

**РОСЖЕЛДОР**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**Ростовский государственный университет путей сообщения**  
**(ФГБОУ ВО РГУПС)**

---

В.Н. Кротов, И.С. Морозкин, Л.А. Кармазина

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**  
**И ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Учебно-методическое пособие  
к лабораторным работам

Ростов-на-Дону  
2017

УДК 620.22(07) + 06

Рецензент – кандидат технических наук, доцент О.А. Ворон

**Кротов, В.Н.**

Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебно-методическое пособие к лабораторным работам / В.Н. Кротов, И.С. Морозкин, Л.А. Кармазина; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2017. – 62 с.

Пособие содержит лабораторные работы по методам исследования свойств металлов и сплавов: макроанализу и микроанализу железоуглеродистых и цветных сплавов и методам определения твердости, предназначено для выполнения студентами лабораторных работ по дисциплине «Материаловедение и технология конструкционных материалов» раздела «Материаловедение».

В пособие включены работы, в которых рассмотрены основные способы термической обработки и даны рекомендации по применению того или иного вида и режима термической обработки. Значительное внимание уделено структурным изменениям, происходящим при термической обработке сталей. Содержатся сведения о влиянии легирующих компонентов на свойства сталей и их поведение при термической обработке, приведен порядок выполнения работ, перечислено необходимое оборудование и материалы, приведены вопросы для самоконтроля и рекомендуемая литература.

В приложении дана маркировка железоуглеродистых и цветных сплавов.

Предназначено для студентов технических специальностей и направлений подготовки.

Одобрено к изданию кафедрой «Технология металлов».

© Кротов В.Н., Морозкин И.С.,  
Кармазина Л.А., 2017  
© ФГБОУ ВО РГУПС, 2017

## Содержание

<i>Лабораторная работа № 1</i> Макроструктурный анализ металлов и сплавов	4
<i>Лабораторная работа № 2</i> Микроскопический анализ металлов и сплавов	11
<i>Лабораторная работа № 3</i> Методы определения твердости металлов . . .	18
<i>Лабораторная работа № 4</i> Микроструктура углеродистых сталей в равновесном (отожженном) состоянии . . . . .	26
<i>Лабораторная работа № 5</i> Микроструктура чугунов . . . . .	33
<i>Лабораторная работа № 6</i> Микроструктура легированных сталей . . . . .	39
<i>Лабораторная работа № 7</i> Микроструктура цветных антифрикционных сплавов . . . . .	44
<i>Лабораторная работа № 8</i> Термическая обработка стали. Закалка . . . . .	48
<i>Лабораторная работа № 9</i> Термическая обработка стали. Отпуск . . . . .	53
<i>Библиографический список</i> . . . . .	57
<i>Приложение</i> Маркировка железоуглеродистых и цветных сплавов . . . . .	58

*Лабораторная работа № 1***МАКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ***Цель работы*

Изучение методов исследования макроструктуры металлических деталей и выявления неоднородности распределения (ликвации) примесей.

*Сведения из теории*

Внутреннее строение металлов и сплавов называется *структурой*. Структуру изучают с помощью металлографических исследований, которые позволяют выявить ее, зарисовать или сфотографировать.

Строение металла, видимое невооруженным глазом или при небольшом (до 30 раз) увеличении с помощью лупы, называется *макроструктурой*, а процесс исследования макроструктуры макроструктурным анализом (*макроанализом*).

Макроанализ дает представление об общем строении металла и позволяет оценить его качество после различных видов обработки: литья, обработки давлением, сварки, термической и химико-термической обработки. Этот анализ не определяет подробностей строения и часто является предварительным видом исследования, позволяющим выбрать участки для дальнейшего микроскопического исследования. Однако возможности макроструктурного анализа достаточно велики, он прост по выполнению и не требует сложного оборудования.

Макроанализ широко применяют в научных исследованиях, при заводском контроле качества готовой продукции, а также во всех случаях исследования деталей, разрушенных при эксплуатации.

С помощью макроанализа можно определить:

- нарушение сплошности металла: усадочную рыхлость, свищи, подкорковые пузыри, межкристаллитные трещины; трещины, возникшие при обработке давлением и термической обработке; дефекты сварки (непровары, газовые пузыри и т.п.);
- вид излома: вязкий, хрупкий, нафталинистый, камневидный и т.д.;
- дендритное строение, размеры и ориентацию зерен в литом металле;
- волокнистую структуру деформированного металла;
- химическую неоднородность металла (ликвацию) и присутствие в нем грубых инородных включений;
- структурную или химическую неоднородность металла, созданную термической, термомеханической или химико-термической обработкой;
- прокаливаемость (для инструментальных сталей, требующих сохранения вязкой сердцевины).

На практике применяют в основном три способа макроанализа:

- макроанализ по излому;
- макроанализ по специально подготовленным образцам – *макрошлифам* (темплетам);
- изучение макростроения металла непосредственно на поверхности заготовки или детали (которая хорошо шлифуется и протравливается). В этом случае изделие не разрушается и после контроля идет в эксплуатацию.

Рассмотрим более подробно первые два способа.

**Макроанализ по излому** выполняется по аварийным (как правило) или специально подготовленным изломам. По виду излома можно определить вид чугуна, приблизительную температуру нагрева под термообработку стали, глубину цементованного слоя и т.п. Изучение излома дает возможность выявить место зарождения трещины, в котором, как правило, располагаются поверхностные или внутренние дефекты. Анализ излома позволяет установить особенности строения металла, характер (хрупкий или вязкий), а иногда и причины разрушения.

По строению рельефа различают изломы:

- кристаллический или зернистый (называемый также хрупкий излом) – ровный, блестящий, состоящий из множества гладких площадок-фасеток. Этот излом наблюдается при хрупком разрушении без видимой пластической деформации;
- матовый или волокнистый (вязкий) – излом с выступами или чашечкой, не имеющий кристаллического блеска, наблюдается при вязком разрушении, которому предшествовала значительная пластическая деформация;
- смешанный – кристаллический в одних участках и волокнистый в других. Наиболее характерным примером смешанного излома является так называемый усталостный излом в деталях, работающих в условиях циклического многократного нагружения (рельсы, оси, валы, штоки, клапанные пружины и др.).

В усталостном изломе (рис. 1) наблюдаются следующие зоны:

*фокус излома* – малая локальная зона, в которой возникает макроскопическая трещина усталости;

*очаг разрушения* – малая зона, прилегающая к фокусу, где возникла начальная макроскопическая трещина усталости, появлению которой способствовали концентраторы напряжений (риски, трещины, забоины, неметаллические включения и др.);

*участок избирательного развития* с гладкой, часто блестящей поверхностью – зона развивающейся трещины усталости. В этой зоне обычно видны характерные усталостные линии, волнообразно расходящиеся от очага разрушения, являющегося как бы центром. Усталостные линии являются следами фронта продвижения трещины. При слиянии нескольких трещин, развивающихся по параллельным плоскостям, возникают ступеньки и рубцы. При изменении направления развития трещины образуются зародыши трещин, называемые пасынковыми;

*участок ускоренного развития* – переходная зона между участком усталостного развития трещины и зоной долома;

*зона долома* – последняя стадия усталостного излома, расположена в месте окончательного разрушения, происходящего с большой скоростью. Излом в этой зоне имеет признаки хрупкого разрушения. Зона долома образуется быстро в течение одного или нескольких циклов нагружений.

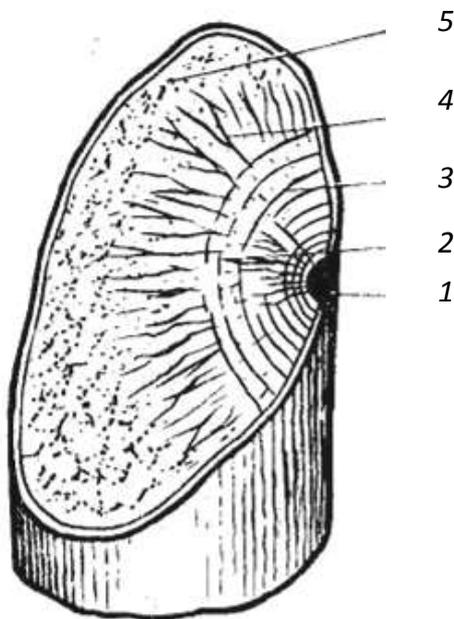


Рис. 1. Схематическое изображение участков усталостного излома:

- 1 – фокус излома;
- 2 – очаг разрушения;
- 3 – участок избирательного развития;
- 4 – участок ускоренного развития;
- 5 – зона долома

Кроме перечисленных видов, различают транскристаллический (по телу зерен), межкристаллический (между зерен), крупно- и мелкозернистый, нафталинистый, камневидный и другие виды изломов.

**Макроанализ по макрошлифам.** Выполняется по специальным образцам – макрошлифам. Способы их приготовления заключаются в следующем:

- макрошлиф вырезают из реального изделия в определенной плоскости, в зависимости от цели исследования. Плоскую поверхность образца получают обработкой на строгальном, фрезерном станках или обработкой вручную с помощью напильника;
- поверхность макрошлифа шлифуют с помощью специальной шкурки. Вначале шлифуют на шкурке с грубым абразивным зерном, постепенно переходя на шкурку с более мелким зерном. При переходе

с одного номера шкурки на другой направление шлифования нужно изменить на  $90^\circ$ . После шлифования образцы промывают специальными составами (чаще спиртом) для удаления загрязнений, следов масла и т.п.;

- травление поверхности макрошлифа необходимо для выявления структуры.

В зависимости от цели исследования травление подразделяют на *глубокое*, *поверхностное* и *снятие отпечатков*. Структура, выявляемая при глубоким травлении, слабо зависит от подготовки поверхности образца. Поверхностное травление и метод отпечатков требуют более тщательной подготовки поверхности.

Остановимся подробнее на каждом виде травления.

*Глубокое травление* применяют для выявления дефектов, нарушающих сплошность металла (раковин, пор, трещин), изучения строения литых деталей и слитков, а также выявления волокнистого строения металлов. Для него чаще всего используют: 50 %-ный водный раствор соляной кислоты (HCl) при температуре  $60...80^\circ\text{C}$  и продолжительности травления 5...45 мин или раствор, содержащий 100 мл HCl, 1100 мл  $\text{HNO}_3$  и 100 мл воды (температура  $60...70^\circ\text{C}$ , время 5...10 мин). При глубоким травлении растворы кислот высокой концентрации растравливают металл в местах нарушения сплошности и неоднородности, таким образом, выявляется его внутреннее строение. Примером использования этого метода макроанализа для изучения строения и дефектов стального слитка может служить схема рис. 2.

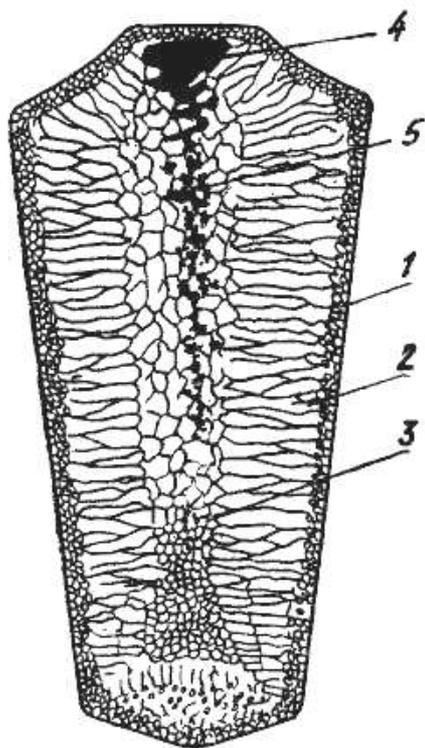


Рис. 2. Схема строения стального слитка:

- 1 – мелкозернистая корочка;
- 2 – зона столбчатых кристаллов;
- 3 – зона равноосных кристаллов;
- 4 – усадочная раковина;
- 5 – усадочная рыхлость

В изложнице жидкая сталь начинает кристаллизоваться у стенок, образуя мелкие кристаллы (мелкозернистая корка 1), ориентировка которых может быть самой разнообразной, что объясняется наличием мельчайших неровностей, существующих на поверхности стенок изложницы и чрезвычайно быстрым охлаждением в начальный момент кристаллизации. При дальнейшем охлаждении направление отвода тепла становится преимущественно нормальным к стенкам изложницы, что вызывает рост удлиненных кристаллитов и образование второй зоны – зоны столбчатых кристаллов 2 (зоны транскристаллизации). Кристаллы, образующиеся в процессе затвердевания металла, могут иметь различную форму. Чаще при кристаллизации образуются разветвленные или древовидные кристаллы, получившие название *дендритов* (рис. 3).

Далее охлаждение металла замедляется, становится одинаковым во всех направлениях и происходит рост кристаллитов с произвольной ориентацией осей. Эта часть слитка называется зоной равноосных кристаллов 3. В результате усадки металла в верхней части слитка образуется усадочная раковина 4 и усадочная рыхлость 5.

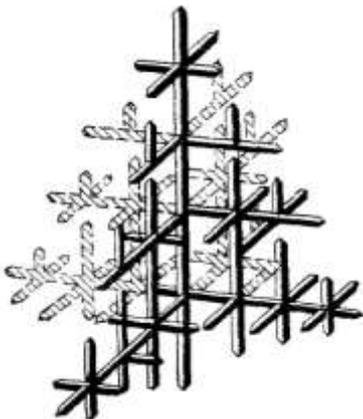


Рис. 3. Схема дендрита

После обработки слитка делением (ковка, штамповка, прокатка и т.д.) изменяется его макроструктура, что также может быть выявлено макроанализом. Дендриты вытягиваются вдоль направления течения металла и превращаются в *волокна*. Так возникает различие в свойствах (анизотропия) вдоль проката (вдоль волокон) и поперек. В готовом изделии волокна должны располагаться вдоль контура изделия (правильное расположение), так как наибольшей прочностью металл обладает поперек волокон.

*Поверхностное травление* выявляет волокнистое строение (рис. 4) и ликвацию в сплавах. Ликвацией называется неравномерность распределения компонентов и примесей, входящих в сплав. Возникает она при кристаллизации сплавов, так как в первую очередь появляются кристаллиты, содержащие минимальное количество примесей, оттесняемых в среднюю часть слитка. Различают дендритную (внутрикристаллическую), зональную ликвации и ликвацию по плотности.

Необходимо твердо запомнить, что дендритная ликвация проявляется в пределах одного дендрита. Зональная ликвация – неоднородность в объеме слитка. Ликвация по плотности появляется в сплавах, компоненты и фазы в которых имеют большую разницу в плотности (например, сплав свинец-сурьма).



Рис. 4. Схема макроструктуры с правильным (а) и неправильным (б) расположением волокон в стали

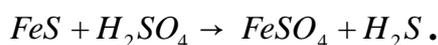
Скопление в отдельных местах (ликвация) таких вредных примесей в железоуглеродистых сплавах, как сера и фосфор, отрицательно сказывается на свойствах металла и работоспособности изделий, так как приводит к опасной концентрации напряжений и возможности мгновенного или усталостного разрушения.

Поверхностным травлением макрошлифа реактивом Гейна выявляют ликвацию фосфора и углерода. Реактив содержит 85 г хлорной меди ( $\text{CuCl}_2$ ), 53 г хлористого аммония ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), растворенных в 1000 мл воды. В этот реактив макрошлиф погружают исследуемой поверхностью на 0,5...1 мин при 20 °С. Во время выдержки происходят реакции, приводящие к выделению на поверхности шлифа губчатой меди (результат взаимодействия раствора с железом) и разъеданию поверхности шлифа (травлению) хлористыми солями реактива. В участках, обогащенных фосфором и углеродом, медь выделяется менее интенсивно и поэтому меньше защищает поверхность металла от травления. Эти участки окрашиваются в более темный цвет. Извлеченный из раствора шлиф переносят под струю воды, осадок меди удаляют ватным тампоном. Просушенный образец зарисовывают или фотографируют.

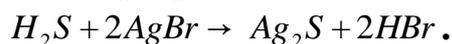
*Метод отпечатков* состоит в том, что изображение макроструктуры появляется не на шлифе, а на фотобумаге. Для определения ликвации серы используют так называемый метод серных отпечатков (метод Баумана).

Сера находится в стали в виде соединений с марганцем ( $\text{MnS}$ ) и железом ( $\text{FeS}$ ). Если на подготовленную поверхность макрошлифа наложить фотобумагу, предварительно выдержанную в течение 5...10 мин в 5 %-ном растворе серной кислоты ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), то на тех участках поверхности металла, в ко-

торых имеются скопления сернистых соединений (сульфидов), происходит следующая реакция



Аналогичная реакция протекает и с включениями сернистого марганца. Образующийся сероводород воздействует на бромистое серебро фотоэмульсии с выделением сернистого серебра



Сернистое серебро имеет коричневую окраску, поэтому образующиеся на фотобумаге темные участки указывают форму и характер распределения включений сульфидов в исследуемой стали или чугуна. После снятия с макрошлифа фотобумагу промывают в воде, закрепляют в растворе фиксажа в течение 10...15 мин, затем промывают и сушат.

Результаты макроструктурного анализа можно в необходимых случаях зафиксировать: зарисовать или сфотографировать. Для фотографирования макрошлифов применяют специальные установки, позволяющие фотографировать плоские и рельефные объекты при увеличении до 30 раз.

#### *Рабочее задание*

Провести макроанализ излома образцов и выявить ликвацию примесей на макрошлифах.

#### *Оборудование и материалы*

Для выполнения работы необходимо иметь: образцы для макроанализа по изломам и макрошлифам, образцы для изготовления макрошлифов, шлифовальную шкурку, деревянные бруски, реактивы для снятия серного отпечатка, бромосеребряную фотобумагу, реактив Гейна.

#### *Порядок выполнения работы*

1 Ознакомиться с основными методами макроанализа, изложенными в сведениях из теории настоящей работы.

2 Зарисовать вид и дать краткое описание излома одной из имеющихся деталей.

3 Изготовить макрошлиф.

4 Снять серный отпечаток и определить наличие ликвации серы в исследуемом образце.

5 Провести травление образца для выявления ликвации фосфора. Зарисовать макрошлиф после травления с указанием расположения включений фосфора.

6 Оформить отчет о лабораторной работе.

#### *Содержание отчета*

В отчете должны быть: название и цель работы; определение, возможности и виды макроанализа; зарисовки излома детали, строения слитка и темплета с волокнистым строением стали; краткое описание методик определения ликвации серы и фосфора; серный отпечаток и зарисовка шлифа с ликвацией фосфора; выводы по результатам исследования макроструктуры.

*Контрольные вопросы:*

- 1 Что называется макроструктурным анализом?
- 2 Какие виды макроанализа вы знаете?
- 3 Что можно изучить с помощью макроанализа?
- 4 Как приготовить макрошлиф?
- 5 Какие бывают виды изломов?
- 6 Как выполнить снятие серного отпечатка?
- 7 Как выявить ликвацию фосфора?
- 8 Каково строение металлического слитка?
- 9 Как выявляется структурная неоднородность стали?

*Лабораторная работа № 2*

## **МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

*Цель работы*

Ознакомление с методами микроанализа, изучение устройства металлографического оптического микроскопа и освоение техники изготовления микрошлифов.

*Сведения из теории*

Микроскопический анализ (*микроанализ*) заключается в исследовании структуры материалов при больших (от 50 до 2000 раз) увеличениях с помощью микроскопа. Наблюдаемая структура называется *микроструктурой*. Микроструктуру изучают при помощи металлографического микроскопа – оптического или электронного. Использование оптической микроскопии позволяет различить частицы размером не менее 0,2 мкм, а электронной не менее 0,1 мкм (несколько десятков атомных слоев).

Микроанализ с применением оптического микроскопа позволяет определять:

- форму и размеры кристаллических зерен, из которых состоит металл или сплав;
- структуру металлов и сплавов;
- микропороки металла: микротрещины, раковины и т.п.

- наличие, размеры и характер распределения неметаллических включений: сульфидов, оксидов, частиц графита и т.д.

### *Порядок приготовления микрошлифов*

Образец, поверхность которого подготовлена для микроанализа, называется *микрошлифом*. Металлы – тела непрозрачные, поэтому микроструктуру рассматривают в отраженном свете. Для получения наилучшего отражения поверхность исследуемого образца должна быть ровной и гладкой, что достигается ее тщательным шлифованием и полированием.

Студентам необходимо изучить порядок изготовления микрошлифа, изложенный ниже.

*Вырезка* образца из объекта исследования. Место вырезки зависит от цели исследования и формы детали. Образцы для микрошлифов из мягких материалов вырезают пилой, фрезой, резцом и т.д., из твердых – вулканистыми, карборундовыми, алмазными кругами, а также электроискровым способом.

Следует иметь в виду, что форма и размеры образцов строго не регламентируются, но исходя из условий их установки на микроскопе и получения зеркальной поверхности, более удобными считают цилиндрические и прямоугольные образцы, показанные на рис. 5. Образцы небольшого сечения монтируются заливкой в специальных оправках или зажимах.

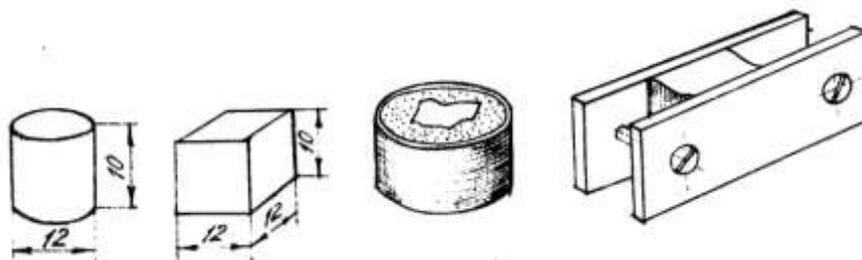


Рис. 5. Нормальные размеры микрошлифов и приспособления для монтирования образцов

*Получение плоской поверхности* микрошлифа. Исследуемую поверхность обрабатывают на строгальном, токарном или фрезерном станках, абразивным кругом или напильником. В случае общего исследования структуры металла, когда края шлифа не изучаются, снимают фаску размером около 1 мм для предотвращения повреждения сукна на полировальном станке.

*Шлифование*. После получения плоской поверхности образец шлифуют бумажной шлифовальной шкуркой вручную или на шлифовальных станках. При ручном шлифовании шкурку помещают на плоское твердое основание (обычно толстое стекло). Образец прижимают шлифуемой поверхностью к шкурке и ритмично перемещают вперед и назад по прямой линии. При механическом шлифовании шкурку закрепляют на вращающемся круге с помо-

щью зажимных колец или клеевого покрытия, а образец прижимают к шкурке вручную или устанавливают в зажимное приспособление станка. Для сухого шлифования используют шлифовальную бумажную шкурку (ГОСТ 6456-75), а для мокрого – водостойкую шкурку (ГОСТ 10054-75).

Шлифование проводят, используя шкурку нескольких номеров с последовательно уменьшающейся зернистостью. Во время шлифования на каждой шкурке следует сохранять одно и то же положение образца, чтобы все риски на его поверхности были параллельны. При переходе к шкурке следующего номера направление шлифования изменяют на  $90^\circ$  и проводят его до полного удаления всех рисков, образовавшихся во время предыдущей операции. После каждой ступени шлифования поверхность образца следует тщательно очищать во избежание переноса сравнительно крупных частиц абразива на более мелкозернистый материал. Для этой цели образцы обычно промывают в воде.

*Полирование.* Целью полирования является удаление мелких рисков и получение гладкой зеркальной поверхности шлифа. Применяют механический, электрический и химико-механический методы полирования. Механическое полирование осуществляют на вращающемся плоском круге с натянутым полировальным материалом (сукно, фетр, драп, бархат и т. п.), на который непрерывно или периодически наносят очень мелкий абразив в виде суспензии в воде. В качестве абразивов применяют окись хрома, окись алюминия, оксид железа. Все более широко используются полировальные алмазные пасты, которые наносят на специальную ткань или бумагу. Для полировки применяют такие пасты ГОИ, в состав которых вместе с абразивом входят поверхностно-активные вещества (в частности, олеиновая кислота), оказывавшие химическое воздействие на поверхность обрабатываемого материала.

Полирование считается законченным, когда на поверхности шлифа под микроскопом не наблюдаются риски или царапины. Образец после полирования промывают водой, полированную поверхность протирают ватой, смоченной спиртом, а затем просушивают фильтровальной бумагой. После полирования микрошлиф может быть исследован под микроскопом. В отраженном свете на общем светлом поле будут видны такие элементы структуры, которые отражают световой пучок иначе, чем металл. Это различного рода неметаллические включения: сульфиды, оксиды, графитные включения, а также микропоры, микротрещины и т.п.

*Травление.* Для выявления микроструктуры полировальную поверхность образца подвергают травлению, т.е. действию кислот, щелочей, солей. После травления неоднородные участки металла или сплава становятся видимыми под микроскопом, так как поверхность приобретает сложный микрорельеф и при освещении лучи света неодинаково отражаются от различно протравившихся структурных составляющих (рис. 6).

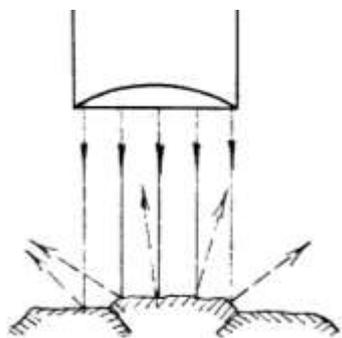


Рис. 6. Схема отражения лучей от полированной и протравленной поверхности микрошлифа

Следует запомнить, что выявление структуры после травления происходит в результате:

- более активного воздействия травителей на границы зерен, имеющих наибольшее количество дефектов кристаллической решетки, поэтому они имеют вид темных линий;
- неодинаковой травимости, вследствие анизотропии свойств зерен одного химического состава, решетки которых различно ориентированы по отношению к поверхности микрошлифа.

Травление шлифа осуществляют погружением его полировальной поверхностью в реактив или нанесением реактива на поверхность ватой, пипеткой и т.д. Продолжительность травления зависит от материала. После травления микрошлиф промывают водой, протирают ватой, смоченной спиртом, а затем просушивают, прикладывая фильтровальную бумагу или протирая сухой ватой. Реактив для травления выбирают в зависимости от исследуемого металла или сплава и цели травления по справочнику [3]. Состав и назначение некоторых травителей приведен в табл. 1.

Таблица 1

Реактивы для микроанализа

Наименование	Состав	Назначение
Спиртовой раствор азотной кислоты (реактив Ржешотарского)	Азотная кислота – 1...5 мл Этиловый спирт – 100 мл	Для травления сталей и чугунов
Щелочной раствор нитрата натрия	Пикриновая кислота – 2 г Едкий натр – 25 г вода – 100 мл	Окрашивает цементит в стали и чугуне в черный цвет
Солянокислый раствор хлорного железа	Хлорное железо – 10 г Соляная кислота – 25 мл Вода – 100 мл	Для выявления структуры меди, латуни, бронзы
Раствор кислот	Плавиковая кислота – 1 мл Соляная кислота – 2,5 мл Вода – 95 мл	Для выявления микроструктуры в сплавах типа дюралюминия

### *Принцип действия металлографического микроскопа*

Микроскопы, позволяющие рассматривать непрозрачные тела в отраженном свете, называются металлографическими или металломикроскопами. Впервые микроскоп для изучения строения металлов применил в 1831 году русский ученый П.П. Аносов. Принцип действия такого микроскопа показан на рис. 7.

### *Принцип действия металлографического микроскопа*

Микроскопы, позволяющие рассматривать непрозрачные тела в отраженном свете, называются металлографическими или металломикроскопами. Впервые микроскоп для изучения строения металлов применил в 1831 году русский ученый П.П. Аносов. Принцип действия такого микроскопа показан на рис. 7.

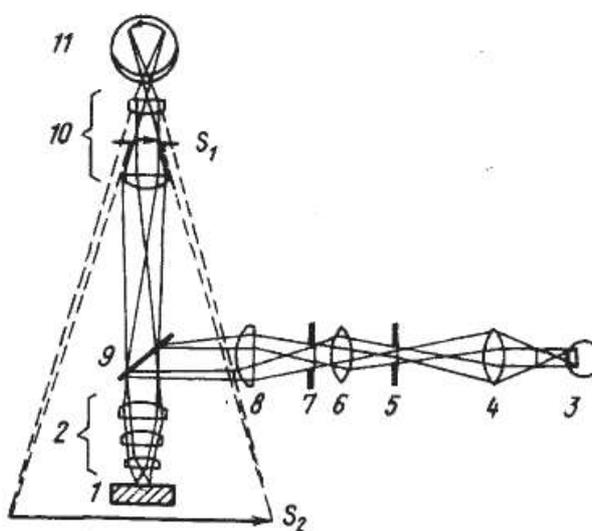


Рис. 7. Принципиальная схема металлографического микроскопа

Подготовленный соответствующим образом микрошлиф *1* помещают перпендикулярно к оптической оси микроскопа в плоскости, совпадающей с передней главной фокальной плоскостью объектива *2*. Шлиф освещается проходящим через объектив почти параллельным пучком света, который формируется осветительной системой, состоящей из источника света (лампы) *3*, коллекторной линзы *4*, апертурной *5* и полевой *7* диафрагм, вспомогательных линз *6*, *8* и полупрозрачной пластинки *9*. Световые лучи, отражающиеся от участков поверхности шлифа; попадают и объектив, а те лучи, которые отражаются от неровностей поверхности, не попадают в его поле. На конечном изображении поверхности шлифа, создаваемом окуляром *10*, все отражающие свет участки оказываются светлыми, а участки, наклоненные к оси, – темными. Благодаря этому выявляются различные элементы структуры металла.

Объектив создает обратное действительное увеличенное изображение в передней фокальной плоскости окуляра  $S_1$ . Окуляр дополнительно увеличи-

вает это изображение и дает окончательное мнимое увеличенное изображение образца  $S_2$  на расстоянии  $\sim 250$  мм от глаза наблюдателя  $11$ .

Увеличение микроскопа равно произведению соответствующего увеличения объектива и окуляра

$$V_M = V_{об} \cdot V_{ок} \quad \text{или} \quad V_M = \frac{l}{F_{об}} \cdot \frac{250}{F_{ок}},$$

где  $V_M$  – увеличение микроскопа;

$V_{об}$  и  $V_{ок}$  – увеличение объектива и окуляра;

$F_{об}$  и  $F_{ок}$  – фокусное расстояние объектива и окуляра;

$l$  – длина визуального тубуса, мм;

250 – расстояние наилучшего зрения.

Основное увеличение обеспечивается объективом (может достигать 100), увеличение окуляра, укрупняющее изображение, данное объективом, обычно не превышает 20. Набор сменных объективов и окуляров позволяет получить разное увеличение. Кратность увеличения объектива и окуляра выгравирована на их оправе.

Если необходимо точно определить увеличение изображения, то в качестве объекта используют пластинку с микрометрической шкалой (объект – микрометр), на которую нанесены через каждые 0,01 мм деления на общей длине 1 мм.

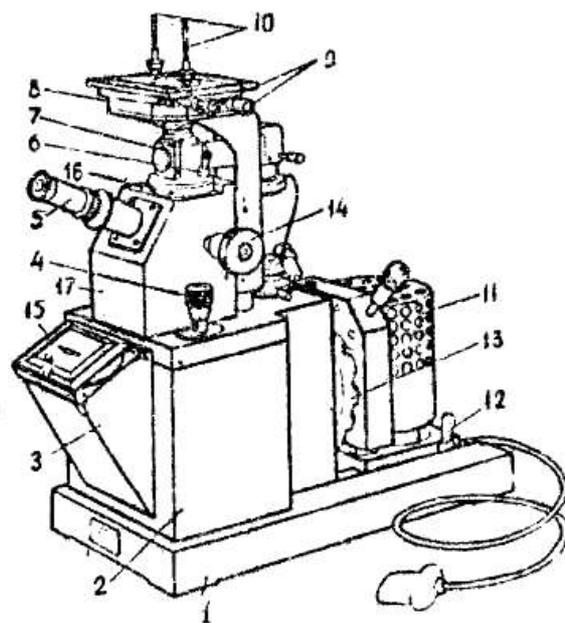


Рис. 8. Общий вид микроскопа МИМ-7: 1 – основание; 2 – корпус, 3 – фотокамера; 4 – микрометрический винт; 5 – визуальный тубус; 6 – рукоятка диафрагмы темного поля; 7 – иллюминаторный тубус, 8 – предметный столик; 9 – рукоятки перемещения стола; 10 – клеммы; 11 – осветитель; 12 – стопор; 13 – диск с набором светофильтров; 14 – макрометрический винт; 15 – матовая пластинка в рамке; 16 – анализатор; 17 – корпус центральной части

Металлографические микроскопы включают оптическую, осветительную, механическую и фотографическую системы. В лабораторной практике применяют микроскопы МИМ-6, МИМ-7, МИМ-8, МИМ-9 и др.

#### *Устройство микроскопа МИМ-7*

Микроскоп МИМ-7 (рис. 8) состоит из трех основных частей: осветителя 11, корпуса 2 и верхней части. В верхней части расположены визуальный 5 и иллюминаторный 7 тубусы, в посадочные отверстия которых устанавливаются соответственно окуляр и объектив. Микрошлиф прикрепляется на предметном столике 8, который можно с помощью рукояток 9 перемещать в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Это необходимо для просмотра различных участков микрошлифа. Перемещение предметного столика в вертикальном направлении для наведения на фокус осуществляется грубо с помощью микрометрического винта 14, точно – микрометрического винта 4.

#### *Рабочее задание*

Выявить наличие, форму и размеры неметаллических включений на изготовленном микрошлифе до травления. Изучить микроструктуру стали на микрошлифе после травления.

#### *Оборудование и материалы*

В работе используются: металлографические микроскопы, образцы для изготовления микрошлифов, набор шлифовальных шкурок, полировальный станок, травители, спирт, фильтровальная бумага.

#### *Порядок выполнения работы*

1 Ознакомиться с особенностями микроскопического анализа, порядком приготовления микрошлифа, устройством металлографического микроскопа.

2 Изготовить микрошлиф. После полирования определить наличие, количество, форму и размеры неметаллических включений.

3 Протравить микрошлиф. Рассмотреть микроструктуру образца под микроскопом, зарисовать схему микроструктуры.

4 Оформить отчет по лабораторной работе.

#### *Содержание отчета*

В отчет по лабораторной работе необходимо включить:

- название и цель работы;
- определение метода микроанализа и его возможности;

- порядок приготовления микрошлифа с зарисовкой формы и размеров, наиболее часто применяемых образцов;
- изображение принципиальной схемы металлографического микроскопа с обозначением основных частей оптической схемы и кратким описанием микроскопа;
- схемы микроструктуры исследованного образца до и после травления.

### *Контрольные вопросы*

- 1 Что такое микроанализ?
- 2 Что позволяет определять микроскопический анализ?
- 3 Что такое микрошлиф и порядок его приготовления?
- 4 Как выполняется шлифование и полирование образцов?
- 5 Для чего производится травление микрошлифов?
- 6 Какие микроскопы называют металлографическими?
- 7 Каков принцип действия металломикроскопа?
- 8 Как определить увеличение микроскопа?
- 9 Каковы основные системы микроскопа?
- 10 Каков порядок работы на металлографическом микроскопе?

### *Лабораторная работа № 3*

## **МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ**

### *Цель работы*

Освоение основных методов определения твердости, ознакомление с устройством и работой приборов для измерения твердости.

### *Сведения из теории*

Одной из наиболее распространенных характеристик, определяющих качество металлов и сплавов, возможность их применения в различных конструкциях и при различных условиях работы, является твёрдость. Испытания на твердость производятся чаще, чем определение других механических характеристик металлов: прочности, относительного удлинения и др.

Твердость определяют с помощью специальных приборов – твердомеров путем воздействия на поверхность металла наконечника (*индентора*), изготовленного из малодеформирующегося материала (твердой закаленной стали, алмаза, твердого сплава) и имеющего форму шарика, конуса, пирамиды или иглы.

Существует несколько способов измерения твердости, различающихся по характеру воздействия наконечника. Твёрдость можно измерять вдавливанием индентора (способ вдавливания), царапанием поверхности (способ

царапания), ударом или же по отскоку наконечника – шарика (метод отскокивания), по затуханию колебаний маятника (метод качания маятника). Твердость, определённая царапанием, характеризует сопротивление разрушению, по отскоку и затуханию колебаний – упругие свойства, вдавливанием – сопротивление пластической деформации. В зависимости от скорости приложения нагрузки на индентор твердость различают статическую (нагрузка прикладывается плавно) и динамическую (нагрузка прикладывается ударом).

Широкое распространение испытаний на твердость объясняется рядом их преимуществ перед другими видами испытаний:

- простота измерений, которые не требуют специального образца и могут быть выполнены непосредственно на проверяемых деталях;
- высокая производительность;
- измерение твердости обычно не влечет за собой разрушения детали, и после измерения ее можно использовать по своему назначению;
- возможность ориентировочно оценить по твердости другие характеристики металла, в первую очередь предел прочности.

Так, например, зная твердость по Бринеллю ( $HB$ ), можно определить предел прочности на растяжение  $\sigma_B$  (временное сопротивление).

$$\sigma_B = K \cdot HB, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от материала;

$K = 0,34$  – сталь  $HB$  120...175;

$K = 0,25$  – сталь  $HB$  175...450;

$K = 0,55$  – медь, латунь и бронза отожженные;

$K = 0,33...0,36$  – алюминий и его сплавы.

Наибольшее применение получило измерение твердости вдавливанием в испытуемый металл индентора в виде шарика, конуса и пирамиды (соответственно методы Бринелля, Роквелла и Виккерса). В результате вдавливания достаточно большой нагрузкой поверхностные слои металла, находящиеся под наконечником и вблизи него, пластически деформируются. После снятия нагрузки остается отпечаток. Величина внедрения наконечника в поверхность металла будет тем меньше, чем тверже испытуемый материал.

Таким образом, под *твердостью* понимают сопротивление материала местной пластической деформации, возникающее при внедрении в него более твердого тела – индентора.

### *Измерение твердости по Бринеллю*

Твердость по методу Бринелля (ГОСТ 9012-59) измеряют вдавливанием в испытуемый образец стального шарика определенного диаметра  $D$  под действием заданной нагрузки  $P$  в течение определенного времени (рис. 9).

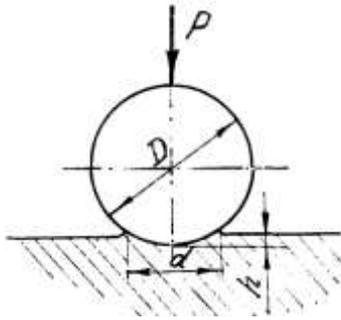


Рис. 9. Схема испытаний на твердость по Бринеллю

В результате вдавливания шарика на поверхности образца получается отпечаток (лунка). Число твердости по Бринеллю, обозначаемое  $HB$ , представляет собой отношение нагрузки  $P$  к площади поверхности сферического отпечатка  $F$  и измеряется в кгс/мм или МПа

$$HB = \frac{P}{F} . \quad (2)$$

Площадь шарового сегмента

$$F = \pi \cdot D \cdot h , \text{ мм}^2 , \quad (3)$$

где  $D$  – диаметр шарика, мм;

$h$  – глубина отпечатка, мм.

Так как глубину отпечатка измерить трудно, а проще измерить диаметр отпечатка  $d$ , выражают  $h$  через диаметры шарика  $D$  и отпечатка  $d$

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} , \text{ мм} . \quad (4)$$

Тогда

$$F = \frac{\pi D}{2} \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right) , \text{ мм}^2 . \quad (5)$$

Число твердости по Бринеллю определится по формуле

$$HB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} , \text{ кгс/мм}^2 . \quad (6)$$

Для перевода твердости по Бринеллю в единицы СИ необходимо умножить число твердости в кгс/мм на 9,81, т.е.  $HB = 9,81 \cdot HB$  (МПа).

В практике определения твердости не делают вычислений по формуле (6), а пользуются таблицами, составленными для установленных диаметров шариков, отпечатков и нагрузок.

Шарики, применяемые при испытаниях, имеют диаметры 10, 5 и 2,5 мм. Диаметр шарика и нагрузка выбираются в соответствии с толщиной и твердостью образца (табл. 2). При этом для получения одинаковых чисел твердости одного материала при испытании шариками разных диаметров необходимо соблюдать закон подобия между получаемыми диаметрами отпечатков. Поэтому твердость измеряют при постоянном соотношении между величиной нагрузки  $P$  и квадратом диаметра шарика  $D^2$ . Это соотношение должно быть различным для металлов разной твердости.

## Условия испытания металлов на твердость по Бринеллю

Металлы	Твердость $HB$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Толщина образца, мм	Соотношение между $P$ и $D^2$	Диаметр шарика $D$ , мм	Нагрузка $P$ , кгс	Выдержка под нагрузкой, с
Черные	140...450	6...3	$P = 30 \cdot D^2$	10	3000	10
		4...2		5	750	
		Менее 2		2,5	187,5	
Черные	$\leq 140$	Более 6	$P = 10 \cdot D^2$	10	1000	10
		6...3		5	250	
		Менее 3		2,5	62,5	
Цветные	$\geq 130$	6...3	$P = 30 \cdot D^2$	10	3000	30
		4...2		5	750	
		Менее 2		2,5	187,5	
Цветные	35...130	9...3	$P = 10 \cdot D^2$	10	1000	30
		6...3		5	250	
		2...3		2,5	62,5	
Цветные	8...35	Более 6	$P = 2,5 \cdot D^2$	10	250	60
		6...3		5	62,5	
		Менее 3		2,5	15,6	

Число твердости по Бринеллю, измеренное при стандартном испытании ( $D = 10$  мм,  $P = 3000$  кгс), записывается так:  $HB$  350. Если испытания проведены при других условиях, то запись будет иметь следующий вид  $HB$  5/250/30-200, что означает – число твердости 200 получено при испытании шариком диаметром 5 мм под нагрузкой 250 кгс и длительности нагрузки 30 с.

При измерении твердости по методу Бринелля необходимо выполнять следующие условия:

- образцы с твердостью выше  $HB$  450 кгс/мм<sup>2</sup> (4500 МПа) испытывать запрещается;
- поверхность образца должна быть плоской и очищенной от окалины и других посторонних веществ;
- диаметры отпечатков должны находиться в пределах  $0,2D \leq d \leq 0,6D$ ;
- образцы должны иметь толщину не менее 10-кратной глубины отпечатка (или не менее диаметра шарика);
- расстояние между центрами соседних отпечатков и между центрами отпечатка и краем образца должны быть не менее  $4d$ .

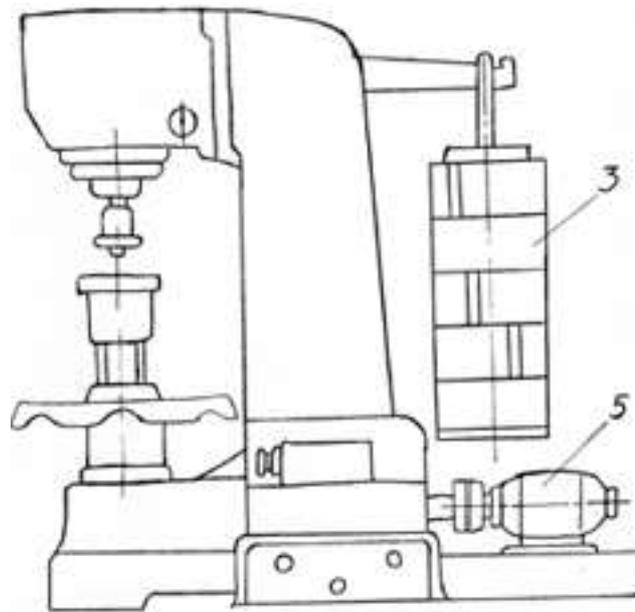


Рис. 10. Схема прибора для измерения твердости по способу Бринелля

Определение твердости *НВ* производится на прессе Бринелля (твердомер типа ТШ) в следующем порядке. Испытуемый образец (деталь) устанавливают на столике 1 (рис. 10) шлифованной поверхностью кверху. Поворотом маховика 2 по часовой стрелке столик прибора поднимают так, чтобы шарик 4 мог вдавиться в испытуемую поверхность. Маховик 2 вращают до упора, и нажатием кнопки включают электродвигатель 6. Двигатель перемещает коромысло и постепенно нагружает шток с закрепленным в нем шариком. Шарик под действием нагрузки 3, сообщаемой привешенным к коромыслу грузом, вдавливается в испытуемый материал. Нагрузка действует в течение определенного времени (10...60 с), задаваемого реле, после чего вал двигателя, вращаясь в обратную сторону, соответственно перемещает коромысло и снимает нагрузку. После автоматического выключения двигателя, поворачивая маховик 2 против часовой стрелки, опускают столик прибора и снимают образец.

Диаметр отпечатка измеряют при помощи отчетного микроскопа (лупы Бринелля), на окуляре которого имеется шкала с делениями, соответствующими десятым долям миллиметра. Измерение проводят с точностью до 0,05 мм в двух взаимно перпендикулярных направлениях; для определения твердости следует принимать среднее из полученных значений.

#### *Измерение твердости по Роквеллу*

При этом методе индентором является алмазный конус или стальной закаленный шарик. В отличие от измерения по методу Бринелля, твердость определяют по глубине отпечатка, а не по его площади. Глубина отпечатка измеряется в самом процессе вдавливания, что значительно упрощает испытание. Нагрузка прилагается последовательно в две стадии (ГОСТ 9013-59):

сначала предварительная, обычно равная 10 кгс (для устранения влияния упругой деформации и различной шероховатости исследуемой поверхности), а затем основная (рис. 11).

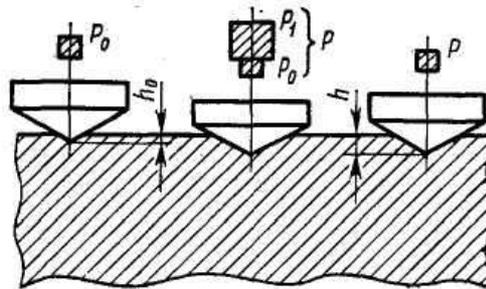


Рис. 11. Положение наконечника при определении твердости по Роквеллу

После приложения предварительной нагрузки индикатор, измеряющий глубину отпечатка, устанавливается на нуль. Когда отпечаток получен приложением окончательной нагрузки, основную нагрузку снимают и измеряют остаточную глубину проникновения наконечника  $h$ .

Твердость измеряют на приборе Роквелла (рис. 12) следующим образом. Вставив в оправку 5 наконечник с алмазным конусом (имеющим угол при вершине  $120^\circ$  и радиус закругления 0,2 мм) или стальным шариком диаметром 1,568 мм, испытуемый образец кладут на столик 6 прибора. При помощи маховика 7 образец подводится к алмазному конусу и слегка вдавливаются в него до достижения предварительной нагрузки в 10 кг, что отмечается на циферблате 4 установкой маленькой стрелки против красной точки.

Предварительная нагрузка в 10 кг дается с целью установить одинаково плотное соприкосновение между алмазом и образцом и, таким образом, избежать ошибок, вызываемых различной чистотой обработки поверхности деталей. Когда маленькая стрелка установится против красной точки, необходимо повернуть ободок индикатора 4 так, чтобы ноль черной шкалы совпал с большой стрелкой. После этого легким нажимом откидывают назад рукоятку 3, и она медленно перемещается до упора, вследствие чего автоматически включается рычажная система с грузами 1. Груз оказывает давление на алмаз (шарик) и индикатор шкалы одновременно. Благодаря масляному тормозу 2 нагрузка передается плавно, без толчков. После того как движение рукоятки прекратится, ее возвращают обратно, чем снимается основная нагрузка. Большая стрелка будет указывать величину твердости по Роквеллу. Столик с образцом опускают, вращая маховик против часовой стрелки.

Твердомер Роквелла измеряет разность между глубиной отпечатков, полученных от вдавливания наконечника под действием основной и предварительной нагрузок. Каждое давление (единица шкалы) индикатора соответствует глубине вдавливания 2 мкм. Однако условное число твердости по Роквеллу ( $HR$ ) представляет собой не указанную глубину вдавливания  $h$ , а ве-

личину  $(100 - h)$  по черной шкале при измерении конусом и величину  $(130 - h)$ , по красной шкале при измерении шариком.

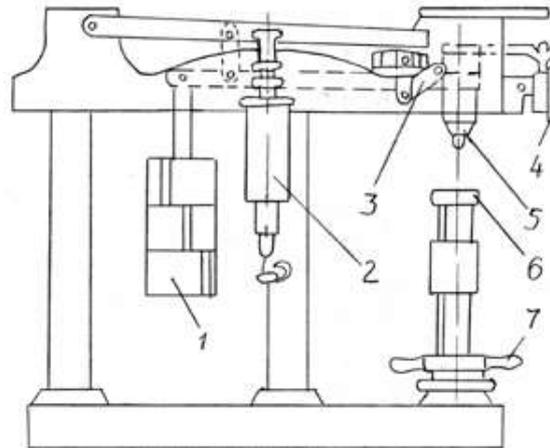


Рис. 12. Схема прибора для измерения твердости по Роквеллу

Значения твердости по Роквеллу не имеют размерности и того физического смысла, который имеют значения твердости по Бринеллю, однако можно найти соотношение между ними с помощью специальных таблиц.

Твердость по методу Роквелла можно измерять:

- алмазным конусом с общей нагрузкой 150 кгс. Твердость измеряется по шкале *C* и обозначается *HRC* (например, *65HRC*). Таким образом определяют твердость закаленной и отпущенной сталей, материалов средней твердости, поверхностных слоев толщиной более 0,5 мм;
- алмазным конусом с общей нагрузкой 60 кгс. Твердость измеряется по шкале *A*, совпадающей со шкалой *C*, и обозначается *HRA*. Применяется для оценки твердости очень твердых материалов, тонких поверхностных слоев (0,3...0,5 мм) и тонколистового материала;
- стальным шариком с общей нагрузкой 100 кгс. Твердость обозначается *HRB* и измеряется по красной шкале *B*. Применяется для определения твердости мягкой (отожженной) стали и цветных сплавов.

При измерении твердости на приборе Роквелла необходимо, чтобы на поверхности образца не было окалины, трещин, выбоин и др. Необходимо контролировать перпендикулярность приложения нагрузки к поверхности образца и устойчивость его положения на столике прибора. Расстояние между отпечатками должно быть не менее 1,5 мм при вдавливании конуса и не менее 4 мм при вдавливании шарика.

Твердость следует измерять не менее 3 раз на одном образце, усредняя полученные результаты.

#### *Рабочее задание*

Провести испытание на твердость образцов из разных металлов и сплавов методами Бринелля и Роквелла.

### Оборудование и материалы

Для выполнения работы необходимы: автоматический рычажный пресс Бринелля, прибор Роквелла, микроскоп к прессу Бринелля, таблицы, образцы из разных материалов для измерения твердости.

### Порядок выполнения работы

1 Изучить основные теоретические положения по измерению твердости металлов, устройство и работу твердомеров.

2 Измерить твердость по методам Роквелла (*HRC*) и Бринелля (*HB*) с применением шариков диаметрами 10, 5 и 2,5 мм и соответствующих нагрузок на образцах из разных материалов. Результаты измерений занести в рабочую таблицу (табл. 3).

Таблица 3

### Результаты измерений

Номер образца	Материал	HB, кгс/мм <sup>2</sup>			HRC
		D = 10 мм	D = 5 мм	D = 2,5 мм	
1	Ст. 2				—
2	Сталь 65 (нормализованная)				
3	Сталь 65 (сорбит)				
4	Сталь 65 (тростит)				
5	Сталь 65 (мартенсит)	—	—	—	
6	Серый чугун				—
7	Бронза			—	—
8	Баббит		—	—	—

3 На основании полученные данных построить график соотношения твердости *HRC* и твердости *HB* для стали 65 в различных структурных состояниях.

### Содержание отчета

В отчет о работе должны быть включены: название и цель работы; определение твердости металлов; краткое описание методов Бринелля и Роквелла с соответствующими формулами и схемами испытаний; рабочая таблица с результатами измерения твердости *HB* и *HRC*; график соотношения твердости по Бринеллю и Роквеллу.

*Контрольные вопросы*

- 1 Что называется твердостью?
- 2 Какие существуют способы измерения твердости?
- 3 Чем объясняется широкое распространение испытаний металлов на твердость в технике?
- 4 Какова сущность метода определения твердости по Бринеллю?
- 5 Как обеспечить получение примерно одинаковых чисел твердости по Бринеллю при испытании шариками различных диаметров?
- 6 Какие условия необходимо выполнять при измерении твердости по Бринеллю?
- 7 Как измеряют твердость на приборе Роквелла?
- 8 Каков порядок нагружения индентора при определении твердости по Роквеллу?
- 9 Что показывает стрелка индикатора на приборе Роквелла?
- 10 Как можно найти соотношение между твердостью по Роквеллу и твердостью по Бринеллю?

*Лабораторная работа № 4*

## **МИКРОСТРУКТУРА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ В РАВНОВЕСНОМ (ОТОЖЖЕННОМ) СОСТОЯНИИ**

*Цель работы*

Исследование микроструктуры углеродистых сталей в равновесном (медленноохлажденном) состоянии и установление связи между их структурой, составом, свойствами и практическим применением.

*Общие сведения и указания*

Свойства металлических материалов зависят не только от их химического состава, но и от микроструктуры. Особенно важно знать микроструктуру железоуглеродистых сплавов (сталей и чугунов), так как в современном машиностроении, в том числе и на железнодорожном транспорте, эти сплавы являются наиболее распространенными конструкционными материалами.

Под равновесным состоянием сплава понимается такое, при котором все фазовые превращения в сплаве полностью закончились в соответствии с диаграммой состояния. Это достигается только при медленном охлаждении в процессе отжига. Поэтому для успешного выполнения данной работы от студентов требуется детальное знание диаграммы состояния «железо-цементит» (рис. 13).

Напомним, что компонентами рассматриваемой системы являются железо и углерод.

Углерод растворим в железе в жидком и твердом состоянии, а также может образовывать с железом химическое соединение – цементит. В системе «железо-углерод» различают следующие фазы: жидкий сплав, твердые растворы – феррит и аустенит, а также цементит и графит в высокоуглеродистых сплавах.

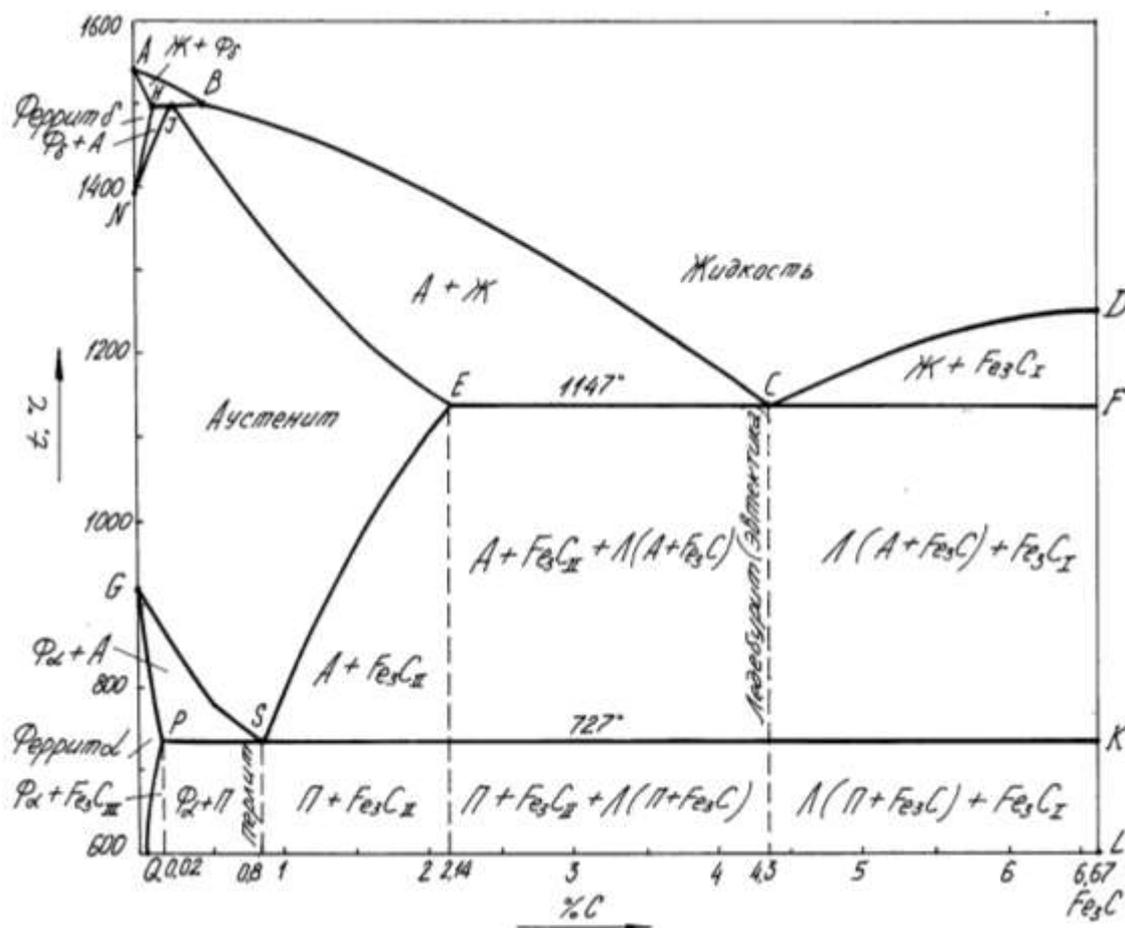


Рис. 13. Диаграмма состояния «железо-цементит»

*Феррит* ( $\Phi$ ) – твердый раствор углерода и примесей в  $\alpha$ -железе. Углерода в феррите очень мало. Согласно диаграмме (рис. 13) предел растворимости углерода в  $\alpha$ -железе при температуре 727 °С (точка  $P$ ) составляет 0,025 %, а при комнатной – всего 0,008 %. Различают еще высокотемпературный феррит- $\delta$  с максимальной растворимостью углерода 0,1 % при температуре 1492 °С.

*Аустенит* ( $A$ ) – твердый раствор углерода и примесей в  $\gamma$ -железе. Предельная растворимость углерода в  $\gamma$ -железе составляет 2,14 % (точка  $E$ ) при температуре 1147 °С.

*Цементит* (карбид железа  $Fe_3C$ ) – химическое соединение, содержащее постоянное количество углерода 6,67 %.

Перечисленные твердые фазы могут входить в структурные составляющие железоуглеродистых сплавов в зависимости от содержания углерода и температуры.

Необходимо знать, что *сталями* называются сплавы железа с углеродом, содержащие менее 2,14 % углерода (практически 0,1...1,6 %). Углеродистые стали не содержат других (легирующих) элементов, за исключением так называемых постоянных примесей, которые неизбежны в технических углеродистых сталях. К ним относятся кремний (до 0,4 %), марганец (до 0,8 %), сера (до 0,06 %), фосфор (до 0,7 %) и др.

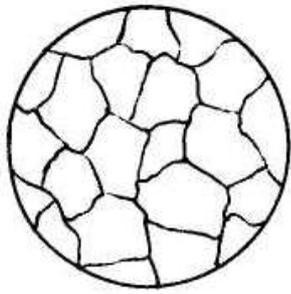
В зависимости от содержания углерода углеродистые стали подразделяют по микроструктуре на: *доэвтектоидные*, содержащие менее 0,8 % углерода, *эвтектоидные* – 0,8 % углерода, и *заэвтектоидные* – более 0,8 % углерода.

Свойства сталей (а следовательно, их применение) различны, что определяется их структурой. В равновесном состоянии микроструктура углеродистых сталей может состоять из феррита, перлита и цементита. Феррит и цементит являются однофазными структурными составляющими, а перлит – двухфазной.

*Феррит* обладает невысокой твердостью ( $HB = 80$  кгс/мм<sup>2</sup>) и прочностью, но очень пластичен. Увеличение количества феррита в сталях приводит к повышению ее пластичности и снижению твердости. Микроструктура феррита имеет вид светлых зерен, изображаемых на схеме многоугольниками неправильной формы (рис. 14). Окраска зерен может иметь различный тон из-за различной травимости зерен, срезанных при изготовлении микрошлифа по разным кристаллографическим плоскостям (анизотропия свойств кристаллов).

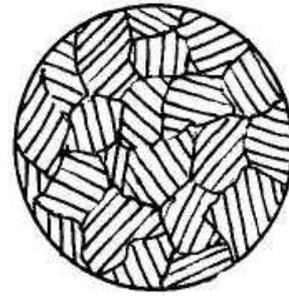
*Цементит*  $Fe_3C$  обладает очень высокой твердостью  $\sim 800$  *HB* и очень хрупок. После обычного травления спиртовым раствором азотной кислоты цементит, как и феррит, под микроскопом имеет белый цвет. Для выявления цементита иногда применяют травление пикратом натрия, после которого он окрашивается в темный цвет, феррит при этом остается светлым. Цементитная фаза присутствует во всех сталях или в структурно-свободном состоянии (в заэвтектоидных сталях), или входя в состав перлита.

*Перлит (эвтектоид)* – механическая смесь феррита и цементита – является двухфазной структурной составляющей железоуглеродистых сплавов. Имеет концентрацию углерода 0,8 %. Перлит, получивший название по перламутровому оттенку шлифа после травления, бывает пластинчатым и зернистым, в зависимости от формы частичек цементита. Схема микроструктуры пластинчатого перлита представлена на рис. 15.



×135

Рис. 14. Схема микроструктуры технического чистого железа (феррит)



×135

Рис. 15. Схема микроструктуры пластинчатого перлита

Следует иметь в виду, что формирование структуры сплавов происходит в процессе их охлаждения из расплавленного состояния до нормальной температуры. При медленном охлаждении кристаллизация проходит в соответствии с диаграммой состояния «железо-цементит», все превращения в сплавах завершаются полностью, и окончательная структура является равновесной. Обычно этот процесс рассматривают, используя построение кривой охлаждения соответствующего сплава. Необходимо отметить, что у всех сплавов, содержащих менее 2,14 % углерода, в результате первичной кристаллизации образуется структура аустенита (см. рис. 13). Поэтому для изучения равновесных структур углеродистых сталей при комнатной температуре воспользуемся левым нижним углом диаграммы «железо-цементит» (рис. 16).

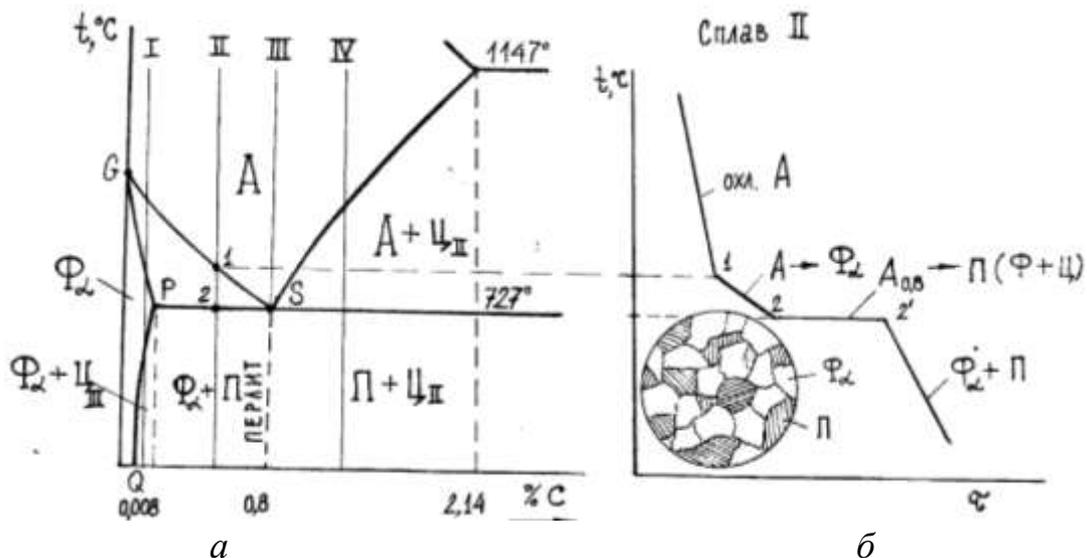


Рис. 16. Левый нижний угол диаграммы «железо–углерод» (а) и кривая охлаждения сплава II (доевтектоидной стали) (б)

**Железо.** Сплавы, содержащие менее 0,008 % углерода, являются однофазными и имеют структуру чистого феррита. К ним относится электролитическое железо. Техническое железо (сплав I) содержит более 0,008 %, но ме-

нее 0,025 % углерода, структура, его состоит из феррита и третичного цементита, расположенного по границам зерен в виде прослоек.

*Дозэвтектоидная* углеродистая сталь содержит менее 0,8 % углерода. В соответствии с диаграммой состояния, структура стали состоит из зерен феррита и перлита (сплав II). Феррит выделяется из аустенита от линии *GS* (точка 1, см. рис. 4, *a*) до линии *PSK* (точка 2). Аустенит в результате этого процесса обогащается углеродом до 0,8 % и при постоянной температуре 727 °С превращается в перлит (участок кривой охлаждения 2–2').

Обращаем внимание, что с увеличением содержания углерода количество перлита в доэвтектоидной стали увеличивается, а феррита соответственно уменьшается. Количество перлита в структуре стали равно 100 % при содержании в ней углерода 0,8 % (эвтектоидная сталь). Если условно принять феррит за чистое железо, можно считать, что весь углерод в доэвтектоидной стали содержится в перлите. Это дает возможность по площади, занимаемой перлитом, в микроструктуре отожженной доэвтектоидной стали приближенно определить содержание в ней углерода

$$C = F_{II} \cdot \frac{0,8}{100},$$

где  $C$  – содержание углерода в стали, %;

$F_{II}$  – площадь перлитной составляющей в структуре стали, %.

Например, если площадь, занимаемая перлитом, составляет 50 % (по глазомерному определению или измерению), то в стали содержится углерода

$$C = 50 \frac{0,8}{100} = 0,4 \text{ \%}.$$

Следует обратить внимание на то, что при содержании 0,6...0,7 % углерода феррит выделяется не в виде отдельных зерен, а оторочкой вокруг зерен перлита и наблюдается на шлифе, как ферритная сетка.

*Заэвтектоидной* углеродистой сталью называется сталь, содержащая более 0,8 % углерода. Микроструктура этой стали представляет зерна пластинчатого перлита, разделенные тонкой прослойкой избыточного вторичного цементита, которая образует в плоскости шлифа тонкую цементитную (карбидную) сетку. Вторичный цементит выделяется как избыточная фаза по границам зерен аустенита в процессе охлаждения (сплав IV, рис. 4, *a*) между линиями *SE* и *PSK*. Такая микроструктура заэвтектоидной стали (цементитная сетка и пластинчатый перлит) неблагоприятно влияет на ее механические и технологические свойства: повышается хрупкость, снижается ударная вязкость и ухудшается обрабатываемость резанием. Лучшей структурой заэвтектоидной стали является зернистый перлит и разорванная цементитная сетка, получаемые с помощью специальной термической обработки.

Необходимо твердо запомнить, что практическое применение углеродистых сталей для определенных деталей и изделий в первую очередь зависит от их структуры, а значит – содержания в стали углерода.

При очень малом содержании углерода (0,05...0,15 %) из-за большого количества феррита стали очень пластичны, но непрочны, хорошо обрабатываются давлением даже в холодном состоянии, прокатываются, штампуются с глубокой вытяжкой. Поэтому из них изготавливают малонагруженные детали высокой пластичности: кровельные листы, кожухи, прокладки, колпачки и т.п.

С увеличением концентрации углерода до 0,15...0,25 % возрастает содержание перлита, поэтому прочность становится выше при довольно высокой пластичности, вязкости и хорошей свариваемости. Из такой стали изготавливают: паровые котлы, трубопроводы, сосуды, работающие под давлением, строительные и другие конструкции, соединяемые чаще всего сваркой. Эти стали не поддаются закалке, твердость их невелика, поэтому при использовании в качестве материала для деталей, работающих на износ (шестерни, звездочки, кулачковые валики), поверхности деталей подвергают науглероживанию – цементации.

Из сталей, содержащих 0,2...0,4 % углерода, чаще всего изготавливают крепежные детали – гайки, болты, шпильки.

При 0,3...0,5 % углерода стали имеют достаточную прочность благодаря повышенному содержанию перлита. Их применяют для деталей, работающих в условиях больших статических и динамических нагрузок, после упрочнения закалкой – шпинделей, валов, шестерен, звездочек и т.п.

Стали, имеющие высокий предел упругости и не очень хрупкие (0,5...0,7 % углерода), применяют для изготовления рессор, пружин и других деталей, которые должны обладать высокой прочностью.

Высокоуглеродистые стали, содержащие более 0,6...0,7 % углерода, используют для изготовления железнодорожных колес и рельсов, так как они обладают высокой твердостью и износостойкостью (особенно после закалки). Такие свойства обеспечиваются минимальным содержанием или полным отсутствием структурно-свободного феррита. Избыточный (вторичный) цементит в заэвтектоидных сталях еще больше повышает их твердость.

Из доэвтектоидных и эвтектоидных сталей (0,7...0,8 % углерода) изготавливают инструменты, работающие при ударных нагрузках: молотки, зубила, кернеры, бородки и т.п.

Из заэвтектоидных (более 0,8 % C) – изготавливают инструменты большой твердости, не подвергающиеся ударам: напильники, сверла, резцы, метчики, развертки, шаберы и др.

*Рабочее задание*

Изучить с помощью микроскопа и зарисовать схемы структур шести образцов из углеродистых сталей с различным содержанием углерода. Для доэвтектоидных сталей определить по микроструктуре содержание углерода.

#### *Оборудование и материалы*

При выполнении лабораторной работы используют:

- 1 Металлографические микроскопы;
- 2 Набор микрошлифов;
- 3 Альбом микроструктур.

#### *Порядок выполнения работы*

1 Пользуясь теоретическими данными и диаграммой состояния железо-углерод, проследить процесс кристаллизации и определить, из каких фаз и структурных компонентов состоят при комнатной температуре структуры сталей с различным содержанием углерода.

2 Изучить с помощью микроскопа и зарисовать структуры представленных для исследования образцов, обозначив структурные составляющие.

3 Освоить методику расчета содержания углерода по микроструктуре доэвтектоидных сталей.

4 Разобраться в практическом применении углеродистых сталей в зависимости от содержания углерода и структуры.

#### *Содержание отчета*

Отчет должен включать: название и цель работы; определение углеродистых сталей, их классификацию по содержанию углерода и микроструктуре в равновесном состоянии; вычерченную на отдельной странице диаграмму состояния «железо–углерод» со всеми обозначениями; кривые охлаждения из аустенитного состояния для до-, за- и эвтектоидной стали с обозначением превращений, происходящих на отдельных участках; зарисовки микроструктур исследованных сталей: сталей марок 20, 40, 60, У8, У12 и технического железа с обозначением структурных составляющих. Схемы микроструктур необходимо изображать только карандашом в окружностях диаметром 40...45 мм.

#### *Контрольные вопросы*

- 1 Какие сплавы называют сталями?
- 2 Какие стали относят к углеродистым?
- 3 Что понимают под равновесным состоянием сплава?
- 4 Какие компоненты и фазы имеются в системе «железо-углерод»?
- 5 Что такое перлит?

6 Как подразделяется по микроструктуре углеродистые стали в зависимости от содержания в них углерода?

7 Какова структура доэвтектоидных сталей и как она зависит от содержания углерода?

8 Каковы структура, свойства и применение эвтектоидных и заэвтектоидных сталей?

9 Как рассчитать содержание углерода в доэвтектоидной стали по ее микроструктуре?

10 От чего зависят свойства сталей?

11 Для каких деталей и изделий может быть применена та или иная сталь?

### *Лабораторная работа № 5*

## **МИКРОСТРУКТУРА ЧУГУНОВ**

### *Цель работы*

Изучение микроструктуры белых, серых, ковких и высокопрочных чугунов. Установление связи между их структурой и свойствами.

### *Общие сведения и указания*

*Чугуны* – железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода более 2,14 %. В технических чугунах, кроме основных компонентов (железа и углерода), содержатся постоянные примеси (марганец, кремний, сера, фосфор), как правило, в больших количествах, чем в углеродистых сталях.

Структура и основные свойства чугуна зависят не только от химического состава, но и от процесса выплавки, условий охлаждения отливки и режима термической обработки.

Углерод в чугунах может быть двух видов: химически связанный (цементит  $Fe_3C$ ) и свободный (графит). В зависимости от того, в каком виде присутствует углерод в сплавах и какова форма графитных включений, различают чугуны белые, серые, высокопрочные и ковкие. Названия «белый» и «серый» чугун определяются цветом излома, название «ковкий» – условное.

Чугуны (кроме белых), широко применяются в качестве конструкционных материалов, так как обладают, при относительной дешевизне, хорошими литейными свойствами, высокой износостойкостью, антифрикционными свойствами и хорошо обрабатываются резанием. Механические свойства чугунов по сравнению со сталью более низки, они практически не деформируются.

**Белыми** называют чугуны, у которых весь углерод находится в связанном состоянии в виде цементита. Эти чугуны, фазовые превращения которых протекают согласно диаграмме «железо–цементит» (рис. 13), подразделяют

на доэвтектические (от 2,14 до 4,3 % углерода), эвтектические (4,3 % углерода) и заэвтектические (более 4,3 до 6,67 % углерода).

Рассмотрим процесс формирования структуры доэвтектического белого чугуна, (рис. 17, линия I) при медленном охлаждении из жидкого состояния с помощью кривой охлаждения (рис. 18). Процесс кристаллизации начинается при температуре точки I с выделения из жидкой фазы кристаллов аустенита. При снижении температуры жидкий сплав обогащается углеродом, концентрация его изменяется по линии ликвидус на участке I–С. Первичная кристаллизация этого сплава заканчивается эвтектическим превращением при 1147 °С (участок 2–2'), когда жидкость концентрации 4,3 % углерода кристаллизуется в две твердые фазы – аустенит (2,14 % углерода) и цементит, образуя эвтектику, называемую *ледебурит*.

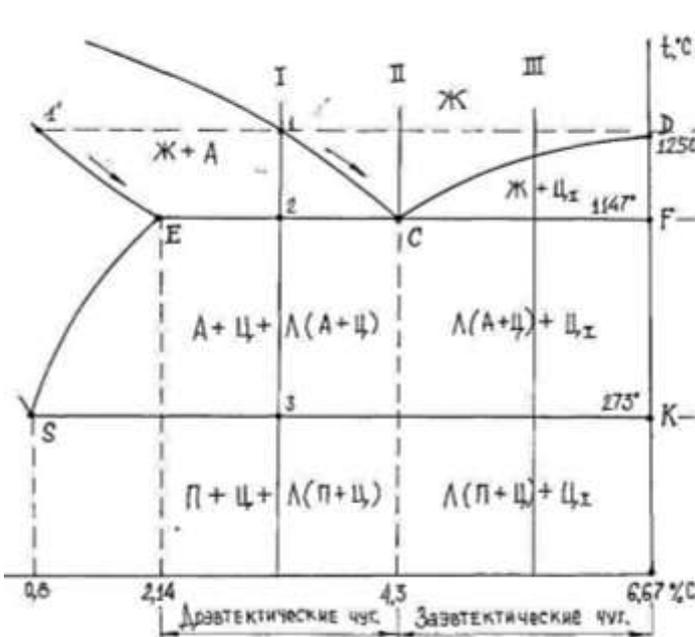


Рис.17. Диаграмма «железо–углерод» (участок чугунов)

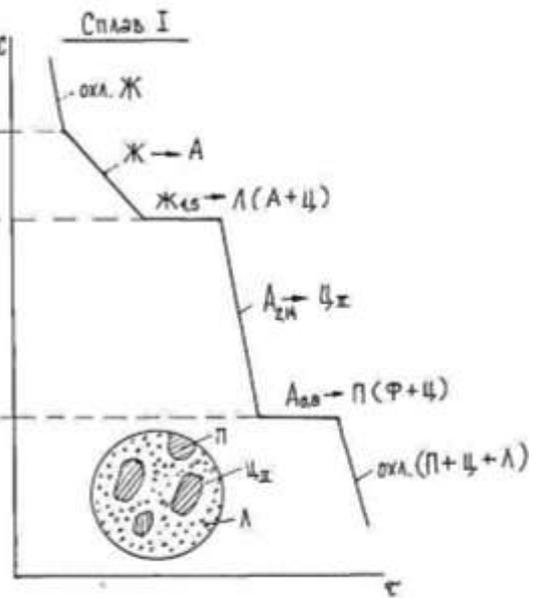


Рис. 18. Кривая охлаждения доэвтектического белого чугуна

В сплаве II, точно соответствующем концентрации 4,3 % углерода, происходит только эвтектическая кристаллизация, протекающая при постоянной температуре. В заэвтектических сплавах (сплав III), содержащих углерода более 4,3 %, эвтектическому превращению предшествует выделение из жидкости первичного цементита.

При снижении температуры от 1147 до 727 °С (участок 2'–3) растворимость углерода в аустените снижается, из аустенита выделяется избыточный вторичный цементит. Содержание углерода в остающемся аустените снижается, достигая 0,8 % при 727 °С, и он при постоянной температуре (3–3') превращается в пластинчатый перлит.

Окончательная структура доэвтектического белого чугуна, схема которой изображена на рис. 18, представляет собой крупные зерна перлита, отороченные каймой вторичного избыточного цементита и окруженные ледебу-

ритом. Рекомендуем обратить внимание на то, что при температуре ниже 727 °С ледебурит представляет механическую смесь перлита и цементита.

Микроструктура *эвтектического* белого чугуна (сплав II) включает только ледебурит: мелкие темные зерна перлита различной формы (круглые или вытянутые), окруженные цементитом. Ледебурит может быть грубого и более тонкого строения в зависимости от размера перлитных зерен.

Микроструктура *заэвтектического* чугуна (сплав III) содержит крупные кристаллы первичного цементита (видимые на шлифе в виде белых полос), выпавшего в интервале температур между линиями ликвидус и солидус (*CD* и *CF*), окруженные ледебуритом. С повышением содержания углерода в заэвтектическом чугуне количество первичного цементита возрастает, а количество ледебурита уменьшается.

Из-за большого количества цементита (эвтектического, первичного и вторичного) белые чугуны очень тверды, хрупки, не обрабатываются резанием и для изготовления деталей машин не используются. Ограниченное применение имеют отбеленные чугуны – отливки из серого чугуна со слоем белого в виде твердой корки на поверхности. Из них изготавливают шары для шаровых мельниц, прокатные валки, лемехи плугов и другие детали, работающие в условиях повышенного износа.

В промышленности широко применяют серые, высокопрочные и ковкие чугуны, в которых весь углерод или его часть находится в виде графитовых включений.

*Графитизацией* чугуна называется процесс выделения углерода в свободном состоянии, т.е. в виде графита. Графит обеспечивает пониженную твердость, высокие антифрикционные свойства вследствие низкого коэффициента трения, хорошо обрабатывается резанием. Вместе с тем включения графита снижают прочность и пластичность, так как нарушают сплошность металлической основы сплава.

Графит в структуре чугунов может появляться двумя путями: при кристаллизации непосредственно из жидкой или твердой фазы (аустенита) в условиях медленного охлаждения, а также в результате распада неустойчивого химического соединения – цементита – при определенных условиях (нагреве). На процесс графитизации в основном оказывает влияние химический состав чугуна и скорость охлаждения.

В чугунах графит выделяется в форме пластин – пластинчатый графит, хлопьев – хлопьевидный графит, шариков – шаровидный графит.

**Серыми** называют чугуны с пластинчатой формой графита. В микроструктуре чугуна следует различать металлическую основу и графитные включения. По строению металлической основы чугуны разделяют на:

- *перлитный*, структура которого состоит из перлита с включениями графита в виде прожилок. Как известно, перлит содержит 0,8 % угле-

рода, следовательно, это количество углерода в сером перлитном чугуна находится в связанном состоянии (в виде  $\text{Fe}_3\text{C}$ ), остальной углерод – в свободном виде в форме графита;

- *феррито-перлитный*, структура которого состоит из феррита, перлита и включений пластинчатого графита. В этом чугуна количество связанного углерода менее 0,8 % углерода;
- *ферритный*, в котором металлической основой является феррит, а весь углерод, имеющийся в сплаве, присутствует в форме графита.

Металлическая основа чугунов похожа на структуру сталей: эвтектоидной, доэвтектоидной и технически чистого железа. Следовательно, по структуре серые чугуны отличаются от стали только тем, что в чугунах имеются графитные включения, определяющие специфические свойства чугунов.

Графит имеет низкие механические свойства, поэтому его можно рассматривать как пустоты, разобщающие металлическую основу. Пластинчатый графит, будучи острым надрезом (трещиной) внутри металла, является активным концентратором напряжений. Поэтому предел прочности при сжатии и твердость чугуна зависят главным образом от строения металлической основы и мало отличаются от свойств стали. Сопротивление разрыву, изгибу и кручению чугунов низкое, и в основном обуславливается количеством, формой и размерами графитных включений.

Графит оказывает и положительное влияние на свойства чугунов. Обладая «смазывающим» действием, графит повышает антифрикционные свойства чугуна и его износостойкость, улучшает обрабатываемость резанием, делая стружку ломкой. Кроме того, серый чугун мало чувствителен к надрезам и дефектам поверхности. Благодаря графиту быстро гасятся вибрации.

**Ковкими** называют чугуны с хлопьевидным графитом, которые получают из белого чугуна в результате специального графитизирующего отжига. При отжиге цементит белого (обычно доэвтектического) чугуна распадается, образуя включения графита хлопьевидной формы. Такая форма включений обуславливает более высокие характеристики прочности и пластичности ковких чугунов в сравнении с серыми.

Механические свойства ковких чугунов определяются как количеством и размером графитных включений, так и структурой металлической основы. В зависимости от режима отжига металлическая основа, так же, как и в серых чугунах, может быть ферритной, феррито-перлитной и перлитной.

Отливки из ковкого чугуна применяют для деталей, работающих в тяжелых условиях износа, при ударных и вибрационных нагрузках: вилки карданных валов, звенья и ролики цепей конвейеров, муфты, концевые краны и наконечники рукавов тормозных систем подвижного состава. Однако изде-

лия из ковкого чугуна относительно дороги из-за длительной термической обработки.

**Высокопрочными** называют чугуны, в которых графит имеет шаровидную форму. Эти чугуны получают модифицированием жидкого сплава незначительным количеством магния, церия, кальция и других элементов. В присутствии модификатора графит в процессе кристаллизации приобретает шаровидную форму. Металлическая основа высокопрочных чугунов также может быть ферритной, феррито-перлитной и перлитной. Округлые включения шаровидного графита не создают резкой концентрации напряжений, и высокопрочные чугуны обладают более высокими механическими свойствами.

Высокопрочные чугуны могут быть использованы взамен обычного серого, ковкого чугунов, литой и ковкой стали, так как наряду с высокой прочностью обладают некоторой пластичностью. Из них изготавливают шпиндели станков, прокатные валки, станины, рычаги, коленчатые валы дизеля тепловоза и т.п.

Таким образом, серые, ковкие и высокопрочные чугуны различаются между собой формой графитных включений, а внутри каждой группы строением металлической основы. На рис. 19 приведена классификация чугунов по структуре.

**Половинчатые чугуны.** При частичной графитизации цементита в структуре белого чугуна появляется графит. Чугун, в структуре которого одновременно присутствуют цементит (или ледебурит) и графит, называется половинчатым (или по структуре металлической основы – перлито-цементитным). Структура половинчатого чугуна состоит из черных включений графита, которые располагаются в перлитной основе, и вторичного цементита (или ледебурита с типичным для него строением). Наличие ледебурита и вторичного цементита повышает износостойкость, твердость и хрупкость отливок, но затрудняет механическую обработку. Такая структура часто появляется на поверхности чугунных отливок.

### *Рабочее задание*

С помощью микроскопа изучить и зарисовать схемы структур белых, серых, ковких и высокопрочных чугунов.

### *Оборудование и материалы*

Для выполнения лабораторной работы необходимы:

- 1 Металлографические микроскопы;
- 2 Набор микрошлифов;
- 3 Альбом микроструктур.

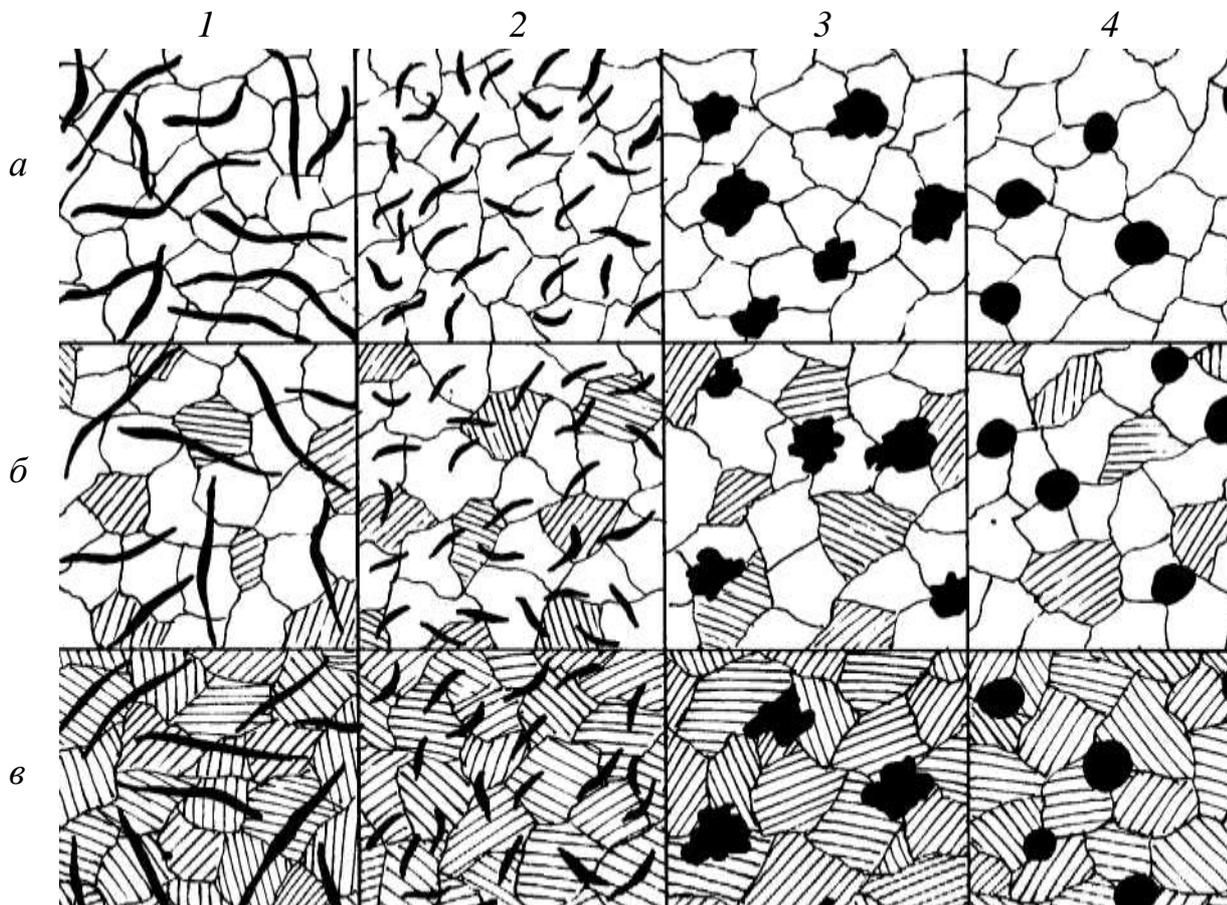


Рис. 19. Классификация чугунов по структуре металлической основы и форме графитных включений: *а* – феррит, *б* – феррит и перлит, *в* – перлит; *1* – пластинчатая, *2* – завихренная, *3* – хлопьевидная, *4* – шаровидная

#### *Порядок выполнения работы*

1 Изучить по теоретическим данным и диаграмме состояния «железо-углерод» (участок чугунов) процессы кристаллизации белых чугунов и определить, из каких фаз и структурных составляющих состоят их структуры.

2 Разобраться в строении металлической основы и формах графитных включений серых, ковких и высокопрочных чугунов.

3 Рассмотреть под микроскопом и зарисовать схемы структур чугунов по заданию преподавателя, обозначив структурные составляющие.

4 Разобраться в положительных и отрицательных свойствах разных чугунов как конструкционных материалов.

#### *Содержание отчета*

В отчет должны быть включены название и цель работы; определение чугунов; классификация чугунов в зависимости от вида углерода в сплавах, формы графитных включений, строения металлической основы; вычерченный «чугунный» участок диаграммы «железо-цементит»; кривые охлаждения

ния до-, заэвтектического белого чугуна с обозначением соответствующих превращений; схемы структур чугунов с обозначением структурных составляющих; белого до- и заэвтектического, феррито-перлитного и перлитного серого, перлитно-цементитного (половинчатого) и ферритного ковкого; описание их характеристик и возможного применения для деталей железнодорожного транспорта.

### *Контрольные вопросы*

- 1 Какие сплавы называются чугунами?
- 2 В каких видах может быть углерод в чугунах?
- 3 Какой чугун называется белым, серым, ковким, высокопрочным?
- 4 Как подразделяются белые чугуны в зависимости от содержания углерода?
- 5 Что представляют собой структурные составляющие чугунов: перлит, цементит, ледебурит?
- 6 Какова структура при нормальной температуре до-, за- и эвтектического белого чугуна?
- 7 Назовите основные свойства и область применения белых чугунов.
- 8 Что такое графитизация?
- 9 Что представляет собой серый чугун, каковы его свойства?
- 10 Какая металлическая основа может быть у чугунов с графитом? От чего это зависит?
- 11 Каковы формы графитных включений и в каких чугунах они находятся?
- 12 Как зависят свойства чугунов от формы графитных включений?
- 13 Каково практическое применение серых, ковких и высокопрочных чугунов?
- 14 Что такое половинчатый чугун?

### *Лабораторная работа № 6*

## **МИКРОСТРУКТУРА ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ**

### *Цель работы:*

Знакомство со структурой наиболее распространённых на железнодорожном транспорте легированных сталей, влиянием легирующих элементов на свойства сталей и методами термической обработки сталей для получения требуемых свойств.

### *Общие сведения о легированных сталях*

Углеродистые стали, обладают свойствами, зависящими от содержания углерода. Углерод – основной элемент, определяющий прочность, твёрдость,

пластичность и вязкость стали. С повышением содержания углерода прочность и твёрдость возрастают, а пластичность и вязкость уменьшаются. Основными недостатками углеродистых сталей являются малая прокаливаемость, низкая теплостойкость для инструментальных сталей и большая зависимость вязкости и пластичности от содержания углерода.

Вводимые в сталь легирующие компоненты не заменяют углерод – основной упрочняющий компонент, а позволяют улучшить механические характеристики конструкционных сталей и повысить теплостойкость инструментальных сталей. Легирующие компоненты позволяют в большей мере повысить прочность, чем снизить вязкость стали. Этим и объясняется широкое использование легированных сталей как конструкционных, так и инструментальных. Влияние легирующих компонентов зависит от вида компонента, содержания и комбинации. Наиболее распространены такие легирующие компоненты, как хром, вольфрам, ванадий, титан, никель, кремний, марганец в увеличенном количестве и другие. Рассмотрим каждый из них в отдельности.

*Марганец* – дешёвый легирующий компонент, упрочняющий ферритную составляющую стали, с железом образует комплексный карбид, несколько снижает пластичность, увеличивает прокаливаемость, снижает критическую скорость закалки, расширяет область аустенита и понижает критические температуры, способствует росту зерна и появлению отпускной хрупкости. Марганцовистые стали широко распространены от 09Г2 до 65Г. В связи с повышенной чувствительностью к отпускной хрупкости рекомендуется подвергать их не закалке и отпуску, а нормализации.

*Кремний* – также недорог и широко применяется для легирования сталей. Он растворяется в феррите и влияет на свойства сталей аналогично марганцу, но не вызывает появления отпускной хрупкости, в меньшей мере влияет на рост зерна. Кремний повышает упругость стали, поэтому водится в пружинно-рессорные стали (50С2, 55С2). Наиболее благоприятно влияет при комплексном легировании.

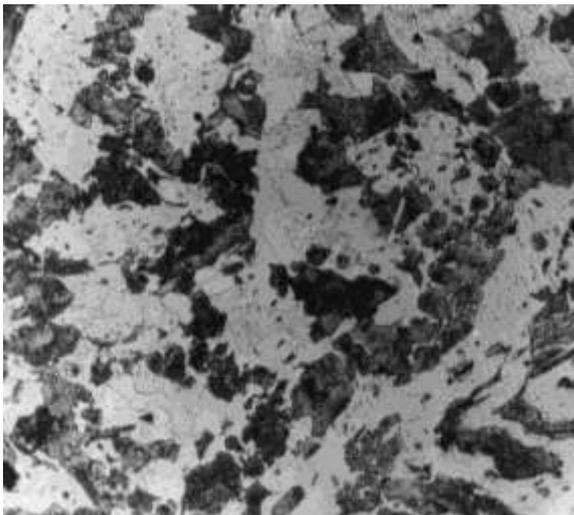
*Хром* – недефицитен и недорог, поэтому широко применяется в качестве легирующего компонента. Он частично растворяется в феррите и образует карбиды, упрочняет сталь, при этом несколько снижает вязкость. Значительно снижает критическую скорость охлаждения при закалке и увеличивает прокаливаемость. Вызывает появление отпускной хрупкости и образование флокенов в слитках.

*Вольфрам, ванадий и титан* образуют стойкие и очень дисперсные карбиды, поэтому повышают прочность и твёрдость сталей. Они дороги и поэтому не применяются как самостоятельные компоненты. Способствуют получению мелкого зерна в стали.

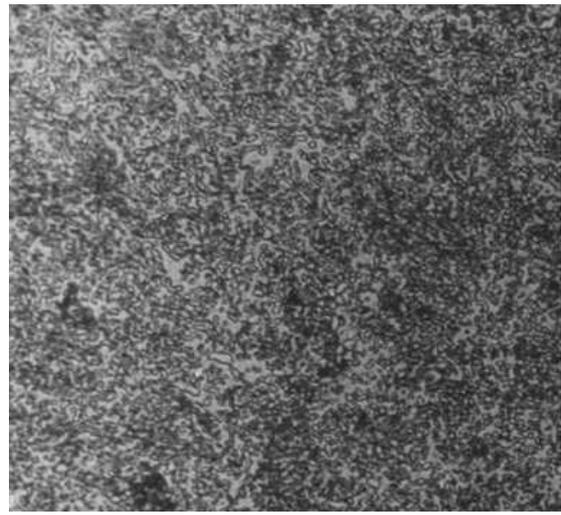
*Никель* – очень дефицитный металл. Повышает практически все механические характеристики (прочность, вязкость и пластичность), вызывает появление отпускной хрупкости. Понижает критические температуры и снижает критическую скорость закалки. Никель не применяется как самостоятельный легирующий компонент, а используется в комплексе с хромом и другими добавками. Наиболее благоприятно влияет при соотношении никель–хром, равном 2...4. При введении вольфрама снижается склонность к отпускной хрупкости. Стали с добавками никеля применяют для наиболее ответственных деталей, испытывающих сложное напряжённое состояние: поршневые пальцы (12ХНЗА), шатуны (18ХНВА) и т. п. В последние годы никель часто заменяется марганцем, но последний снижает пластичность и повышает склонность к росту зерна. В такие стали вводят дополнительно титан или бор, которые препятствуют росту зерна в стали (30ХГТ, 30ХГР).

Предел прочности у легированных конструкционных сталей значительно выше, чем у углеродистых с таким же содержанием углерода, это способствует снижению веса изделий без ущерба для прочности, в то же время вязкость остается очень высокой. Такие стали технологичны, хорошо свариваются. В вагоностроении используются легированные стали типа 09Г2, 10ГС, 12Г2С, что существенно снижает вес конструкции.

Конструкционные стали – низколегированные. Они содержат не более 5 % легирующих добавок. Такие количества легирующих добавок практически не изменяют структуры сталей. Она у конструкционных сталей остается феррито-перлитной, внешне мало отличающейся от структуры углеродистой стали с таким же содержанием углерода.



×150



×200

Рис. 20. Микроструктура стали 30ХГСА    Рис. 21. Микроструктура стали ХВГ

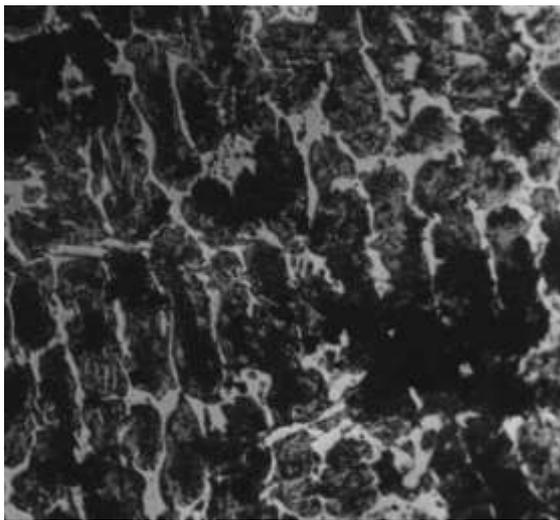
Упрочнение достигается закалкой с отпуском или нормализацией. Особенно широко применяются легированные стали для изготовления инструментов: режущих и штамповых. Для этих целей применяются низколегированные стали типа 9ХС, Х, ХГ, ХВГ, используемые для изготовления сверл, метчиков, фрез, калибров и т.п. Их теплостойкость (способность сохранять твёрдость при нагреве) сравнительно невелика (300...350 °С), поэтому скорости резания при использовании такого инструмента должны быть невысокими. Структура низколегированных инструментальных сталей после нормализации состоит из сорбита или сорбитообразного перлита.

Более высокой теплостойкостью (до 600 °С) обладают высоколегированные стали, представителем которых может быть группа быстрорежущих сталей. Стали этой группы легированы карбидообразующими элементами: вольфрамом, ванадием, хромом, молибденом. Химический состав типичных быстрорежущих сталей представлен в таблице 4.

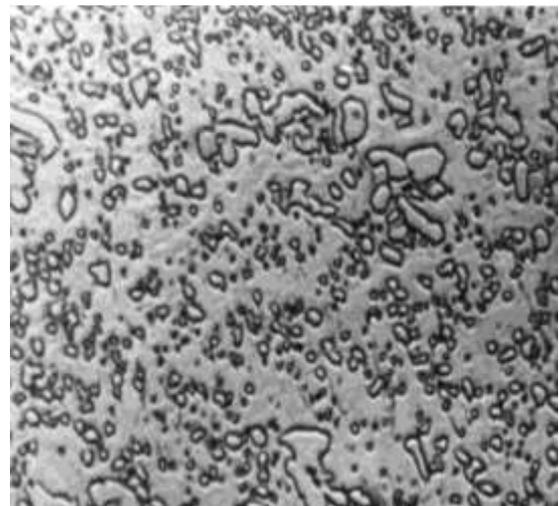
Таблица 4

Марка стали	С, %	Cr, %	V, %	W, %
P18	0,7 – 0,8	3,8 – 4,4	1,0 – 1,4	17,0 – 18,5
P9	0,85 – 0,95	3,5 – 4,4	2,0 – 2,6	8,5 – 10,0
P6M5	0,80 – 0,90	3,8 – 4,4	1,8 – 2,2	5,5 – 6,5

По структуре после отжига эти стали относятся к ледебуритному классу, так как в результате перемещения точки *E* на диаграмме влево в структуре стали появляется ледебурит, обычно свойственный белым чугунам.



×250



×400

Рис. 22. Микроструктура быстрорежущей стали P18 в литом состоянии

Рис. 23. Микроструктура ковальной закаленной быстрорежущей стали P18

Структура этих сталей содержит зерна продуктов распада легированного аустенита и ледебурита, содержащих в значительных количествах легирующие компоненты в виде карбидов. При наличии такой структуры сталь обладает повышенной хрупкостью, поскольку ледебурит, включающий карбиды, хрупок. Для снижения хрупкости, сталь подвергают горячей обработке давлением (ковке или прокатке). При этом происходит разрушение сетки карбидов легирующих элементов, находящихся в продуктах распада аустенита. Подобная структура при сохранении твёрдости менее хрупка. Такими же свойствами будет обладать и инструмент.

По структуре в нормализованном состоянии сталь относится к мартенсит-ному классу, т.е. закаливается после охлаждения на воздухе. Поэтому эти стали называют «самокальными».

Термическая обработка быстрорежущих сталей выполняется по режиму, показанному на рис. 24.

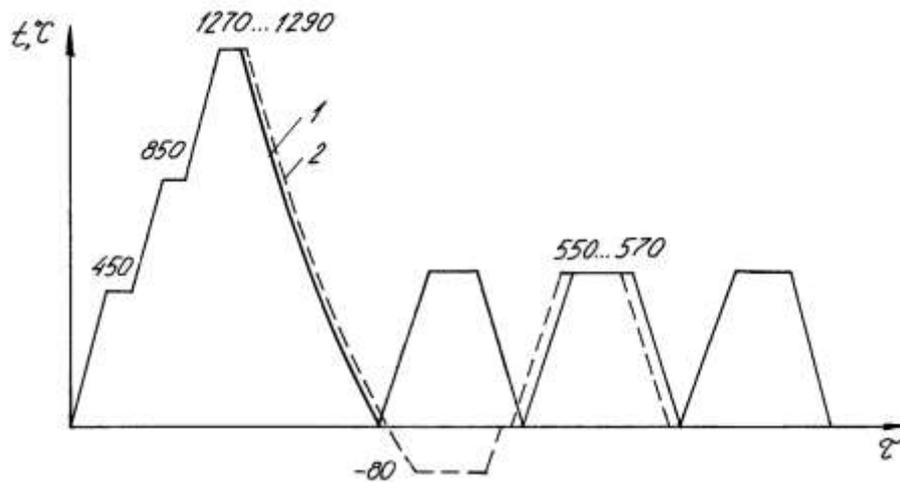


Рис. 24. Схема термической обработки быстрорежущей стали:  
1 – без обработки холодом; 2 – с обработкой холодом

Температура нагрева для закалки выбирается высокой, чтобы полнее растворить в аустените карбиды легирующих компонентов и повысить легированность аустенита. После закалки, которую рекомендуется производить охлаждением в масле, в стали кроме высоколегированного мартенсита остается 30...35 % остаточного аустенита, снижающего твердость. Уменьшение содержания остаточного аустенита достигается обработкой холодом (охлаждением до минус 80 °С) и одно- или двукратным отпуском. Если обработка холодом не производилась, необходим трехкратный отпуск. Легированный аустенит стоек к нагреву и только при охлаждении ниже температуры мартенситного превращения ( $M_n$ ) частично превращается в мартенсит. Более трех отпусков производить экономически нецелесообразно. Стали марок Р9 и Р18 содержат много дефицитного вольфрама, поэтому их сейчас заменяют более дешевыми сталями типа Р6М5, Р6М3, Р6Ф5 и т.п.

*Рабочее задание*

Изучить структуру конструкционных и инструментальных сталей типа 30ХГСА, ХВГ и Р18 в литом и ковном состоянии. Зарисовать эти структуры в тетради для лабораторных работ и сопроводить каждую структуру кратким описанием.

*Оборудование и приборы*

- 1 Металлографические микроскопы МИМ-7, МИМ-6.
- 2 Наборы микрошлифов легированных сталей (30ХГСА, ХВГ, Р18 в литом и Р18 в ковном состоянии).
- 3 Альбом микрофотографий структур.

*Порядок выполнения работы*

Настроить микроскопы. Изучить микроструктуру представленных в наборе образцов легированных сталей. Зарисовать микроструктуры в тетрадь для лабораторных работ и дать краткое описание в отчете.

В отчете кратко изложить влияние легирующих элементов на структуру и свойства конструкционных и инструментальных сталей, осветить методы термической обработки, которые применяются для упрочнения легированных сталей конструкционных и инструментальных. Особо описать термическую обработку быстрорежущих сталей с освещением ее особенностей. Структуры изображать карандашом, стараясь более точно воспроизвести их внешний вид.

*Лабораторная работа № 7*

## **МИКРОСТРУКТУРА ЦВЕТНЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ СПЛАВОВ**

*Цель работы*

Изучение свойств и микроструктуры антифрикционных сплавов на основе меди, олова и свинца, имеющих наибольшее распространение на железнодорожном транспорте.

*Общие сведения и указания*

В подшипниках скольжения между осью и втулкой происходит трение, вызывающее износ обеих деталей. Для повышения срока службы трущихся поверхностей, вкладыши подшипников изготавливают из специальных антифрикционных сплавов. Они предохраняют от износа шейку вала, создают условия для нормальной смазки подшипника, уменьшают коэффициент трения и износ подшипника.

Структура подшипникового материала представляет собой сочетание достаточно прочной, относительно пластичной и вязкой основы, в которой имеются твердые опорные включения. При этих условиях изнашивается пластичная основа, обеспечивает прирабатываемость пары трения; вал в основном лежит на твёрдых опорных включениях и, следовательно, трение идёт не по всей поверхности подшипника, и смазка удерживается в изнашивающихся частях пластичной основы.

Схематически условия, создающиеся при работе вала с вкладышем, показаны на рис. 25.

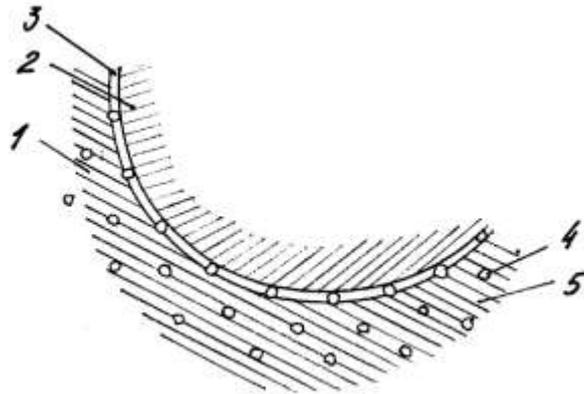


Рис. 25. Поверхность раздела «подшипник–вал»: 1 – вкладыш; 2 – вал; 3 – пространство для смазки; 4 – твердые включения; 5 – основа

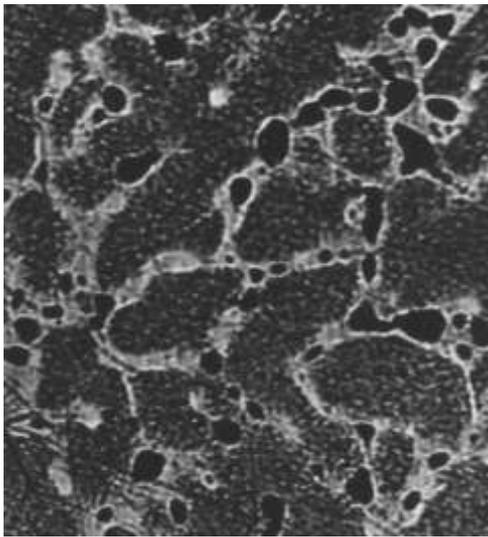
К антифрикционным материалам относятся сплавы на основе олова и свинца (баббиты), меди, алюминия, цинка, антифрикционные чугуны и порошковые подшипниковые материалы. Рассмотрим подробно наиболее распространённые на железнодорожном транспорте бронзы и баббиты.

Различают две основные группы медных сплавов: латуни (сплавы меди с цинком) и бронзы (сплавы меди с оловом и другими элементами). Медные сплавы обладают высокими механическими и технологическими свойствами, хорошо сопротивляются износу и коррозии. Оловянистые бронзы – это сплавы меди с оловом, содержащие олова до 15 %. Дополнительно в оловянистые бронзы вводят: фосфор для раскисления сплава и для повышения жидкотекучести; свинец – для улучшения антифрикционных свойств и лучшей обрабатываемости резанием; цинк – для удешевления сплавов. На железнодорожном транспорте для изготовления вкладышей подшипников и втулок применяется бронза марок Бр ОФ 10-1, Бр ОЦС 5-5-5, Бр ОЦ 10-2, Бр ОС 5-25 и др.

Чаще всего бронзы в качестве антифрикционных сплавов используют в литом состоянии. Это объясняется тем, что при затвердевании в них образуется резко выраженная дендритная структура, причём в осях дендритов, представляющих твердый раствор олова в меди ( $\alpha$ ), олова меньше, чем в межосных пространствах. Последние являются более твердыми вследствие появления участков эвтектоида  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_3$ . При работе детали твердые прослойки

служат опорой, а мягкие участки обеспечивают прирабатываемость и способствуют образованию на поверхности мельчайших каналов, по которым может циркулировать смазка.

Свинец в сплавах с медью находится в виде обособленных включений, так как не образует с ней каких-либо соединений. Включения свинца, которые могут быть различных размеров, располагаются обычно по границам зёрен. Цинк в бронзах находится в виде твердого раствора с медью (так же, как и олово) и никаких отдельных структурных составляющих не образует. На рис. 26 представлена в качестве примера структура бронзы Бр ОЦС 5-5-5.



×100

Рис. 26. Микроструктура бронзы Бр ОЦС 5-5-5

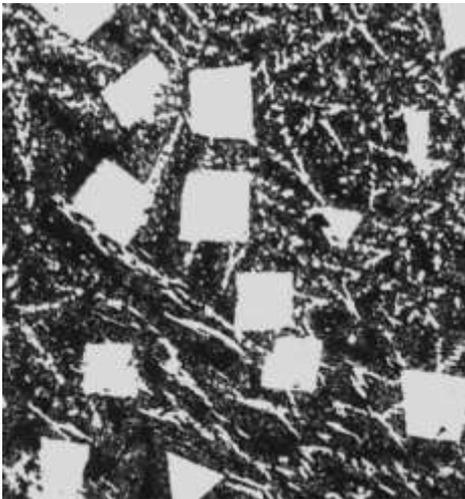
Баббиты – антифрикционные сплавы на основе олова или свинца. Для того чтобы на основе мягкого и непрочного олова получить антифрикционный сплав, вводят элементы, которые упрочняют сплав, и образуют твердые включения. Для этой цели служат добавляемые к олову сурьма и медь. Сурьма растворяется в олове с образованием твердого раствора, который имеет большую твердость и прочность, чем чистое олово, при той же пластичности. Кроме того, сурьма с оловом образует химическое соединение SnSb с высокой твердостью. Таким образом, сурьма упрочняет основу оловянистых антифрикционных сплавов и создает опорные включения высокой твердости в виде химических соединений. Медь с оловом образует кристаллы химического соединения  $Cu_3Sn$ .

Структура оловянистого баббита Б83 (83 % Sn, 11 % Sb, 6 % Cu) приведена на рис. 27. Темный фон – твердый раствор, крупные светлые кристаллы – SnSb, мелкие светлые кристаллы –  $Cu_3Sn$ .

Так как олово – дорогой и дефицитный элемент, оловянистые баббиты применяют только в особо ответственных случаях (для вкладышей подшипников сильно нагруженных машин, например турбин, дизелей и др.). Для подшипников более широкого применения в баббиты в значительных коли-

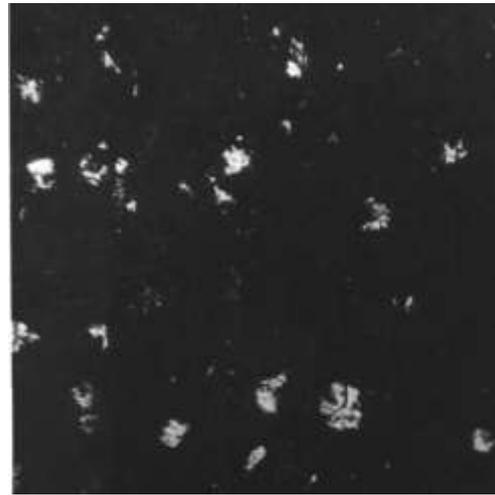
чествах вводят свинец и понижают содержание олова до 5...17 %. В таких сплавах (Б16, Б10, Б6) основой служит уже свинец. Для упрочнения свинца и создания твердых частиц, кроме олова, вводят также сурьму и медь. Например, баббит Б16 содержит 16 % Sn, 16 % Sb и до 2 % Cu, остальное Pb.

Для подшипников железнодорожного транспорта широкое применение получили баббиты, состоящие почти из одного свинца, в которые вводят незначительное количество (до 1 %) щелочноземельных элементов – Na, Ca (баббиты марки БК и БК2). В этих баббитах (рис. 28) основа, т.е. свинец, упрочняется натрием, так как образуется раствор натрия в свинце. Твердые же включения образует кальций, дающий химическое соединение  $Pb_3Ca$ .



×100

Рис. 27. Микроструктура баббита Б83



×100

Рис. 28. Микроструктура баббита БК

#### *Рабочее задание*

Исследовать с применением микроскопа и зарисовать схемы структур антифрикционных сплавов – бронз и баббитов.

#### *Оборудование и материалы*

При выполнении лабораторной работы применяется:

- 1 Микроскоп;
- 2 Набор микрошлифов бронз и баббитов;
- 3 Альбом микроструктур.

#### *Порядок выполнения работы*

- 1 Изучить теоретический материал по теме работы.
- 2 Разобраться в принципах построения структуры антифрикционных сплавов.
- 3 Рассмотреть структуры бронз и баббитов под микроскопом.
- 4 Зарисовать схемы микроструктур.

### *Содержание отчета*

Отчет по работе должен содержать: название и цель работы; кратко общие сведения об антифрикционных материалах; схему поверхности раздела «вкладыш–вал» с описанием принципа образования структуры подшипниковых сплавов; определения бронз и баббитов; схемы микроструктур бронз БрОС 5-25 и БрОЦС 5-5-5, баббитов Б83, Б16, БК с обозначением структурных составляющих.

### *Контрольные вопросы*

- 1 Какие требования предъявляются к антифрикционным сплавам?
- 2 Какова должна быть структура подшипниковых материалов?
- 3 Какие антифрикционные материалы наиболее распространены на железнодорожном транспорте?
- 4 Что такое бронзы?
- 5 Для чего в состав бронз вводят фосфор, свинец, цинк?
- 6 Из каких структурных компонентов состоит структура антифрикционных бронз?
- 7 Какие сплавы называют баббитами?
- 8 С какой целью в состав оловянных баббитов включаются сурьма и медь?
- 9 Какой металл является основой баббитов типа Б16, БН?
- 10 Каков состав и структура баббита БК?

### *Лабораторная работа № 8*

## **ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ. ЗАКАЛКА**

### *Цель работы*

Изучить основные положения теории и практики термической обработки углеродистой стали (закалка); овладеть методом выбора температуры нагрева стали путем пробных закалок.

### *Общие сведения и указания*

Термическая обработка деталей и заготовок предназначена для получения заданных свойств за счет изменения структуры металла. Любой процесс термической обработки (закалка, отпуск, отжиг) заключается в нагреве до определенной температуры, выдержке и последующем охлаждении. Режим термической обработки характеризуют следующие основные параметры: температура нагрева  $t_{max}$ , т.е. максимальная температура, до которой может быть нагрет сплав при термической обработке; время выдержки сплава при температуре нагрева  $\tau_6$ ; скорость нагрева  $V_{нагр}$  и скорость охлаждения  $V_{охл}$

. Режим термической обработки чаще всего задается в виде графика в координатах «температура – время».

Основой рассмотрения термической обработки стали является диаграмма Fe–C (до 2,14 % углерода) (рис. 29).

В термической обработке стали принято критические точки обозначать буквой *A*. Нижняя критическая точка, обозначаемая  $A_1$ , лежит на линии PSK и соответствует превращению аустенит ↔ перлит, верхняя критическая точка  $A_3$  лежит на линии GSE и соответствует началу выпадения или концу растворения феррита в доэвтектоидных сталях или цементита (вторичного) в заэвтектоидных сталях. При нагреве точки обозначают  $Ac_1$  и  $Ac_3$ , а при охлаждении  $Ar_1$ , и  $Ar_3$  (точку  $Ac_3$  часто обозначают  $Acm$ ).

Рассмотрим подробнее один из основных видов термической обработки – закалку.

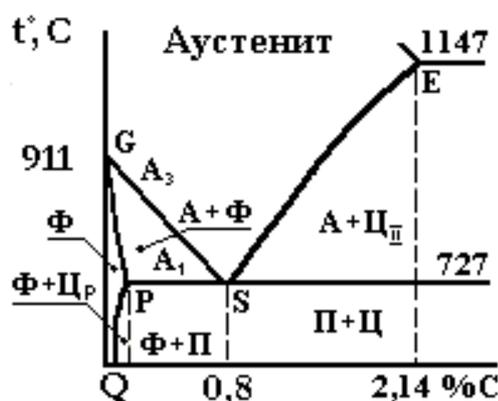
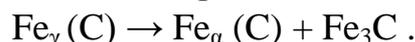


Рис. 29. «Стальной» участок диаграммы состояния

*Закалкой* называют процесс термической обработки, состоящий в нагреве стали до температуры выше критической, выдержке и последующем быстром охлаждении. При этом фиксируется структурно неустойчивое состояние сплава. Практической целью закалки является повышение твердости, прочности и износостойкости стали.

В зависимости от температуры нагрева различают полную и неполную закалку стали. *Полной* называют закалку с нагревом до температур однофазной аустенитной области (выше  $Ac_3$ ), а *неполной* – с нагревом до межкритических температур, при которых сохраняется избыточная фаза – феррит или вторичный цементит (выше  $Ac_1$ , но ниже  $Ac_3$ ).

Одним из основных превращений в железоуглеродистых сплавах при охлаждении является превращение аустенита в перлит, которое заключается в распаде аустенита – твердого раствора углерода в  $\gamma$ -железе, на почти чистое  $\alpha$ -железо (феррит) и цементит. Этот процесс имеет диффузионный характер



Температура распада аустенита на феррито-цементитную смесь, его скорость, строение и свойства продуктов распада будут зависеть от скорости охлаждения. Структуру стали после охлаждения ее с различными скоростями

можно определить, наложив кривые охлаждения на диаграмму изотермического превращения переохлажденного аустенита, или так называемые С-образные кривые (рис. 30).

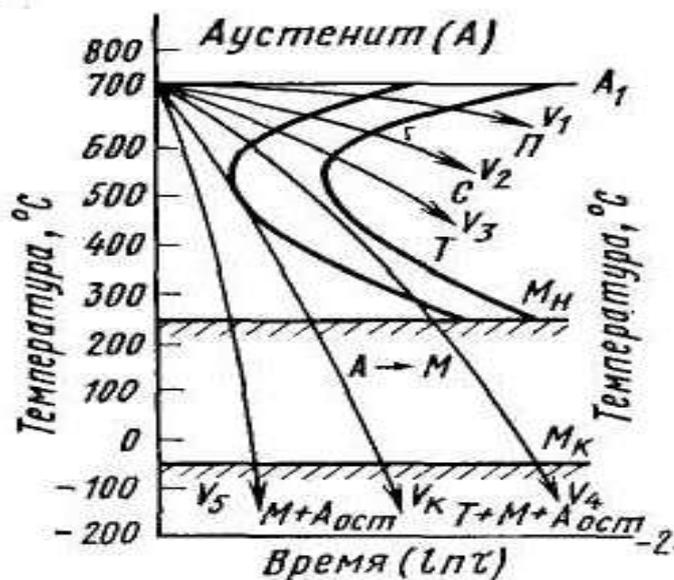


Рис. 30. Диаграмма изотермического распада аустенита с наложенными на нее кривыми охлаждения

При очень медленном охлаждении (со скоростью  $V_1$ ) образуется структура *перлит* – достаточно грубая смесь феррита и цементита. Увеличение скорости охлаждения ( $V_2$ ) приводит к тому, что превращение происходит при более низких температурах. Дисперсность (размельченность) частиц феррита и цементита возрастает, и повышается твердость. Перлит более тонкого строения получил название *сорбит*. При дальнейшем повышении скорости ( $V_3$ ) образуется еще более тонкая структура продуктов распада аустенита – *троостит*.

Перлит, сорбит и троостит – структуры с одинаковой природой (феррито-цементитные механические смеси), отличающиеся степенью дисперсности и свойствами. В основе распада аустенита на указанные механические смеси лежат диффузионные процессы, для осуществления которых необходимо определенное время. Чем больше скорость охлаждения, тем при более низкой температуре произойдет превращение, и тем более размельченными и твердыми будут продукты превращения.

Если охлаждать аустенит с большой скоростью (например,  $V_5$ ), то распад аустенита не успеет произойти, так как диффузия становится невозможной. В этом случае происходит бездиффузионная перестройка кристаллической решетки  $\gamma$ -железа в  $\alpha$ -железо. Атомы углерода, растворенные в аустените, остаются в решетке  $\alpha$ -железа, сильно искажая ее. Происходит превращение аустенита в пересыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе (с

такой же концентрацией, как и у исходного аустенита), который называется *мартенсит*.

Для мартенсита характерна тетрагональная кристаллическая решетка и особая игольчатая структура. Увеличение содержания углерода в стали повышает степень тетрагональности решетки мартенсита. Вследствие сильного искажения кристаллической решетки мартенсит имеет высокую твердость ( $\sim 60 HRC$ ) и является основной структурой закаленной стали. Минимальная скорость охлаждения, необходимая для переохлаждения аустенита до мартенситного превращения, называется *критической скоростью закалки* ( $V_{кр}$ ).

Характерным для мартенситного превращения является то, что даже при температуре конца мартенситного превращения (точка  $M_k$ ) не весь аустенит превращается в мартенсит. Аустенит, не перешедший в мартенсит при данной температуре, называется *остаточным аустенитом*. Аустенитно-мартенситное превращение сопровождается увеличением удельного объема, что является одной из основных причин возникновения при закалке больших внутренних напряжений, которые могут вызвать деформации и трещины.

#### *Рабочее задание*

Провести экспериментальный выбор оптимальной температуры нагрева образцов под закалку методом пробных закалок. Этот метод состоит в закалке при разных температурах стальных образцов с неизвестным содержанием углерода (или образцов известной марки стали с большим колебанием содержания углерода). Далее измеряется твердость закаленных образцов, и по максимальному ее значению выбирается оптимальная температура нагрева под закалку. Необходимо также изучить микроструктуру закаленной стали.

#### *Оборудование и материалы*

Для выполнения лабораторной работы используются:

- стальные образцы для закалки;
- лабораторные электропечи;
- термоэлектрические пирометры;
- ванны с охлаждающей средой;
- щипцы;
- шлифовальная шкурка;
- твердомер Роквелла.

#### *Порядок выполнения работы*

1 Изучить основные теоретические положения термической обработки – закалки. Разобраться с влиянием скорости охлаждения на структуру и свойства стали.

2 Провести закалку образцов при разных температурах нагрева: 750, 825 и 900 °С (по одному образцу).

3 Измерить твердость *HRC* всех образцов, проводя на каждом образце по три замера.

4 Рассчитать среднюю твердость образцов для всех температур закалки. Заполнить рабочую форму, приводимую ниже.

5 Построить график зависимости твердости *HRC* образцов от температуры закалки. Определить оптимальную температуру закалки.

Таблица 5

№ образца	Температура закалки, °С	<i>HRC</i>	<i>HRC<sub>ср</sub></i>
1	750		
2	825		
3	900		

### *Содержание отчета*

В отчете должно быть отражено: название и цель работы; определения: термической обработки, закалки, структуры мартенсита и критической скорости закалки; изображение «стального» участка диаграммы Fe-C и диаграммы изотермического распада аустенита с наложенными кривыми охлаждения; рабочая форма с результатами экспериментов; вывод по работе.

### *Контрольные вопросы*

- 1 Для чего необходима термическая обработка?
- 2 Из каких операций состоит процесс термической обработки?
- 3 Как обозначаются критические температуры при термообработке стали?
- 4 Что называется закалкой стали?
- 5 С какой целью проводят закалку стали?
- 6 Что называется полной и неполной закалкой?
- 7 Назовите продукты распада аустенита при его охлаждении с различной скоростью.
- 8 Что представляют собой перлит, сорбит, троостит? Каковы их свойства?

9 Что такое мартенсит и в чем сущность мартенситного превращения?

10 Какая скорость охлаждения называется критической?

11 Какова микроструктура, кристаллическая решетка мартенсита и его свойства?

### Лабораторная работа № 9

## ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ. ОТПУСК

### Цель работы

Изучить теорию и практику отпуска закаленной стали, определить влияние температуры отпуска на твердость стали.

### Общие сведения и указания

Рассмотренный в предыдущей работе вид термической обработки – *закалка* – не является окончательным процессом. Вследствие увеличения объема, в результате аустенитно-мартенситного превращения, в закаленных на мартенсит деталях высок уровень внутренних напряжений. Сталь, находящаяся в неравновесном структурном состоянии, обладает высокой твердостью и хрупкостью. Поэтому после закалки детали и инструменты всегда подвергаются отпуску.

*Отпуском* называют вид термической обработки, заключающийся в нагреве закаленной стали до температур ниже критической точки  $A_{c1}$ , выдержке при этой температуре и последующем охлаждении. Скорость охлаждения при отпуске не оказывает влияния на получаемую структуру, но от нее заметно зависит величина остаточных напряжений.

*Цель отпуска* – снятие (уменьшение) внутренних напряжений, повышение пластичности стали и получение нужного комплекса механических свойств (твердости, прочности и вязкости). При отпуске неравновесная структура закаленной стали, состоящая из тетрагонального мартенсита и остаточного аустенита, переходит в более устойчивое состояние.

Превращение при отпуске можно зафиксировать с помощью дилатометрической кривой (рис. 31).

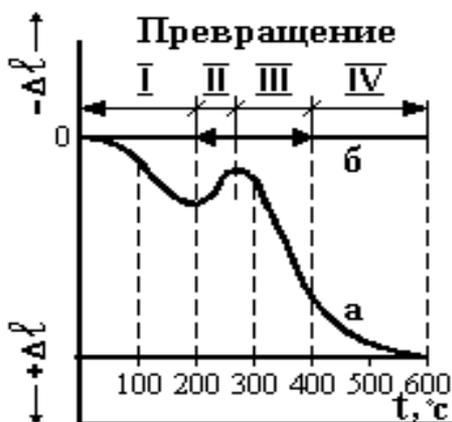


Рис. 31. Дилатометрическая кривая отпуска углеродистой стали:  
а – закаленной; б – отожженной

Дифференциальная схема прибора – дилатометра, измеряющего изменения длины образца при нагреве и охлаждении, позволяет исключить влияние теплового расширения образца и фиксировать только изменения, связанные с превращениями.

При нагреве (отпуске) закаленных углеродистых сталей принято выделять три температурных интервала и соответствующие им три превращения.

*Первое превращение* происходит при нагреве до (100...200) °С. При этих температурах тетрагональность решетки мартенсита постепенно уменьшается, так как из пересыщенного  $\alpha$ -твердого раствора происходит выделение углерода. Углерод выделяется в виде мельчайших пластинок низкотемпературного  $\varepsilon$ -карбида (эпсилон-карбида). Образующийся в результате первого превращения мартенсит называется *отпущенным мартенситом* и представляет собой смесь  $\varepsilon$ -карбида и пересыщенного твердого раствора углерода в  $\alpha$ -железе.

*Второе превращение* происходит при нагреве до (200...300) °С. При этой температуре продолжается распад мартенсита, в результате чего содержание углерода в нем снижается. Кроме того, одновременно происходит распад остаточного аустенита с превращением его в отпущенный мартенсит. Таким образом, после второго превращения в  $\alpha$ -твердом растворе содержится небольшое количество углерода, и тетрагональность решетки незначительна.

*Третье превращение* наблюдается при нагреве до температуры (300...400) °С. Оно характеризуется полным выделением углерода из  $\alpha$ -твердого раствора и снятием внутренних напряжений. Одновременно с этим  $\varepsilon$ -карбид превращается в цементит. В результате третьего превращения образуется наиболее мелкая феррито-цементитная смесь, называемая *трооститом отпуска*.

При нагреве выше 400 °С в углеродистых сталях происходят изменения структуры, не связанные с фазовыми превращениями: протекает коагуляция (укрупнение) и сфероидизация (округление) частиц цементита. При температуре (500...600) °С троостит отпуска превращается в *сорбит отпуска*, (с зернистой формой цементита), а при более высоких температурах (650...700) °С сорбит отпуска превращается в зернистый перлит. Совокупность этих изменений часто называют *четвертым превращением*.

Изменение структуры при нагреве (отпуске) вызывает изменение и механических свойств закаленной стали. С повышением температуры отпуска твердость и прочность понижаются, а плотность и вязкость повышаются.

#### *Рабочее задание*

Провести исследование зависимости твердости закаленных стальных образцов от температуры отпуска.

### Оборудование и материалы

Для проведения лабораторной работы необходимы:

- стальные образцы, закаленные с оптимальной температуры;
- лабораторные электропечи;
- термоэлектрические пирометры;
- щипцы;
- шлифовальная шкурка;
- твердомер Роквелла.

### Порядок выполнения работы

1 Изучить превращения в закаленной стали при отпуске.

2 Произвести отпуск закаленных до твердости 60 *HRC* стальных образцов при температурах 300, 400 и 600 °С (по одному образцу).

3 Измерить твердость *HRC* всех образцов (по три замера на каждом образце). Рассчитав среднюю твердость, заполнить рабочую форму отпуски.

4 Построить график зависимости твердости образцов от температуры отпуски. Сделать вывод о характере зависимости.

Таблица 6

№ образца	Температура отпуски, °С	<i>HRC</i>	<i>HRC<sub>cp</sub></i>
1	200		
2	400		
3	600		

### Содержание отчета

В отчет должны быть включены: название и цель работы; определение отпуски; цель отпуски; дилатометрическая кривая отпуски углеродистой стали; краткое описание превращений при отпуске; рабочая форма с результатами экспериментов; вывод по исследованной зависимости.

### Контрольные вопросы

1 Почему закалка не является окончательным видом термической обработки?

2 Что называют отпуском?

3 Какова цель отпуска?

4 Какие процессы происходят в закаленной стали при нагреве?

5 При каких температурах нагрева получается структура мартенсита, троостита и сорбита отпуска?

6 Как изменяются механические свойства стали с повышением температуры отпуска?

**Библиографический список**

- 1 **Гуляев, А.П.** Металловедение / А.П. Гуляев. – М. : Metallurgy, 1997. – 647 с.
- 2 **Лахтин, Ю.М.** Материаловедение / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева – М. : Машиностроение, 1980. – 494 с.
- 3 Металловедение и термическая обработка стали : справочник. В 3 т. Т. 1. Методы испытаний и исследования / под ред. М.Л. Бернштейна, А.Г. Рахштадта. – М. : Metallurgy, 1983. – 352 с.
- 4 **Геллер, Ю.А.** Материаловедение. Методы анализа, лабораторные работы и задачи / Ю.А. Геллер, А.Г. Рахштадт. – М. : Metallurgy, 1984. – 384 с.
- 5 **Самоходский, А.И.** Лабораторные работы по металловедению и термической обработке металлов / А.И. Самоходский, М.Н. Кунявский. – М. : Машиностроение, 1981. – 174 с.
- 6 Технология конструкционных материалов : терминологический справочник / сост. П.А. Аверченко. – Киев : Высшая школа, 1984. – 112 с.
- 7 **Берлин, В.И.** Транспортное материаловедение / В.И. Берлин, Б.В. Захаров, П.А. Мельниченко. – М. : Транспорт, 1982. – 287 с.
- 8 Материаловедение и технология конструкционных материалов для железнодорожной техники / под ред. Н.Н. Воронина. – М. : Маршрут, 2004. – 454 с.
- 9 **Самойленко, А.М.** Основы выбора материала и методы термообработки для деталей подвижного состава : учеб. пособие / А.М. Самойленко. – Ростов н/Д : РГУПС, 1997.
- 10 Методическое руководство к лабораторным работам по курсу «Материаловедение». Ч. 1, 2, 3. – Ростов н/Д : РГУПС, 2007.

## МАРКИРОВКА ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ И ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ

### *Стали обыкновенного качества*

Углеродистую сталь обыкновенного качества (ГОСТ 380-2005) изготовляют следующих марок: Ст0, Ст1кп, Ст1пс, Ст1сп, Ст2кп, Ст2пс, Ст2сп, Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп, Ст3Гпс, Ст3Гсп, Ст4кп, Ст4пс, Ст4сп, Ст5пс, Ст5сп, Ст5Гпс, Ст6пс, Ст6сп.

Буквы Ст обозначают сталь, цифры – условный номер марки в зависимости от химического состава, буква Г – марганец при его массовой доле в стали 0,80% и более.

Для обозначения степени раскисления к обозначению марки стали после номера марки добавляют индексы кп, пс, сп: кп – кипящая, пс – полуспокойная, сп – спокойная.

Стали предназначаются для использования главным образом в состоянии поставки без последующей термической обработки, поскольку их химический состав, определяющий режимы обработки, может сильно колебаться.

### *Качественные машиностроительные углеродистые стали*

Углеродистые качественные машиностроительные (конструкционные) стали по ГОСТ 1050-2013 обозначают словом «сталь» и двузначными цифрами, показывающими среднее содержание в стали углерода в сотых долях процента. Например, сталь марки 20 содержит в среднем 0,20 % углерода, сталь 45 – 0,45 % и т.д.

### *Углеродистые инструментальные стали*

Углеродистые инструментальные стали (ГОСТ 1435-99) маркируют буквой У с цифрой, обозначающей среднее содержание углерода в десятых долях процента. Например, сталь марки У8 содержит в среднем 0,8 % углерода, сталь У12 – 1,2 % и т.д.

Для высококачественных сталей (с пониженным содержанием вредных примесей – серы и фосфора) в конце марки ставят букву А.

### *Легированные конструкционные и инструментальные стали*

В основу обозначения марок легированных сталей (ГОСТ 4543-71) положена буквенно-цифровая система. Содержание легирующих элементов указывают русскими буквами: марганец – Г, кремний – С, хром – Х, никель – Н, вольфрам – В, ванадий – Ф, титан – Т, молибден – М, алюминий – Ю,

медь – Д, кобальт – К, бор – Р, ниобий – Б, цирконий – Ц, фосфор – П, азот – А, селен – Е, редкоземельные металлы – Ч.

В марках легированных конструкционных сталей, например 15Х, 14Г2, 25ХГТ, 20ХНЗА, 55С2 и др., двузначные цифры в начале марки означают среднее содержание углерода в сотых долях процента, а цифры после букв – примерное содержание соответствующего легирующего элемента в процентах. Отсутствие цифры после буквы указывает на то, что содержание этого элемента менее 1,5 % (в среднем 1 %). Для высококачественных сталей в конце марки ставят букву А; например, сталь 30ХГС – качественная сталь, а 30ХГСА – высококачественная. Особо высококачественные стали имеют в конце марки букву Ш (например, 30ХГС-Ш).

В марках легированных инструментальных сталей (ГОСТ 5950-2000), например, 9ХС, Х12М, 3Х2В8Ф, цифра в начале марки указывает среднее содержание углерода в десятых долях процента, если его содержание менее 1 %. При содержании углерода в сталях более 1 %, цифру не пишут. Расшифровка марок инструментальных сталей по содержанию легирующих элементов такая же, как и конструкционных сталей.

Есть особые случаи маркировки сталей. Например, быстрорежущие стали маркируют по ГОСТ 19265–73 буквой Р (что означает – быстрорежущая); последующая цифра (число) показывает среднее содержание в процентах основного легирующего элемента – вольфрама, остальная часть маркировки – обычная (например, Р6М5К5).

В некоторых марках сталей первая буква означает их применение: А – автоматные (А20), Е – магнитотвердые (ЕХ9К15М), Э – электротехнические (Э11), Ш – шарикоподшипниковые (ШХ15). В марках шарикоподшипниковых сталей содержание хрома (только!) указывается в десятых долях процента. Например, в стали ШХ15СГ содержание хрома в среднем 1,5 %, а содержание других легирующих элементов (кремния и марганца) приблизительно по 1 %.

### *Чугуны*

Серые чугуны по ГОСТ 1412-85 маркируют буквами СЧ и цифрами, характеризующими прочность чугуна. Например, чугун марки СЧ20 имеет предел прочности  $\sigma_B \geq 196$  МПа (20 кгс/мм<sup>2</sup>).

Ковкие чугуны по ГОСТ 1215-79 маркируют буквами КЧ, означающими ковкий чугун, затем два числа: первое число показывает предел прочности при растяжении, второе – относительное удлинение в % (КЧ 30-6, КЧ 45-7, КЧ 60-3 и др.). Например, чугун КЧ 30-6 обладает пределом прочности  $\sigma_B \geq 294$  МПа (30 кгс/мм<sup>2</sup>) и относительным удлинением  $\delta \geq 6$  %.

Высокопрочные чугуны по ГОСТ 7293–85 маркируют буквами ВЧ и числом, характеризующим предел прочности при растяжении  $\sigma_B$ . Например, ВЧ 35, ВЧ 50, ВЧ 60, ВЧ 100 и др.

ГОСТ 1585-85 регламентирует химический состав, структуру металлической основы, форму графита и твердость чугунов, обладающих антифрикционными свойствами и применяемых для деталей, работающих в узлах трения со смазкой. Шесть марок – это чугуны с пластинчатым графитом (АЧС-1, АЧС-2, АЧС-3, ... АЧС-6), и по две марки – соответственно высокопрочный (АЧВ-1, АЧВ-2) и ковкий (АЧК-1, АЧК-2) чугуны.

Легированные чугуны со специальными свойствами для производства отливок регламентирует ГОСТ 7769-82, который распространяется на все основные виды специальных чугунов, применяемых для изготовления жаростойких, жаропрочных, коррозионно-стойких, износостойких и маломангнитных отливок. Маркировка осуществляется по аналогии со сталями с помощью буквенно-цифровых обозначений. По составу легированные чугуны классифицируют по элементу, который преобладает в составе данного чугуна. Например, чугуны разделяют на алюминиевые (ЧЮ7Х2), хромистые (ЧХ20, ЧХ8Н6), никелевые (ЧН15Д3Х3), кремнистые (ЧС5, ЧС15М4), марганцевый (ЧГ7Х4) и др. Если в конце маркировки стоит буква Ш (ЧН15Д3Ш), это указывает на то, что графит в чугуне имеет шаровидную форму, если Ш отсутствует, то графит пластинчатый.

### *Медные сплавы*

Медно-цинковые сплавы – латуни маркируются буквой Л и числом, указывающим процентное содержание меди, остальное цинк. Например, двухфазные латуни: Л96, Л90, Л70 и т.д. В обозначения марок латуней более сложного состава после буквы Л следует обозначение легирующих элементов: О – олово, С – свинец, Ж – железо, Мц – марганец, Н – никель, К – кремний, А – алюминий, Ф – фосфор, Ц – цинк, Б – бериллий, Мш – мышьяк и т.д., после них следуют цифры, указывающие содержание меди и других компонентов.

Примеры деформируемых латуней: ЛА77-2, ЛАЖ60-1-1, ЛАН59-3-2, ЛЖМа59-1-1, ЛН65-5.

Примеры литейных латуней: ЛЦ16К4, ЛЦ23А6Ж3Мц2, ЛЦ30А3, ЛЦ40С, ЛЦ40Мц3Ж.

Например, ЛС 59-1 означает: латунь свинцовистая, содержащая 57...60 % меди и 0,8...1,5 % свинца; ЛМцА 57-3-1 – латунь марганцовистоалюминиевая, содержащая 2,5...3,5 % марганца и 0,5...1,5 % алюминия. Латуни деформируемые.

Бронзы маркируют русскими буквами Бр, после которых, как и в латунях, указывают другие компоненты (кроме меди), а в конце цифрами – процентное содержание компонентов.

Легирующие элементы обозначают: О – олово, А – алюминий, Ф – фосфор, Т – титан, Ц – цинк, и др.

Примеры деформируемых бронз: БрОФ6,5-0,4, БрОЦ4-3, БрОЦС4-4-2,5, БрАЖН10-4-4.

Примеры литейных бронз: БрОЗЦ12С5, БрО5ЦНС5, БрО4Ц4С17, БрА10ЖЗМц2.

Например, Бр ОЦ 4-3 обозначает, что в бронзе в среднем 4 % олова, 3 % цинка, остальное медь. Бронза деформируемая.

### *Баббиты*

Марки баббитов обозначают буквой Б, справа от которой ставится число, показывающее процентное содержание олова, или буква, обозначающая дополнительный легирующий элемент. Например, марки Б83, Б16 означают, что в эти баббиты входит соответственно 83 и 16 % олова; марка БН означает, что сплав содержит никель. Обозначение баббитов носит условный характер, так как не показывает полностью состав сплава.

*Учебное издание*

**Кротов Владимир Николаевич**  
**Морозкин Игорь Сергеевич**  
**Кармазина Людмила Алексеевна**

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ  
И ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Печатается в авторской редакции  
Технический редактор Н.С. Федорова

Подписано в печать 23.10.17. Формат 60×84/16  
Бумага газетная. Ризография. Усл. печ. л. 3,6.  
Тираж      экз. Изд. № 90672. Заказ      .

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС.

---

Адрес университета: 344038, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового  
Полка Народного Ополчения, д. 2.