...860°C с выдержкой 30...90 минут в цианистых ваннах. При нагреве ванны с цианистым натрием происходят реакции, в результате которых образуются атомарный азот и углерод, диффундирующие в сталь. Цианированный слой содержит 0,6...0,7%С и 0,8—1,2%N. После цианирования детали закаливают непосредственно из цианистой ванны и затем подвергают низкому отпуску (180...200°C).

Для получения слоя толщиной от 0,5...2,0 мм цианирование ведут при температуре 930—960°C с выдержкой 1,5...6 ч в цианистой ванне,

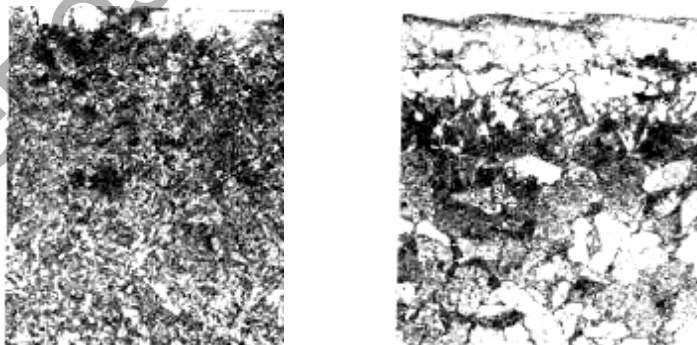


Рисунок 8.3 — Микроструктура нитроцементованного слоя стали

содержащей 8% NaCN, 10% NaCl, 82% BaCl₂ (рабочий состав ванны). При нагреве в ванне происходят реакции, образуются атомарный углерод и азот, которые диффундируют в сталь. В данном случае цианированный слой содержит 0,8...1,2% С и 0,2...0,3% N. Детали после цианирования охлаждают на воздухе, а затем проводят закалку и низкий отпуск. Твердость цианированного слоя после термической обработки составляет 58...62HRC.

Нитроцементация деталей имеет следующие преимущества: по сравнению с газовой цементацией — более низкая температура процесса (850...870°С), меньшая его продолжительность, большая износостойкость деталей, меньше коробление деталей; по сравнению с цианированием — безвредность процесса, возможность регулирования насыщения слоя азотом и углеродом путем изменения количества подачи в печь аммиака и науглероживающего газа.

Борированием называют процесс химико-термической обработки, представляющий собой диффузионное насыщение поверхностного слоя стали бором при нагреве в соответствующей среде. Целью борирования является получение высокой твердости, сопротивления абразивному износу, коррозионной стойкости, теплостойкости и жаростойкости поверхности стальных деталей.

Из способов борирования практически применяются жидкостное электролизное и газовое. При жидкостном электролизном борировании в тигель с расплавленной бурой (температура 950°С) помещают графитовый стержень (анод) и обрабатываемую деталь (катод). Бура разлагается, и образующийся атомарный бор диффундирует в поверхность обрабатываемой детали. Газовое борирование осуществляют в газовой смеси, состоящей из диборана (B₂H₆) и водорода, при температуре 850...900°С.

Диффузионный слой состоит из боридов FeB и Fe₂B (рис. 8.4). Толщина слоя равна 0,1...0,2мм. Борированный слой обладает высокой твердостью (1 800...2 000HV), износостойкостью (главным образом, абразивной), коррозионной стойкостью, окалиностойкостью (до 800°С) и теплостойкостью. Борированию можно подвергать любые стали.

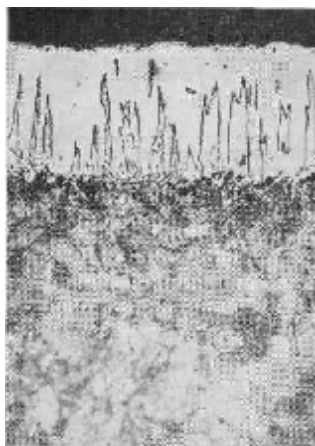


Рисунок 8.4 — Микроструктура борированного слоя

Диффузионное насыщение металлами, или диффузионную металлизацию, проводят с целью упрочнения или придания особых физико-химических свойств поверхностному слою детали. Наиболее распространенными способами являются алитирование, хромирование, силицирование.

Алитированием называют диффузионное насыщение поверхностного слоя стали алюминием при нагреве в соответствующей среде. Целью алитирования является получение высокой жаростойкости поверхности стальных деталей. При алитировании алюминий диффундирует в сталь и образует твердый раствор с железом. Поверхность алитированной стали окисляется с образованием плотной пленки окиси алюминия, которая и предохраняет от окисления при высоких температурах основной металл. Алитирование обычно проводят в твердых и жидких средах.

При алитировании в твердой среде детали помещают в стальной ящик со смесью, состоящей из 49% порошка алюминия или ферроалюминия, 49% глинозема (окиси алюминия) и 2% хлористого аммония NH_4Cl . При нагреве до температуры $950...1050^\circ\text{C}$ в ящике, в связи с взаимодействием алюминия и хлористого аммония, образуется хлористый алюминий AlCl_3 , разлагающийся с образованием атомарного алюминия, который и диффундирует в сталь. После выдержки при 950°C в течение 3...12 ч толщина слоя, насыщенного алюминием, составляет 0,3...0,5 мм.

При жидкостном алитировании детали нагревают при температуре $750...800^\circ\text{C}$ в ванне с расплавленным алюминием, содержащим 6...8% Fe, которое добавляется в ванну с целью предохранения деталей от растворения в расплавленном алюминии. После выдержки в течение 45...90 минут, получается слой толщиной 0,20...0,35 мм.

Хромированием называют диффузионное насыщение поверхностного слоя стали хромом при нагреве в соответствующей среде. Целью хромирования является получение высокой твердости, износостойкости, жаростойкости и коррозионной стойкости среднеуглеродистых сталей. Сущность происходящих процессов аналогична алитированию. Разница заключается только в том, что при хромировании в твердой среде источником насыщения хромом служит хром или феррохром, образующий хлорид хрома CrCl_2 . Газовое хромирование проводят в ретортах в газовой среде при разложении паров хлорида хрома. Жидкостное хромирование проводят путем нагрева деталей в ванне, состоящей из солей BaCl_2 и NaCl , в которую добавляют 10...15% хлорида хрома. Температура хромирования составляет $900...1100^\circ\text{C}$, время проведения

процесса 6...12 ч. Получаемая толщина слоя 0,1...0,3 мм. Твердость хромированного слоя низкоуглеродистой стали — 200...250HV, а средне- и высокоуглеродистой — 1200...1300HV.

Силицированием называют диффузионное насыщение поверхностного слоя стали кремнием при нагреве в соответствующей среде. Целью силицирования является получение коррозионной стойкости и жаростойкости поверхности стальных деталей. Силицирование проводят обычно в газовой среде, в ретортах, при разложении паров хлорида кремния SiCl_4 . Газовое силицирование проводят при температуре 950...1050°C с выдержкой 2...5 ч с получением слоя толщиной 0,3...1,0 мм. Структура поверхностного слоя состоит из твердого раствора кремния в α -железе. Твердость силицированного слоя составляет 200...300HV, жаростойкость до 700...750°C. Силицированные детали устойчивы в кислотах (азотной, серной и соляной).

II Экспериментальная часть

1. Получить у преподавателя коллекцию микрошлифов после цементации и азотирования.
2. Определить глубину цементованного слоя и каждой его зоны.
3. Изучить микроструктуру цементованных образцов после термической обработки, измерить их твердость.
4. Определить глубину азотированного слоя на образце, измерить его твердость.

III Содержание отчета

1. Изучить и составить краткий конспект основных теоретических положений о влиянии химико-термической обработки на структуру и свойства сталей.
2. Зарисовать микроструктуру цементованного слоя и указать его зоны.
3. Определить глубину цементованного слоя и каждой его зоны.
4. Произвести металлографический анализ образцов после цементации и термической обработки, зарисовать микроструктуру.
5. Замерить твердость образцов после термообработки на твердометре Роквелла.
6. Определить на образце глубину азотированного слоя, зарисовать его микроструктуру.

7. Замерить твердость образцов после азотирования на твердомере Виккерса.
8. Сделать вывод.

Контрольные вопросы

1. Что такое химико-термическая обработка? Назовите ее виды.
2. Из каких этапов состоит любой вид ХТО?
3. Какие превращения происходят в стали при цементации?
4. Какое содержание углерода в цементованном слое? Как изменяется концентрация углерода в цементованном слое по направлению к сердцевине?
5. Почему после цементации производят термическую обработку? Какую структуру приобретает сталь после цементации и термической обработки?
6. Какая твердость поверхностного слоя после цементации и термической обработки?
7. Какие стали подвергают цементации?
8. При каких температурах проводится процесс цементации?
9. Какие стали подвергают азотированию?
10. Почему при азотировании поверхность стали получает очень высокую твердость и износостойкость?
11. Каковы преимущества азотирования по сравнению с цементацией. Назовите его недостатки.
12. Какую поверхностную твердость можно получить после азотирования?
13. В чем сущность процесса нитроцементации (цианирования)? Назовите их отличительные особенности.
14. При каких температурах проводится процесс нитроцементации? В каких случаях ее применяют?
15. Для чего проводят диффузионную металлизацию? Раскройте сущность и назначение процессов.
16. В результате какого способа диффузионной металлизации снижается трение?
17. В результате какой обработки можно повысить долговечность измерительных инструментов?
18. Какие твердые растворы образуются при химико-термической обработке и диффузионной металлизации?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9

ИЗУЧЕНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

Цель работы: изучить микроструктуру, свойства, способы термической обработки инструментальных сталей и область их применения.

Приборы и материалы: твердомер типа ТК, микроскоп МЕТАМ ЛВ, коллекция микрошлифов инструментальных сталей, раствор для травления, спирт, фильтровальная бумага, вата.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

I Основные теоретические сведения

1 Классификация инструментальных сталей. Режимы термической обработки, свойства и области их применения

Инструментальные стали применяют для изготовления режущего, измерительного инструмента, штампов холодного и горячего деформирования.

Для правильного выбора марки стали и режима термической обработки надо знать условия работы инструмента и требования, предъявляемые к нему.

Сталь для режущего инструмента должна обладать высокой твердостью, износостойкостью и теплостойкостью, т. е. способностью сохранять твердость и режущие свойства при длительном нагреве в процессе работы.

Сталь для измерительного инструмента должна быть твердой и сохранять его размеры и форму инструмента.

Сталь для штампов холодного деформирования должна иметь высокую твердость, износостойкость и достаточную вязкость.

Сталь для штампов горячего деформирования должна иметь высокие механические свойства, сохраняющиеся при высоких температурах, глубоко прокаливаться и обладать разгаростойкостью.

Инструментальные стали делятся на четыре типа:

- 1) стали пониженной прокаливаемости (углеродистые и низколегированные);
- 2) стали повышенной прокаливаемости (легированные);
- 3) штамповые;
- 4) быстрорежущие.

К *первому типу* относятся все углеродистые инструментальные стали (У7—У13), а также стали с небольшим содержанием легирующих элементов (Х05, Х06, 65ХФ, 85ХФ). Неглубокая прокаливаемость — характерный признак этих сталей, поэтому они применяются для изготовления инструментов небольших размеров.

Для изготовления режущего инструмента, к числу которого относятся фрезы, зенкеры, сверла, шаберы, напильники, бритвы, хирургический инструмент и т. д., применяют заэвтектоидные стали (У9, У10, У11, У12 и У13), у которых после термической обработки (нагрев выше A_{C1} , охлаждение — вода или водные растворы солей) и низкого отпуска

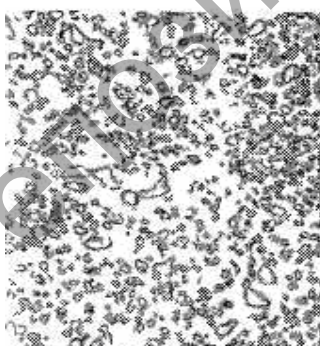
(150...170°C) структура представляет собой мелкоигольчатый мартенсит и карбиды, твердость составляет 57...63HRC (рис. 9.1). Стали этого типа можно использовать в качестве режущего инструмента для резания металлов с твердостью до 30HRC и с малой скоростью, так как их теплостойкость составляет 190...200°C.

Деревообрабатывающий инструмент, зубила, кернеры, отвертки, топоры и т. п. изготавливают из сталей У7 и У8, имеющих после термической обработки трооститную структуру (44...48HRC).

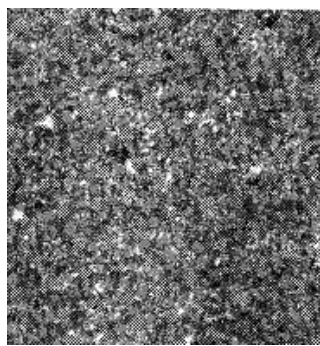
Ко второму типу относятся стали, содержащие легирующие элементы в количестве 1...3%. Легированные стали по сравнению с углеродистыми обладают большей устойчивостью переохлажденного аустенита, а следовательно, большей прокаливаемостью. Теплостойкость сталей составляет 200...250°C. Инструмент из этих сталей закаливается в масле или в соли при ступенчатой закалке и прокаливается насквозь. Стали этого типа, подразделяются на три группы.

В первую группу входят легированные инструментальные стали (Х, 9ХС, ХГСВФ), в которых присадка 1,0...1,5% Cr обеспечивает повышение прокаливаемости (60...80мм).

Вторая группа легированных сталей (ХГ, ХВГ) характеризуется повышенным содержанием марганца (при нормальном содержании кремния). После закалки в масле структура сталей состоит из мартенсита и остаточного аустенита (рис. 9.2). Большое количество остаточного аустенита приводит к уменьшению деформации, поэтому эти стали можно



а)



б)

Рисунок 9.1 — Структура углеродистой инструментальной стали У10 (×500):

а — после отжига; б — после закалки и низкого отпуска

назвать малодеформирующимися инструментальными. Применяют стали для измерительных и режущих инструментов, для которых повышенное коробление при закалке недопустимо (резьбовые калибры, протяжки, длинные метчики и развертки и др.).

В третью группу входят высокотвердые стали (В2Ф, ХВ5), легированные вольфрамом, которые имеют высокую твердость после закалки и низкого отпуска ($65\dots67HRC$) и применяются для изготовления пил (по металлу) и граверных инструментов.

Штамповые стали делят на две группы: стали для штампов, деформирующих металл в холодном состоянии и деформирующих металл в горячем состоянии.

Стали, используемые для изготовления штампов, пластически деформирующих металл в холодном состоянии, должны обладать высокой твердостью, износостойкостью, прочностью, сочетающейся с достаточной вязкостью и теплостойкостью.

Для такого инструмента обычно используют стали со структурой мартенсита (термическая обработка — закалка и низкий отпуск), содержащие около 1% углерода. Штампы небольших размеров и простой конфигурации с относительно легкими условиями работы изготавливают из углеродистых (У10, У11, У12) инструментальных сталей (штампы диаметром до 30 мм для высадки и вытяжки, чеканочные для обработки мягких цветных металлов и т. д.). Для штампов, отличающихся более сложной конфигурацией и более тяжелыми условиями работы, применяют легированные инструментальные стали.

Широкое применение для штампов и других инструментов, деформирующих металл в холодном или относительно невысоком нагретом состоянии (накатные плашки, ролики, фильеры для волочения и др.), получили высокохромистые стали (12% Cr при 1...1,5% C).

Высокохромистые стали Х12, Х12М, Х12Ф1 и Х12ВМ относятся к сталям карбидного класса и содержат 16...17% карбидов (Cr, Fe₇C₃). Стали обладают повышенной прокаливаемостью (до 250 мм), высокой износостойкостью и при закалке в масле мало деформируются, что важно для штампов сложной формы. Недостаток высокохромистых сталей заключа-

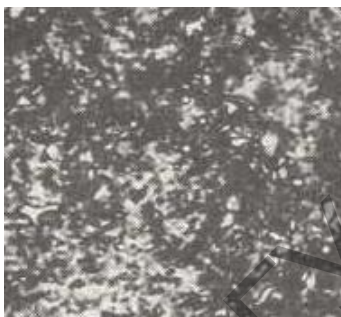


Рисунок 9.2 — Структура стали ХВГ после закалки (мартенсит и остаточный аустенит) ($\times 1000$)

ется в снижении механических свойств в случае резко выраженной карбидной неоднородности (крупные скопления карбидов, карбидная сетка, карбидная полосчатость) (рис. 9.3, *a*). Они используются для тяжелонагруженного штампового инструмента, работающего с повышенной скоростью. Стали подвергают закалке (1 030...1 050°C, масло) и низкому отпуску (180...200°C), твердость составляет 61...63HRC. Высокая твердость этих сталей обусловлена присутствием в структуре большого количества карбидов хрома Cr_7C_3 , которые сохраняются после закалки (рис. 9.4).

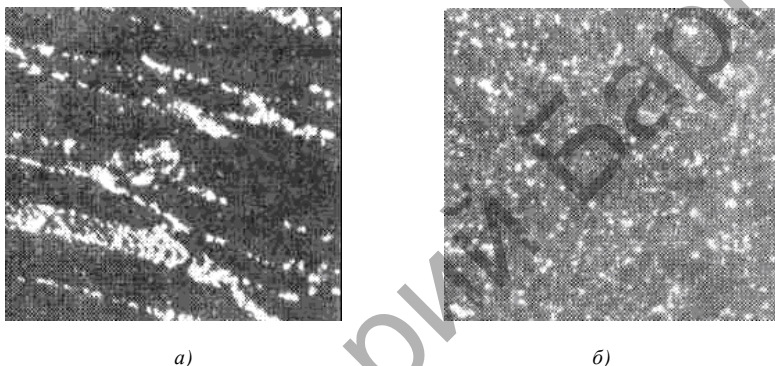


Рисунок 9.3 — Микроструктура сталей (карбидная неоднородность) ($\times 100$):
a — X12; *b* — Х6ВФ

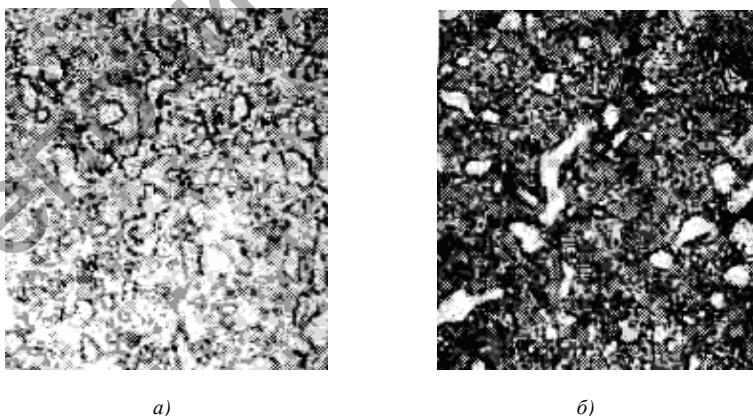


Рисунок 9.4 — Микроструктура стали X12Ф1 ($\times 750$):
a — послековки и отжига; *b* — после закалки и отпуска

Меньшей карбидной неоднородностью обладает сталь Х6ВФ (рис. 9.3, б). Ее используют для изготовления инструментов с высокой механической прочностью и сопротивлением изнашиванию (накатные плашки, накатники для холодного накатывания зубчатых колес и т. д.). Прокаливаемость стали Х6ВФ меньше и не превышает 70...80 мм.

Для инструмента, подвергающегося в работе большим ударным нагрузкам (пневматических зубил, обжимок, ножниц при холодной резке металла и т. д.), применяют стали с меньшим содержанием углерода, повышенной вязкости 4ХС, 6ХС, 6ХВ2С и др.

Эти стали закалывают в масле с температуры 840...900°C (в зависимости от состава стали) и отпускают при температуре 240...270°C с получением твердости 50...55HRC.

Стали, применяемые для изготовления штампов, деформирующих металл в горячем состоянии должны обладать высокой жаропрочностью, теплостойкостью, термостойкостью, вязкостью, глубокой прокаливаемостью, минимальной чувствительностью к отпускной хрупкости.

В соответствии с указанными требованиями для штампов горячего деформирования применяют стали, содержащие 0,3...0,6% С.

Для изготовления молотовых штампов, испытывающих ударные нагрузки при относительно невысоком нагреве поверхности (400...—500°C), применяют стали высокой прокаливаемости с повышенной ударной вязкостью и разгаростойкостью (5ХНВ, 5ХНМ, 5ХГМ, 5ХГВС и др.). Режим термической обработки (отпуск) зависит от размеров штампа. Закалку проводят в масле с температур 830...860°C, очень крупные штампы закалывают в воздушных смесях. Сравнительно мелкие (до 300 мм) штампы отпускают при 460...540°C на твердость 40...44HRC; средние — при 500...550°C на твердость 35... 40HRC; крупные (более 500мм) — при 550...580°C на твердость 45...50HRC. Структура стали после отпуска представляет собой троостит или троостосорбит.

Прессовый инструмент, штампы для горизонтально-ковочных машин испытывают в работе высокие давления без больших ударных нагрузок, но нагреваются до более высоких температур.

Для их изготовления применяются стали с высоким содержанием вольфрама, характеризующиеся повышенной теплостойкостью (4Х2В5МФ), и стали с небольшими добавками вольфрама (молибдена), отличающиеся повышенной разгаростойкостью и высокой вязкостью (4Х5В2ФС, 4Х5МФС, 4Х2В2МФС, 4Х4ВМФС). Стали теплостойкие (до 600°C), окалиностойкие имеют повышенную износостойкость при нагреве.

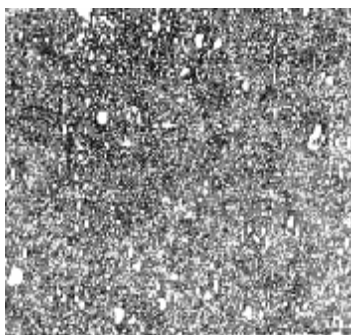
Режущий инструмент, работающий при высоких скоростях резания, увеличенных подачах и большой глубине резания, изготавливается из быстрорежущих сталей, обладающих высокой твердостью, теплостойкостью (красностойкостью), т. е. способностью сохранять мартенситную структуру и соответственно высокую твердость, прочность и износостойкость при повышенных температурах, возникающих в режущей кромке при резании с большой скоростью. Эти стали сохраняют мартенситную структуру при нагреве до 600...650°С, поэтому их применение позволяет значительно повысить скорость резания и стойкость инструментов.

Основными легирующими элементами быстрорежущих сталей являются вольфрам, молибден, кобальт, ванадий. Маркируют их буквой Р, за которой следует число, указывающее среднее содержание (в процентах) вольфрама, затем после соответствующих букв М, Ф и К — число, указывающее содержание молибдена, ванадия и кобальта. В состав всех быстрорежущих сталей непременно входят углерод (0,8...1,25%), хром (около 4%) и ванадий (1...2%), содержание которых в марке не указывается.

Быстрорежущие стали (P18, P6M5, P9K5, P9K10 и др.) относятся к карбидному (ледебуритному) классу. В структуре литой быстрорежущей стали присутствует эвтектика, напоминающая ледебурит (рис. 9.5, а) скелетообразного типа. В результатековки эвтектические карбиды разбиваются, устраняется карбидная неоднородность. Для снижения твердости (250...300НВ), улучшения обработки резанием и подготовки

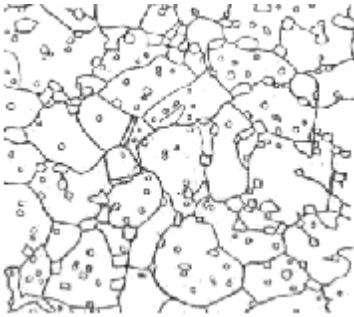


а)

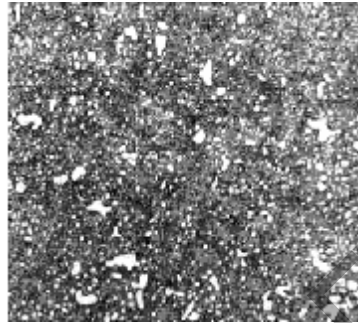


б)

Рисунок 9.5 — Микроструктура быстрорежущей стали ($\times 750$):
 а — ледебурит (литая сталь); б — деформированная и отожженная сталь;
 в — закаленная сталь; г — закаленная и отпущенная сталь



а)



б)

Рисунок 9.5 — Окончание

структуры стали к закалке послековки быстрорежущую сталь подвергают отжигу при 840...880°C (сталь Р6М5 — при 800...830°C). Структура стали после отжига — сорбитообразный перлит с равномерно распределенными карбидами (рис. 9.5, б).

Если отжиг проведен неудовлетворительно, при последующей закалке возможен брак стали вследствие образования нафталинового излома. Этот излом крупнозернистый, чешуйчатый, похожий на нафталин (рис. 9.6). Сталь обладает высокой хрупкостью.

Для придания стали высокой твердости и теплостойкости инструменты подвергают закалке и многократному отпуску. Температуру закалки стали Р6М5 принимают равной 1 210...1 230°C, стали Р18 — 1 270...1 290°C. Высокие температуры закалки необходимы для более полного растворения вторичных карбидов и получения при нагреве аустенита, высоколегированного хромом, вольфрамом, молибденом и ванадием. Это обеспечивает получение после закалки мартенсита, обладающего высокой теплостойкостью. Для быстрорежущих сталей, содержащих много избыточных карбидов, характерно сохранение мелкого зерна (10...11 баллов), даже при нагреве до очень высоких температур (рис. 9.5, в). Во избежание образования



Рисунок 9.6 — Нафталиновый излом в быстрорежущей стали

трещин при нагреве до температуры закалки применяют подогрев инструмента при 800...850°C (10...15 мин). Выдержка при температуре закалки должна обеспечить растворение в аустените части карбидов в пределах возможной их растворимости. Она должна быть непродолжительной (10...12 с на каждый миллиметр диаметра или наименьшей толщины инструмента в расплавленной соли, чаще BaCl_2). Охлаждающей средой при закалке является масло или расплавленные соли.

Структура быстрорежущей стали после закалки представляет собой высоколегированный мартенсит, содержащий 0,3...0,4% *C*, нерастворенные избыточные карбиды и остаточный аустенит (рис. 9.5, в), твердость равна 62...63HRC. Содержание остаточного аустенита в стали Р6М5 составляет 28...34%, в стали Р18 — 25...30%. Остаточный аустенит понижает режущие свойства стали, поэтому его присутствие в готовом инструменте недопустимо.

После закалки следует отпуск при 550...570°C, вызывающий превращение остаточного аустенита в мартенсит и дисперсионное твердение в результате частичного распада мартенсита и выделения дисперсных карбидов. Это сопровождается увеличением твердости. В процессе выдержки при отпуске и последующем охлаждении остаточный аустенит претерпевает мартенситное превращение ($M_n \approx 150^\circ\text{C}$). Чтобы весь остаточный аустенит превратился в мартенсит и произошел отпуск вновь образовавшегося мартенсита, применяют многократный (чаще трехкратный) отпуск при 550...570°C. Продолжительность каждого отпуска составляет 45...60 мин. Для стали Р6М5 оптимальный режим отпуска, обеспечивающий наибольшую твердость и высокие механические свойства следующий: 350°C продолжительностью 1 ч (первый отпуск) и 560...570°C по 1 ч (последующие два отпуска).

Температура окончания мартенситного превращения (M_k) быстрорежущей стали располагается ниже нуля. Поэтому для устранения остаточного аустенита инструмент из быстрорежущей стали непосредственно после закалки можно обрабатывать холодом (75...80°C). В этом случае после обработки холодом следует один или два отпуска при обычно принятой температуре. Микроструктура быстрорежущей стали после отпуска — мелкоигльчатый мартенсит отпуска и карбиды (рис. 9.5, г). Остаточного аустенита в структуре стали сохраняется не более 2%. Твердость закаленной и отпущенной быстрорежущей стали составляет 63...65HRC.

Режущие свойства и твердость инструмента, не подвергающегося переточке по всем граням (сверло, разверток, метчиков и др.), можно

повысить низкотемпературным азотированием при температуре 550...560°C. Продолжительность процесса составляет 10...30 минут, твердость слоя — 1000...1100 *HV*, толщина его — 0,03...0,05 мм.

II Экспериментальная часть

1. Получить у преподавателя коллекцию протравленных микрошлифов инструментальных сталей известного химического состава на различных этапах их термической обработки.

2. Изучить и зарисовать микроструктуру образцов после отжига, закали и отпуска. Замерить их твердость.

3. Провести анализ характерных особенностей микроструктур быстрорежущих сталей после закали, после закали и однократного отпуска, после закали и трехкратного отпуска. Замерить их твердость.

III Содержание отчета

1. Изучить и составить краткий конспект основных теоретических положений о классификации инструментальных сталей, режимах термической обработки, свойствах и области их применения.

2. Зарисовать и объяснить микроструктуру сталей, предложенных преподавателем после различных видов их термической обработки.

3. Зарисовать и объяснить микроструктуру быстрорежущей стали после закали, после закали и трехкратного отпуска.

4. Указать режимы термической обработки, свойства и области применения изучаемых сталей.

5. Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие свойства должны иметь стали, применяемые для режущего инструмента?
2. На какие типы разделяются инструментальные стали?
3. Каковы преимущества легированных сталей для режущего инструмента перед углеродистыми сталями?
4. Каким требованиям должна отвечать сталь для штампов, деформирующих металл в холодном состоянии?

5. Какими свойствами должна обладать сталь для штампов, деформирующих металл в горячем состоянии?
6. Какие стали применяют для изготовления молотовых штампов?
7. Какой режущий инструмент изготавливают из углеродистых сталей?
8. Какими свойствами обладают быстрорежущие стали?
9. Назовите основные легирующие элементы быстрорежущих сталей?
10. Назовите быстрорежущие стали.
11. Почему быстрорежущие стали для закалки нагреваются до высоких температур?
12. Какому отпуску подвергают быстрорежущие стали?
13. Какой термической обработке подвергают быстрорежущую сталь послековки?
14. Если отжиг быстрорежущей стали проведен неудовлетворительно, то какой брак стали возможен при ее последующей закалке?
15. Какой характер имеет нафталиновый излом быстрорежущей стали?
16. Что такое красностойкость?
17. Как влияет остаточный аустенит, присутствующий в структуре инструментальных сталей, на их свойства?
18. Какую твердость имеет быстрорежущая сталь после закалки, после закалки и многократного отпуска?
19. К какому классу относятся быстрорежущие стали?
20. Назовите оптимальный режим отпуска стали Р6М5.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 10

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МЕДНЫХ И ПОДШИПНИКОВЫХ СПЛАВОВ

Цель работы:

- 1) изучить микроструктуру, свойства, маркировку медных и подшипниковых сплавов;
- 2) ознакомиться с требованиями, предъявляемыми к сплавам в зависимости от условий работы изделий из них.

Приборы и материалы: микроскоп МЕТАМ ЛВ, твердомер типа ТШ, коллекция протравленных микрошлифов медных и подшипниковых сплавов.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

I Основные теоретические сведения

1 Маркировка, свойства, структура и применение медных и подшипниковых сплавов

Среди технических цветных металлов наиболее широкое распространение получила медь — один из основных металлов электротехнической промышленности и приборостроения, обладающий высокой электропро-

водностью, теплопроводностью и коррозионной стойкостью. Высокая способность меди пластически деформироваться в горячем и холодном состояниях позволяет изготавливать из нее различные полуфабрикаты (ленты, листы, проволоку, полосы, прутки), широко применяемые в технике.

Ввиду малой прочности ($\sigma_b \leq 25 \text{ кг / мм}^2$) медь не находит широкого применения в качестве конструкционного материала. Ее прочностные характеристики могут быть повышены пластическим деформированием или введением легирующих элементов.

В зависимости от характера взаимодействия с медью различают три группы примесей.

Небольшие концентрации элементов (Al, Fe, Zn, Sn, Cd, Ni, Sb, Au, Pt), растворимых в меди, входят в состав твердого раствора, повышают ее прочность и снижают электро- и теплопроводность.

Нерастворимые примеси (Pb, Bi) образуют с медью легкоплавкие эвтектики, которые состоят почти из чистых металлов этих элементов. Сера и кислород образуют с медью хрупкие химические соединения (Cu_2S , Cu_2O).

Легкоплавкие эвтектики и хрупкие химические соединения, располагаясь по границам зерен меди (рис. 10.1, б), ухудшают ее механические свойства и снижают способность к пластической деформации.

Медь после пластической деформации и рекристаллизационного отжига имеет полиэдрическое строение с наличием двойников (рис. 10.1, а). В микроструктуре наблюдаются включения окиси меди (Cu_2O), которые располагаются внутри рекристаллизованных зерен.

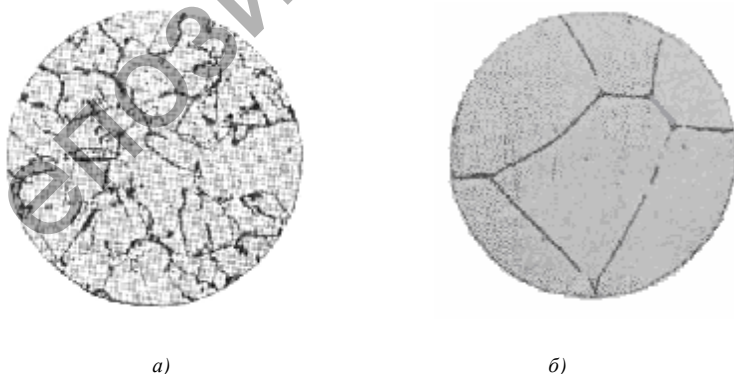


Рисунок 10.1 — Микроструктура:
а — меди после деформации и отжига; б — литой меди с примесью висмута

Высокие прочностные характеристики меди в сочетании с особыми свойствами (жаропрочностью, коррозионной стойкостью) могут быть получены сплавлением ее с другими элементами. Все сплавы меди в зависимости от основного легирующего элемента подразделяются на латуни и бронзы.

Латунями называются сплавы меди с цинком. Латуни подразделяются на двойные (простые) и специальные (сложные). *Двойные* представляют собой двухкомпонентные сплавы меди с цинком. Специальные латуни, кроме этих элементов, содержат определенное количество легирующих добавок (Al, Ni, Fe, Mn, Sn, Si, Pb), вводимых для улучшения каких-либо свойств. Взаимодействие меди с цинком характеризуется соответствующей диаграммой состояния (рис. 10.2).

В системе Cu—Zn образуется шесть твердых растворов. На практике наибольшее применение находят латуни с содержанием цинка до 45%.

В зависимости от содержания цинка латуни делятся на однофазные α -латуни, содержащие до 39% цинка, и двухфазные ($\alpha + \beta$)-латуни, в которых цинка больше 39%.

В литом состоянии α -латуни имеют типичную дендритную структуру. В данном случае светлые оси дендритов, обогащенные медью, расположены на темном фоне богатого цинком α -твердого раствора (рис. 10.3, а).

Деформация и последующий отжиг литой латуни при температуре 600...700°C устраняет химическую неоднородность в пределах зерна.

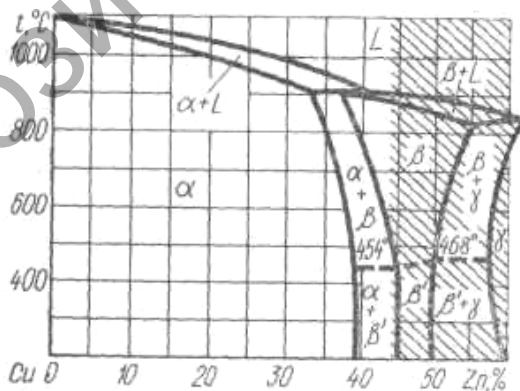


Рисунок 10.2 — Диаграмма состояния медь — цинк (левая часть)

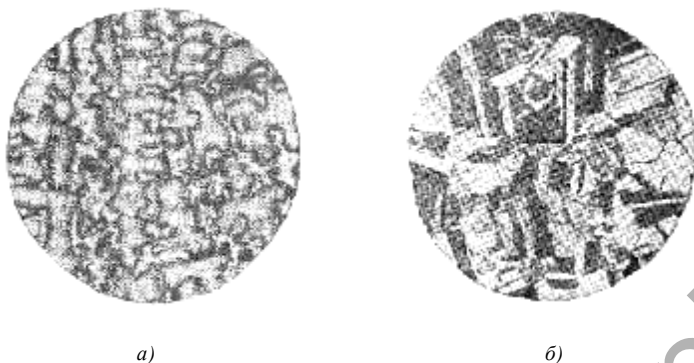


Рисунок 10.3 — Микроструктура:
a — литая α -латунь; *б* — деформированная и отожженная α -латунь Л70

В результате получается однородная зернистая структура с характерными полосами двойников (рис. 10.3, *б*).

В латунях с содержанием 39...45% цинка появляется β -фаза, представляющая собой твердый раствор на базе химического соединения CuZn с решеткой объемно-центрированного куба. При высоких температурах область β -фазы распространяется 38...56% Zn, но с понижением температуры эта область сужается до интервала 45...49% Zn.

В сплавах левее и правее указанного интервала концентраций цинка происходит распад β -фазы с выделением α - или γ -фаз.

Выше 454...468°C β -фаза — неупорядоченный твердый раствор. При этих температурах происходит упорядочение расположения атомов меди и цинка в решетке объемно-центрированного куба. Упорядоченный твердый раствор обозначается β' . Явление упорядочения сопровождается падением пластичности и повышением хрупкости сплавов.

Микроструктура двухфазных латуней состоит из светлых кристаллов α -твердого раствора и более темных — β -твердого раствора (рис. 10.4).



Рисунок 10.4 —
 Микроструктура литой двухфазной латуни Л62
 (светлые зерна — α -фаза,
 темный фон — β -фаза)

Свойства латуней зависят от их структуры и содержания цинка. Прочность и пластичность α -латуней возрастает с повышением концентрации последнего. Максимальной пластичностью обладает сплав, содержащий около 30% цинка. Появление в структуре латуней β' -фазы (39% Zn) способствует резкому падению пластичности и повышению прочности сплава. Наибольшую прочность ($\sigma_b = 42 \text{ кг / мм}^2$) имеет β -латунь (45% Zn). Вследствие повышенной хрупкости β' -фазы β -латуни не находят практического применения.

Все латуни по технологическому признаку подразделяют на деформируемые, из которых изготавливают листы, ленты, трубы, проволоку и другие полуфабрикаты, и литейные, используемые для фасонного литья.

Литейные латуни обладают хорошей жидкотекучестью, мало склонны к ликвации и обладают антифрикционными свойствами.

Однофазные α -латуни обладают высокой пластичностью, коррозионной стойкостью. Они поставляются в виде листов, лент, труб, прутков. Наибольшее распространение имеют α -латуни марок Л96, Л80, Л68.

Двухфазные ($\alpha + \beta$)-латуни при обработке давлением нагревают до температуры однофазного β -состояния. К двухфазным латуням относятся Л62, Л59.

Для повышения механических и антикоррозионных свойств в латуни вводят добавки алюминия, олова, никеля, марганца, железа, кремния и других элементов.

Латуни с присадками алюминия до 4% (ЛА 85-0,5; ЛА77-2) имеют однофазное строение, хорошо пластически деформируются. Алюминий, растворяясь в α -фазе, повышает прочность, твердость, а образующаяся на поверхности прочная окисная пленка увеличивает коррозионную стойкость сплава.

Кремнистые латуни (ЛК80-3) хорошо сопротивляются коррозии, свариваются со сталью, не теряют прочности и вязкости при отрицательных температурах и широко применяются в морском судостроении.

Марганец, растворяясь в α -латуни, способствует повышению ее механических свойств и коррозионной стойкости этих сплавов в морской воде. Марганцовистые латуни (ЛМц58-2) применяют в судостроении и электропромышленности.

Никель, введенный в латунь (ЛН65-5), повышает антикоррозионные, антифрикционные свойства, прочность и вязкость. Эти латуни используют для изготовления манометрических и конденсаторных трубок в морском судостроении.

Олово (ЛО70-1; ЛО62-1) улучшает свойства латуней. Применяются они для изготовления теплотехнической аппаратуры и в судостроении.

Свинец в латунях присутствует в виде включений, расположенных по границам зерен твердого раствора, улучшая их обрабатываемость резани-

ем. Латунь ЛС59-1 (автоматная латунь) поставляется в прутках и предназначена для изделий, изготавливаемых резанием на станках-автоматах.

Все латуни по технологическому признаку подразделяют на деформированные, из которых изготавливают листы, ленты, трубы, проволоку и другие полуфабрикаты, и литейны, предназначенные для фасонного литья.

Основным видом термической обработки α -латунией является отжиг, который проводится с целью смягчения материала перед последующей пластической деформацией. В промышленных условиях отжиг латунией проводят при 600...700°C, охлаждение — на воздухе или в воде.

Для обеспечения качественной поверхности изделий, изготавливаемых глубокой вытяжкой, необходимо получить мелкозернистый материал. Поэтому полосы и ленты, предназначенные для глубокой вытяжки, отжигают при 450...550°C.

Структура и свойства двухфазных ($\alpha + \beta$)-латунией зависят от скорости их охлаждения после отжига. Поэтому материал, предназначенный для дальнейшего деформирования в холодном состоянии, необходимо охлаждать медленно, чтобы возможно большее количество малопластичной β -фазы превратилось в пластичную α -фазу.

Бронзами называются сплавы меди со всеми элементами, кроме цинка. В зависимости от элементов, присутствующих в сплаве, различают оловянные, алюминиевые, бериллиевые, свинцовистые бронзы и т. д.

Характер взаимодействия олова с медью определяется диаграммой состояния этих компонентов (рис. 10.5).

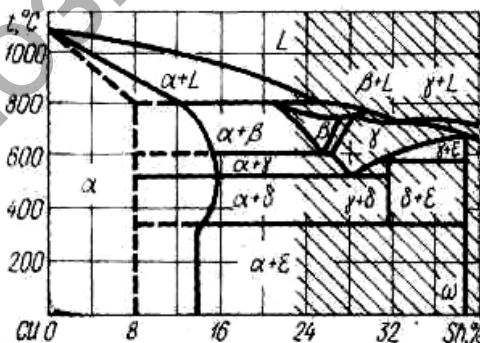


Рисунок 10.5 — Левая часть диаграммы состояния медь — олово

Особенностью оловянных бронз является их большая склонность к ликвации. В меди растворяется до 14% олова. При больших концентрациях олова (до 20%) сплавы становятся хрупкими. В связи с этим практическое применение находят бронзы с содержанием олова до 14...20%.

В структуре литой бронзы, содержащей 5...6% олова, наблюдается дендритное неоднородное строение α -твердого раствора, который представляет собой твердый раствор замещения олова в меди с кристаллической решеткой гранецентрированного куба. Оси дендритов, обогащенные медью — темные, а межосные пространства с повышенной концентрацией олова — светлые (рис. 10.6, *а*). В бронзах с содержанием олова более 6% наряду с α -твердым раствором внутри светлых зон, обогащенных оловом, располагаются участки эвтектоида $\alpha + \delta$, который имеет точечное неоднородное строение. Наличие твердых включений эвтектоида обеспечивает хорошие антифрикционные свойства сплава. Эти сплавы применяются для заливки вкладышей подшипников, работающих при больших удельных давлениях и скоростях.

После деформации и отжига бронза приобретает типичное однофазное строение (рис. 10.6, *б*).

В структуре двойных оловянных бронз можно видеть посторонние включения. В плохо раскисленной бронзе обнаруживаются твердые хрупкие включения окиси олова SnO_2 . Эти примеси устраняются при раскислении бронзы введением небольших (до 1%) количеств фосфора (рис. 10.7, *а*).



Рисунок 10.6 — Микроструктура:

а — литая оловянная бронза ($\times 300$); *б* — оловянная бронза после деформации и отжига ($\times 300$)

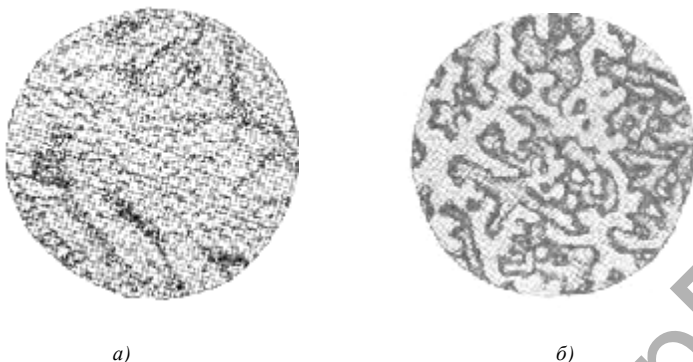


Рисунок 10.7 — Микроструктура:
а — литая бронза BrO10Ф1; б — литая бронза BrA10

Для удешевления в бронзы добавляют 5...10% цинка, который в таких количествах не оказывает существенного влияния на их структуру. Обрабатываемость резанием бронзы значительно улучшается при наличии в ней небольших добавок (3...5%) свинца.

Алюминиевая бронза является хорошим заменителем оловянной бронзы, имеет высокие механические, коррозионные и антифрикционные свойства, а поэтому широко используется для изготовления деталей и различных полуфабрикатов (листов, полос, проволоки). При комнатной температуре структура двухфазных бронз (BrA10) состоит из светлых зерен α -твердого раствора и темного ($\alpha + \gamma$)-эвтектоида (рис. 10.7, б).

Однофазные алюминиевые бронзы (BrA5) пластичны, хорошо деформируются в холодном и горячем состояниях. Двухфазные бронзы (BrA10) обладают большей прочностью и меньшей пластичностью, применяются в литом состоянии, но могут обрабатываться давлением при высоких температурах. Для повышения механических и антифрикционных свойств, а также износостойкости и улучшения структуры алюминиевые бронзы легируют присадками железа, марганца, никеля и других элементов.

Двухфазные бронзы используются для изготовления тяжелонагруженных деталей, работающих на износ (зубчатых колес, червячных передач), специальной аппаратуры в судостроении и т. д.

В промышленности применяются и другие безоловянистые бронзы с особыми свойствами.

Кремнистые бронзы обычно содержат до 3% кремния (например, БрКМц3-1), легированные никелем или марганцем имеют хорошие литейные и антикоррозионные свойства, обладают достаточной упругостью и применяются для изготовления пружин, проволоки, полос, лент, прутков.

Свинцовистые бронзы содержат 27...30% свинца (например, БрС30), имеют высокие антифрикционные свойства и используются для изготовления подшипников скольжения.

Бериллиевые бронзы, содержащие 2,0...2,5% бериллия (БрБ2, БрБ2,5), после термической обработки (закалки и старения) отличаются высокой твердостью, износостойкостью, антикоррозионными свойствами и упругостью. Находят применение для изготовления пружин, мембран, пружинящих контактов, а также используются для изготовления деталей, работающих на износ.

Подшипниковыми (антифрикционными) называются сплавы, применяемые для изготовления вкладышей подшипников скольжения и других трущихся деталей.

Подшипниковые сплавы должны удовлетворять целому ряду требований:

- а) иметь высокую износоустойчивость и малый коэффициент трения между валом и подшипником;
- б) иметь достаточную пластичность для лучшей прирабатываемости к поверхности вала;
- в) иметь твердость, достаточную для вкладыша как для опоры вала, но не вызывающую сильного износа самого вала;
- г) обладать способностью удерживать смазку.

Чтобы удовлетворять данным требованиям, подшипниковые сплавы должны состоять из мягкой пластичной основы, в которую вкраплены твердые частицы.

Наилучшими антифрикционными свойствами из подшипниковых сплавов обладают *баббиты* — антифрикционные сплавы на основе олова и свинца.

Баббиты на основе олова являются сплавами тройной системы Sn — Sb — Cu.

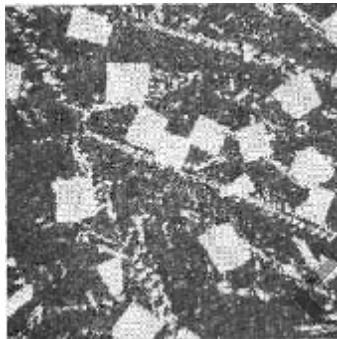
Сурьма, растворяясь в олове, образует α -твердый раствор, который обладает большей твердостью и прочностью, чем олово при той же пластичности.

Одним из лучших баббитов на основе олова является сплав Б83 (83% Sn, 10...12%; Sb и 5,5...6,5% Cu).

Структура которого (рис. 10.8, б) состоит из пластичного α -твердого раствора сурьмы и меди в олове (темный фон), твердых включений химических соединений SnSb (крупные светлые полиэдры) и Cu_5Sn_6 (белые иглы и звездочки).



a)



б)

Рисунок 10.8 — Микроструктуры:
a — баббита Б16; *б* — баббита Б83

Баббит Б83 применяется для заливки подшипников тяжелонагруженных машин (паровых турбин, турбокомпрессоров, турбонасосов). Подшипниковые сплавы на оловянной основе дороги, поэтому для подшипников широкого назначения используют более дешевые свинцовистые баббиты (например, Б16).

Баббит Б16 — сплав системы Pb — Sb (15...17% сурьмы) с добавкой олова (15...17%) и меди (1,5...2,0%). Его структура (рис. 10.8, *a*) представляет собой светлые кристаллы SnSb и иглы Cu₂Sb на фоне эвтектики α(Pb) + β(SnSb). Он используется для изготовления подшипников скольжения высокоскоростных двигателей, хорошо воспринимает ударные и знакопеременные нагрузки.

2 Маркировка меди, ее сплавов и баббитов

Для маркировки меди, сплавов на ее основе и баббитов приняты определенные обозначения.

Медь маркируется буквой М, за которой следует одна из цифр: 0, 1, 2, 3, 4. Увеличение цифрового значения соответствует повышению содержания примесей в меди. Например, медь марки М0 содержит 99,95% Cu, медь М2 — 99,7% Cu, медь М4 — 99,0% Cu.

Латуни маркируют буквой Л, за которой следует цифра, указывающая содержание меди в сплаве. Например, латунь Л68 содержит 68% Cu, ос-

тальное — цинк. Латунни, кроме меди и цинка, могут содержать легирующие элементы, обозначаемые буквами русского алфавита: О — олово, С — свинец, Ж — железо, Мц — марганец, Н — никель, К — кремний, А — алюминий, Ф — фосфор. В деформируемых латунях первые две цифры указывают среднюю массовую долю меди (%), в литейных после буквы Ц — цинка, все последующие — массовую долю легирующих элементов (%) в том же порядке, что и буквы. Например, деформируемая латунь ЛМцОС58-2-2-2 содержит 58% Cu, 2% Mn, 2% Sn и 2% Pb, остальное — цинк; литейная латунь ЛЦ30А содержит 30% Zn, 1% Al, остальное — медь.

Обозначения марок бронз начинаются буквами Бр. Далее следуют буквы, соответствующие элементам, введенным в бронзы, которые обозначаются по аналогии с латунями. Цифры показывают содержание этих элементов в процентах в том же порядке, что и буквы, остальное — средняя массовая доля меди. В деформируемых бронзах буквы, обозначающие элементы сплава, указываются подряд, далее следуют соответствующие цифры через дефис, в литейных — указываются по порядку буквы и цифры.

Например, деформируемая бронза БрОЦСНЗ-7-5-1 содержит 3% Sn, 7% Zn, 5% Pb, 1% Ni, остальное — медь; литейная бронза БрОЗЦ12С5 содержит 3% Sn, 12% Zn, 5% Pb, остальное — медь.

Баббиты обозначаются буквой Б, за которой следует цифра, указывающая содержание олова, или буква, характеризующая элемент, входящий в состав баббита. Например, баббит Б83 содержит 83% Sn; баббит Б83С содержит 83% Sn, 1% Pb.

II Экспериментальная часть

1. Получить у преподавателя коллекцию протравленных микрошлифов медных и подшипниковых сплавов известного химического состава.
2. Изучить микроструктуры и свойства медных и подшипниковых сплавов, установить связь между структурой сплава и соответствующей диаграммой состояния.

III Содержание отчета

1. Изучить и составить краткий конспект основных теоретических положений о структуре, свойствах и назначении меди, медных (латунь, бронза) и подшипниковых сплавов.

2. Зарисовать микроструктуры изучаемых сплавов и определить их структурные составляющие и фазы.

3. Указать марки сплавов и их химический состав в соответствии с маркировкой.

4. Указать свойства изучаемых сплавов и области их применения.

5. Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Свойства, маркировка и применение меди.

2. Что такое латунь? Принцип маркировки латуней.

3. Как влияет на свойства латуней процентное содержание цинка?

4. Как подразделяют латуни по технологическому признаку?

5. Какой сплав называют бронзой? Принцип маркировки бронз.

6. Как подразделяют бронзы по технологическому признаку?

7. Какими свойствами обладают оловянные бронзы?

8. Назовите характерные свойства алюминиевых, кремнистых, бериллиевых и свинцовистых бронз.

9. Из какой бронзы изготавливают антифрикционные детали?

10. Какие сплавы называют баббитами?

11. Какими свойствами должны обладать антифрикционные сплавы?

12. Маркировка баббитов, их свойства.

Справочный материал

Т а б л и ц а А.1 — Твердость структурных составляющих стали

Наименование структур	Твердость	
	<i>HВ</i>	<i>HRC</i>
Цементит	820	—
Перлит пластинчатый	190...230	< 18...22
Перлит зернистый	160...190	< 18
Перлит сорбитообразный	230...260	22...27
Сорбит	270...320	28...35
Троостит	330...400	36...43
Троостомартенсит	400...600	43...59
Мартенсит	646...760	63...70
Аустенит	170...220	< 18...20,5
Феррит	80...100	—

Т а б л и ц а А.2 — Свойства качественных углеродистых конструкционных сталей

Марка стали	Содержание углерода, %	Механические свойства			
		σ_b	σ_T	δ	ψ
		МПа		%	
10	0,07...0,14	340	210	31	55
20	0,17...0,24	420	250	25	55
30	0,27...0,35	500	300	21	50
40	0,37...0,45	580	340	19	45
50	0,47...0,55	640	380	14	40
60	0,57...0,65	690	410	12	35
70	0,67...0,75	730	430	9	30

Т а б л и ц а А.3 — Химический состав (по легирующим элементам) и термическая обработка сталей для штампов холодного деформирования (ГОСТ 5950-2000)

Марка стали	Содержание элементов, %				Температура, °С		Твердость HRC
	С	Cr	V	Другие элементы	закалки (в масле)	отпуска	
X12Φ1	1,25...1,45	11...12,5	0,7...0,9	—	1030...1050	180...200	60...62
X12M	1,45...1,65	11...12,5	0,15...0,3	0,4...0,6 Mo	1030...1050	180...200	60...62
X6BΦ	1,05...1,15	5,5...6,5	0,5...0,8	1,1...1,5 W	980...1000	150...170	62...63
7XГ2BM	0,68...0,76	1,5...1,8	0,1...0,25	1,8...2,3 Mn 0,5...0,9 W 0,5...0,8 Mo	850...860	140...180	59...60
6X6B3MΦC	0,5...0,6	5,5...6,5	0,5...0,8	0,6...0,9 Si 2,5...3,2 W 0,6...0,9 Mo	1050...1100	540 (2—3 раза)	58...60

Т а б л и ц а А.4 — Химический состав (по легирующим элементам) и термическая обработка сталей для штампов горячего деформирования (ГОСТ 5950-2000)

Марка стали	Содержание элементов, %				Температура, °С		Твердость HRC
	С	Cr	W	Другие элементы	закалки (в масле)	отпуска	
5XHM	0,5...0,6	0,6...0,8	—	1,4...1,8 Ni 0,15...0,3 Mo	830...860	500...580	45...38
5XHB	0,5...0,6	0,6...0,8	0,4...0,7	1,4...1,8 Ni	840...860	500...580	45...38
4X3BМΦ	0,4...0,48	2,8...3,5	0,6...1,1	0,6...0,9 V 0,4...0,6 Mo	1050	570	47...49
4X5B2ΦC	0,37...0,45	4,5...5,5	1,6...2,2	0,8...1,2 Si 0,6...0,9 V	1020...1040	560...580	47...49
4X5MΦ1C	0,37...0,44	4,5...5,5	—	0,8...1,2 Si 0,8...1,1 V 1,2...1,5 Mo	1060	560...580	50
3X2B8Φ	0,3...0,4	2,2...2,7	7,5...8,5	0,2...0,5 V	1100	620	42...45
4X2B5MΦ	0,3...0,4	2,2...2,3	4,5...5,5	0,6...0,9 V 0,6...0,9 Mo	1070	600...610 630...640	50...45

Т а б л и ц а А.5 — Марки и химический состав (по легирующим элементам) некоторых быстрорежущих сталей

Марка стали	Химический состав, %					
	C	W	Mo	Cr	V	Co
P18	0,7...0,8	17...19	0,5...1,0	3,8...4,4	1,0...1,4	—
P12	0,8...0,9	12...13	до 1,0	3,2...3,7	1,5...1,9	—
P9	0,85...0,95	8,5...10	до 1,0	3,8...4,4	2,0...2,6	—
P6M5	0,82...0,90	5,5...6,5	5,0...5,5	3,8...4,4	1,7...2,1	—
P6M5K5	0,82...0,90	6,0...7,0	4,8...5,8	3,8...4,3	1,7...2,2	4,3...5,3
P18Ф2	0,85...0,95	17...19	0,5...1,0	3,8...4,4	1,8...2,4	—
P18K5Ф2	0,85...0,95	17...19	до 1,0	3,8...4,4	1,8...2,4	5,0...6,0
P9K10	0,90...1,0	9,0...10,5	до 1,0	3,8...4,4	2,0...2,6	9,0...10,5
P9K5	0,90...1,0	9,0...10,5	до 1,0	3,8...4,4	2,2...2,6	5,0...6,0
P10K5Ф5	1,45...1,55	10,0...11,5	до 1,0	4,0...4,6	4,3...5,1	5,0...6,0
P2AM9K5	1,0...1,1	1,5...2,0	8,0...9,0	3,8...4,4	1,7...2,1	4,7...5,2

Примечание. Быстрорежущая сталь марки P2AM9K5 легирована азотом (массовая доля азота — 0,05...0,1%).

СПИСОК СТОЧНИКОВ

Основной

1. *Геллер, Ю. А.* Материаловедение / Ю. А. Геллер, А. Г. Рахштадт. — М. : Металлургия, 1983.
2. *Гуляев, А. П.* Материаловедение / А. П. Гуляев. — М. : Металлургия, 1986.
3. *Лахтин, Ю. М.* Материаловедение и термическая обработка / Ю. М. Лахтин. — М. : Металлургия, 1977.
4. *Лахтин, Ю. М.* Материаловедение / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. — М. : Машиностроение, 1990.
5. Материаловедение / Ю. П. Солнцев [и др.]; под общ. ред. Ю. П. Солнцева. — М. : МИСИС, 1999.
6. Материаловедение / Б. Н. Арзамасов [и др.]. — М. : Машиностроение, 1986.
7. *Гелин, Ф. Д.* Металлические материалы / Ф. Д. Гелин. — М. : Выш. шк., 2007.

Дополнительный

1. *Худокормова, Р. Н.* Материаловедение. Лабораторный практикум / Р. Н. Худокормова, Ф. И. Пантелеенко. — Минск : Выш. шк., 1988.

Стандарты

1. **ГОСТ 5639-82.** Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. — М. : Госстандарт Союза ССР, Государственный комитет СССР по стандартам, 1983.
2. **ГОСТ 10243-75.** Сталь. Метод контроля макроструктуры. — М. : Госстандарт Союза ССР, 1978.
3. **ГОСТ 380-2005.** Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки. — Минск : Госстандарт Республики Беларусь, 2006.
4. **ГОСТ 1050-88.** Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия. — Минск : Госстандарт Республики Беларусь, 1996.
5. **ГОСТ 1435-99.** Прутки, полосы и мотки из инструментальной нелегированной стали. Общие технические условия. — Минск : Госстандарт Республики Беларусь, 2002.

Учебное издание

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

**Лабораторный практикум
для студентов инженерных специальностей
высших учебных заведений**

Составитель *Г. И. Лециловская*

Технический редактор *О. И. Ющук*
Корректор *Е. В. Фатик*
Компьютерная верстка *В. В. Кукреиш*

Ответственный за выпуск *Е. Г. Хохол*

Подписано в печать 15.03.2010.
Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная.
Гарнитура Таймс. Отпечатано на ризографе.
Усл. печ. л. 5,81. Уч. изд. л. 4,64.
Заказ 25. Тираж 90 экз.

ЛИ 02330/0552803 от 09.02.2010

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Барановичский государственный университет»,
225404, г. Барановичи, ул. Войкова, 21.