



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Белорусский национальный
технический университет

Кафедра «Вакуумная и компрессорная техника»

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум

Минск
БНТУ
2013

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Вакуумная и компрессорная техника»

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум
для студентов специальностей
1-36 20 04 «Вакуумная и компрессорная техника»
и 1-08 01 01 «Профессиональное обучение»

Минск
БНТУ
2013

УДК 621.793
ББК 30.3
М34

Составители:
А. А. Шматов, И. А. Иванов

Рецензенты:
д-р техн. наук, профессор *В. М. Капцевич*;
канд. техн. наук, доцент *И. С. Фролов*

Материаловедение : лабораторный практикум для студентов
М34 специальностей 1-36 20 04 «Вакуумная и компрессорная техника»
и 1-08 01 01 «Профессиональное обучение» / сост. : А. А. Шматов,
И. А. Иванов. – Минск : БНТУ, 2013. – 90 с.
ISBN 978-985-525-234-1.

Содержатся лабораторные работы по курсу «Материаловедение», которые соответствуют требованиям типовой учебной программы дисциплины. В лабораторных работах для изучения двойных диаграмм состояния и диаграммы Fe-Fe₃C использованы различные методики: термический анализ построения диаграммы состояния, правило фаз для построения кривых охлаждения, правило отрезков для определения структурно-фазового состава сплавов. Большое внимание уделено вопросам маркировки углеродистых и легированных сталей, чугунов и твердых сплавов, взаимосвязи между их структурой, химическим составом и свойствами.

УДК 621.793
ББК 30.3

ISBN 978-985-525-867-5

© Белорусский национальный
технический университет, 2013

Лабораторная работа № 1

МАКРОСТРУКТУРНЫЙ И МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗЫ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цель работы — ознакомление с методикой приготовления макро- и микрошлифов, изучение устройства и работы металлографического микроскопа, приобретение практических навыков исследования микрошлифов на микроскопе и изломов невооруженным глазом, зарисовка простейших микроструктур.

Свойства материалов в первую очередь определяются их химическим составом и структурой. В зависимости от размеров структурных составляющих и уровня техники для их исследования различают три вида структур: тонкую, макро- и микроструктуру. Под *структурой* понимают видимое или мнимое изображение (модель, рисунок), которое показывает:

- электронное строение и расположение частиц (атомов, ионов, молекул) в кристалле (это *тонкая структура*),
- форму, размеры, распределение и направленность зерен, фаз, микровключений и микропустот (это *микроструктура*);
- характер излома и вид разрушения, форму и размеры крупных зерен, пор, раковин, трещин, волокнистость, химическую неоднородность (это *макроструктура*).

Тонкую структуру изучают дифракционными методами (рентгенографией, электронографией, нейтронографией). С их помощью можно рассмотреть детали структуры размером $d = 0,01 \dots 0,2$ нм.

Микроструктуру изучают с помощью светового ($d = 0,1 \dots 0,2$ мкм) или электронного ($d \geq 0,2$ нм) микроскопов.

Макроструктуру изучают невооруженным глазом и при небольшом увеличении (до 30...40 раз) с помощью линзы, лупы, окуляра.

Под *разрешающей способностью* (РС) понимают способность прибора или аппарата наблюдения (микроскопа, человеческого глаза, др.) отчетливо различать минимальные размеры объекта или деталей структуры. Математически она рассчитывается как величина, обратная минимальному расстоянию (d) между точками или линиями, которые еще видны раздельно: $РС = 1 / d$.

Разрешающая способность любого прибора наблюдения зависит от длины волны излучения (светового, рентгеновского, электронного и нейтронного потока), которое в нем используется для изучения объекта исследования (структуры). Чем меньше длина волны излучения λ , тем больше разрешающая способность РС.

Разрешающая способность оптической системы светового микроскопа определяется из условий дифракции согласно уравнению:

$$PC_{CM} = (2n \sin \alpha/2) / \lambda ,$$

где λ – длина волны света (600 нм);

n – коэффициент преломления;

$\alpha/2$ – половина угла раскрытия входящего светового пучка;

Важной характеристикой для микроскопа является его увеличение. Максимально полезное увеличение светового микроскопа M_{CM} рассчитывают по формуле:

$$M_{CM} = PC_{CM} / PC_{ГЛ} = d_{ГЛ} / d_M = 300 \text{ мкм} / 0,2 \text{ мкм} = 1500 ,$$

где PC_{CM} и $PC_{ГЛ}$ – разрешающая способность светового микроскопа и человеческого глаза соответственно;

d_M и $d_{ГЛ}$ – минимальный размер деталей структуры светового микроскопа и человеческого глаза соответственно; причем

$d_M = 0,2 \text{ мкм}$, а $d_{ГЛ} = 300 \text{ мкм}$.

Обычно в световом микроскопе ведут наблюдение в воздушной среде ($n=1$). Для получения больших увеличений между поверхностью специального (иммерсионного) объектива и микрошлифом помещают жидкость с высоким коэффициентом преломления: кедровое масло, которое имеет $n = 1,52$. Тогда полезное увеличение светового микроскопа возрастает до 2280 раз.

Общее увеличение светового микроскопа M_{CM} также рассчитывается, как произведение увеличений объектива $M_{Об}$ и окуляра $M_{Ок}$:

$$M_{CM} = M_{Об} \cdot M_{Ок} .$$

Увеличение светового микроскопа и его оптических элементов

(объектива, окуляра) обозначают символом X, например, увеличение микроскопа – 1500 X, окуляра – 10 X, объектива – 100 X.

Микроскопы для исследования структуры материалов можно условно разделить на две основные группы приборов, в которых:

- излучение просвечивает образец, например, ПЭМ (просвечивающие электронные микроскопы), которые могут рассмотреть детали структуры размером $d = 0,2 \dots 0,5$ нм. В качестве образца используют очень тонкие фольги;

- излучение отражается от поверхности в виде вторичного пучка электронов, нейтронов, света, например, РЭМ (растровые электронные микроскопы). РЭМ могут рассмотреть структурные составляющие размером $d = 9 \dots 30$ нм, а световые микроскопы ($d = 200$ нм). Во всех случаях поверхность образца полируют и специально подготавливают.

Микроструктурный анализ металлов и сплавов

Для изучения микроструктуры металлов и сплавов применяют *микроструктурный анализ (микроанализ)*. Его осуществляют путем рассмотрения микрошлифов на оптическом микроскопе (50...2000 X) в отраженном свете или на электронном микроскопе (5000...25000 X), в котором изображение создается вторичной эмиссией электронов, излучаемых поверхностью образца. *Микрошлифом* называют специально подготовленный образец, который имеет плоскую зеркальную поверхность, полученную шлифованием и полированием.

Микроанализ дает возможность определить размеры, форму, расположение и направленность зерен сплава, неметаллических включений и фаз, морфологию поверхности, выявить микродефекты (мелкие раковинки, поры, трещины), а с помощью электронного микроскопа еще рассмотреть дефекты кристаллической решетки (дислокации).

Изготовление микрошлифа включает следующие этапы:

- вырезка из заготовки и торцевание образца для исследования;
- подготовка плоской поверхности, для чего образец помещают в оправку, зажимая его винтами, запрессовывая его пластмассой, заливая его эпоксидной смолой или легкоплавким сплавом Вуда;
- многократное шлифование плоскости образца: сначала его шлифуют материалами с крупными абразивными зёрнами и постепенно переходят на материалы с более мелкими зёрнами до полного удале-

ния с поверхности видимых рисок; причем при каждом переходе с одного на другой абразивный материал шлиф поворачивают на 90°;

- полирование образца для получения зеркальной поверхности.

Наиболее удобным для изготовления шлифа является образец высотой 10...20 мм цилиндрического или квадратного сечения. Отрезку образца делают механическим способом (пилой, фрезой, вулканитом, газопламенным резаком). Затем образец торцуют резцом, фрезой и выравнивают поверхность на наждачном круге.

При последующем шлифовании образца используют шлифовальные шкурки и алмазные пасты различной зернистости. При отрезке, торцевании и шлифовании образца не допускается перегрев его поверхности, поэтому образцы периодически охлаждают. При шлифовании мягких металлов (алюминия, меди) на шлифовальную бумагу наносят слой парафина или раствор парафина в керосине.

Применяют различные способы полирования: механический, химико-механический и электролитический. Механическое полирование проводят на вращающемся круге, обтянутом мягким материалом (фетром, сукном, драпом). Эту ткань постоянно смачивают водной суспензией из абразивных материалов (оксидов Cr_2O_3 , Al_2O_3 , MgO , FeO). Твердые материалы обычно полируют на алмазной пасте. При химико-механическом полировании в состав полирующей смеси дополнительно вводят химически активные вещества. Электролитическое полирование осуществляют в электролитической ванне, куда в качестве анода помещают образец; и при пропускании электрического тока растворяются все неровности поверхности, делая ее гладкой и блестящей. После полировки образец промывают водой и высушивают, прикладывая к поверхности фильтровальную бумагу. Чтобы защитить шлиф от окисления на его поверхность наносят раствор кедрового масла или канадского бальзама в эфире, после испарения которого, на шлифе формируется защитная пленка.

Для выявления микроструктуры шлиф подвергают химическому, электролитическому, тепловому, катодному травлению, травлению в расплавах солей, травлению магнитным методом, методами окисления и вакуумного испарения. При воздействии на поверхность химической или воздушно окислительной среды развиваются процессы растворения, окисления и окрашивания фаз. Быстрее всего эти процессы идут в местах скопления дефектов, примесей, по границам зерен. В результате на поверхности шлифа формируется микрорельеф, который

в отраженном свете оптического микроскопа, виден в форме зерен и различных фаз.

При химическом травлении шлиф погружают в жидкий травитель, либо им смачивают или его втирают в поверхность шлифа. При этом может быть выявлена вся микроструктура или какие-либо ее участки. Существует большой набор травителей на основе кислот, щелочей, красной кровяной соли, которые растворены в дистиллированной воде, различных спиртах и ацетоне. На практике для травления сталей и чугунов чаще всего используют травитель «Ниталь»: 2...4 % раствор азотной кислоты в этиловом спирте или воде. Травление заканчивают тогда, когда четко выявляются контуры микроструктуры. Затем шлиф промывают водой, протирают спиртом и высушивают фильтровальной бумагой. Только тогда шлиф считается готовым.

Исследование микроструктуры протравленного микрошлифа осуществляют на оптическом металлографическом микроскопе в отраженном свете (рис. 1.1, 1.2).

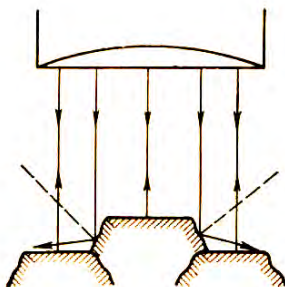


Рис. 1.1. Схема отражения лучей от полированной и протравленной поверхности шлифа

При травлении на поверхности шлифа создается микрорельеф вследствие неодинаковой глубины травления структурных составляющих. В более протравленных местах микрорельефа, например, в микропорах, на границах зерен и фаз, падающий из объектива свет рассеивается (рис. 1.1); эти места под микроскопом видны темного цвета. Гладкая (мало протравленная) поверхность, срезаемых при полировке зерен и твердых фаз, зеркально отражает падающий свет, который обратно возвращается в объектив (рис. 1.1); и тогда эти

структурные составляющие имеют светлый цвет. В целом структура представляет собой сочетание света и тени. Например, эвтектоид стали – перлит, состоящий из смеси феррита и цементита, под микроскопом имеет серый цвет, поскольку представляет собой смесь светлых фаз и темных межфазных границ.

Принцип работы светового микроскопа следующий. Лучи света от электрической лампы 1 проходят через фокусирующую систему светофильтров 2 и попадают на полупрозрачную пластину 3, расположенную под углом 45° к оси объектива 4. Лучи света, падающие на пластину 3, частично отражаются и проходят через объектив 4 и попадают на поверхность микрошлифа 6, установленного на предметном столике 5. Отразившись от поверхности микрошлифа, лучи вновь проходят через объектив 4, пластину 3, преломляются призмой 7 и через окуляр 8 попадают, в глаз наблюдателя.

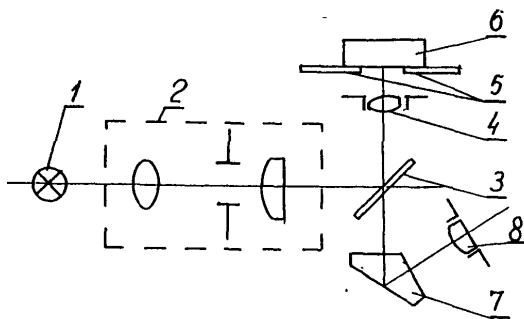


Рис. 1.2. Принципиальная схема светового микроскопа типа МИМ

Человеческий глаз обладает разной чувствительностью к цветам спектра: наибольшей чувствительностью – к желто-зеленым цветам. Такие светофильтры повышают разрешающую способность объектива и позволяют более четко рассмотреть детали структуры.

Устройство и работа изучаемого микроскопа МИ-1

Микроскоп МИ-1 предназначен для металлографических исследований и относится к микроскопам в отраженном свете (рис. 1.3). Несущей частью конструкции является корпус 14, в котором расположены элементы оптической схемы и механизмы микроскопа. В

верхней части корпуса 14 ближе к оператору закреплена насадка тринокулярная 3 с окулярами 1 и 2 для визуального наблюдения увеличенного изображения объекта. Насадка тринокулярная 3, закрытая крышкой 4, имеет дополнительный оптический канал для установки телевизионной камеры, передающей микроизображения объекта на экран монитора персонального компьютера. Справа на корпусе 14 находится ручка 20 смены тубусных объективов 1,0 X или 1,5 X и крышка 19, на место которой может быть установлен светофильтр поляризационный из комплекта сменных частей.

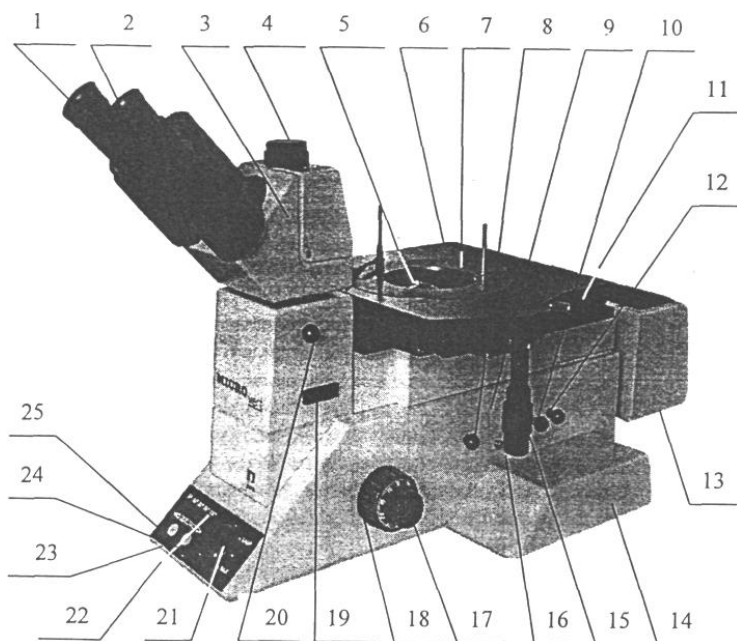


Рис. 1.3. Микроскоп МИ-1:

- 1, 2 – окуляр; 3 – насадка тринокулярная; 4 – крышка; 5 – объективы; 6 – стол;
 7 – пластина; 8, 10, 12, 20 – ручка; 9, 19 – крышка; 11 – винт; 13 – фонарь;
 14 – корпус; 15, 16, 17, 18, 21 – ручка; 22 – светодиоды; 23 – пульт управления;
 24, 25 – кнопка

На корпусе 14 установлен стол 6, на пластину 7 которого размещают объект наблюдения. Пластина 7 имеет возможность поворота вокруг вертикальной оси Z на угол $\pm 15^\circ$ за ручку и фиксации стопор-

ным винтом 11. Конструкция предусматривает перемещение верхней плиты стола 6 по координатным осям X, Y в пределах $\pm 12,5$ мм; ее перемещение осуществляется вращением ручек 15 и 16. Под столом 6 находится револьверная головка с электро-механическим приводом и установленными на ней пятью микрообъективами 5. Смена позиций объективов осуществляется кнопками 24 и 25 и увеличение объектива показывает свечение светодиода на пульте 23. Наводка микрообъективов 5 на резкое изображение объекта обеспечивается вращением соосных ручек 18 и 17. Ручка 18 служит для грубой (предварительной), а ручка 17 - для тонкой (окончательной) наводки на изображение наблюдаемого объекта.

Справа на боковой поверхности корпуса 14 расположена ручка 8 «BF/DF» переключения режима освещения светлое/темное поле, ручки 11 «FD» и 12 «AD» управления полевой и апертурной диафрагмами соответственно, а так же крышка 9, закрывающая место установки поляроида вращающегося. Слева на боковой поверхности корпуса 14 находится ручка «F» переключения светофильтров осветителя микроскопа. Возможны три режима освещения: с синим светофильтром, зеленым или без светофильтра. Сзади микроскопа расположен фонарь 13, источник электропитания и панель 9 с фильтром электропитания. Для снижения влияния вибраций на качество изображения объекта снизу на корпусе микроскопа установлены амортизаторы 8.

Макроструктурный анализ металлов и сплавов

Для изучения макроструктуры металлов и сплавов применяют *макроструктурный анализ (макроанализ)*. Макроструктуру исследуют на изломах и макрошлифах, которые изготавливают, как и микрошлифы: вырезают из заготовок, шлифуют, полируют и травят.

Методом макроанализа определяют:

- характер разрушения и вид излома: вязкий, хрупкий;
- нарушение сплошности металла – усадочные раковины и рыхлость, газовые пузыри, флокены, свищи, расслоения, неметаллические включения, пористость, межкристаллитные трещины и возникающие при обработке давлением и термообработке;
- дендритное строение и зону трансформации;
- структурную и химическую неоднородность сплава после литья,

термической, термомеханической и химико-термической обработки, наличие грубых включений в структуре;

- волокнистую структуру деформированного металла;

- толщину поверхностного слоя (закаленного, цементованного, др.);

Анализ строения излома характеризует поведение металла при разрушении. По этому признаку различают следующие изломы:

• кристаллический (блестящий с фасетками) излом наблюдается при хрупком разрушении сплавов: при их перегреве и переохлаждении;

• матовый или волокнистый (зерна не видны) излом наблюдается при вязком разрушении после значительной пластической деформации;

• смешанный (кристаллический на одних участках и волокнистый на других) излом наблюдается между верхним и нижним порогами хладноломкости стали, в не полностью прокаленной стали, при усталостном разрушении стали.

Порядок проведения и задания работы

1. Ознакомиться с известными методами и приборами, предназначенными для изучения структуры металлов и сплавов.

2. Изучить методику приготовления макро- и микрошлифов.

3. Изучить устройство и принцип работы микроскопа МИ-1.

4. Научиться определять увеличение микроскопа на основании паспортных данных объектива и окуляра.

5. Изучить микроструктуры микрошлифов разных сплавов на световом микроскопе МИ-1 и зарисовать их.

6. Сделать выводы и составить отчет по работе.

Содержание отчета

1. Название, цель и задачи работы.

2. Краткое описание методики приготовления микрошлифов и последующего исследования их на оптическом микроскопе.

3. Принципиальная схема светового микроскопа и описание его работы.

4. Эскизы микроструктур сплавов, изученных на занятиях.

5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какие виды структур металлов и сплавов известны, чем они отличаются друг от друга и с помощью каких приборов их изучают?

2. Что такое макро- и микрошлиф, для чего их делают?
3. Опишите последовательность изготовления микрошлифа?
4. Для чего поверхность микрошлифа травят, какие химические реактивы для этого применяют?
5. Почему после травления микрошлифа можно рассмотреть структуру на микроскопе, а без травления – нет?
6. Что такое разрешающая способность прибора для исследования структуры, от чего она зависит? У какого микроскопа разрешающая способность выше – у электронного или у светового?
7. Опишите устройство и принцип работы микроскопа МИ-1?
8. Какое полезное увеличение светового микроскопа, как оно рассчитывается в зависимости от разрешающей способности человеческого глаза и микроскопа?
9. От каких оптических линз зависит увеличение микроскопа? Как оно рассчитывается в зависимости от увеличения оптических линз?
10. Какие цвета фильтров лучше применять для изучения микроструктур и почему?
11. Какие виды изломов бывают? Как выглядит хрупкий и как вязкий изломы, в чем их отличие?

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цель работы — ознакомление с методиками испытаний материалов на твердость, приобретение навыков измерения твердости металлов и сплавов динамическим методом

Свойство – это количественная или качественная характеристика материала, определяющая его общность или различие с другими материалами. Различают три группы свойств: эксплуатационные, технологические и стоимостные.

Первостепенное значение имеют *эксплуатационные свойства* – свойства материала, которые обеспечивают работоспособность изделия и другие его технические показатели. В свою очередь работоспособность деталей машин и инструментов зависит от механических и физико-химических свойств. Под *механическими свойствами* понимают характеристики, определяющие сопротивление материала внешним механическим воздействиям; к этим свойствам относят *прочность, пластичность, упругость, вязкость, твердость, износостойкость, выносливость*, др. *Физико-химические свойства* – это характеристики, оценивающие сопротивляемость материала коррозионному, электрическому, магнитному, теплофизическому, радиационному и другим видам немеханических воздействий.

Общие сведения об измерении твердости

Твердость – свойство материала оказывать сопротивление контактному воздействию на его поверхность стандартного твердого тела (индентора). *Индентор* – твердое тело определенной геометрической формы (стальной шарик, алмазный конус или пирамида), которое при контактном воздействии на поверхность материала, не должно подвергаться пластической (остаточной) деформации.

Методы измерения твердости является неразрушающими методами испытаний, выполняются просто и быстро. Твердость тесно связана с другими механическим свойствами, поэтому более трудоемкие испытания на растяжение, сжатие, ударную вязкость, др. часто заменяют испытаниями на твердость.

Во всех методах испытаний на твердость важно чтобы поверхность образца была ровной, гладкой, без окалины, без грубых рисок и вмятин. Плоскость образца должна быть строго параллельна опорной поверхности, чтобы к индентору прикладывалась нагрузка перпендикулярно испытываемой поверхности. Неплоские образцы крепятся на специальных опорных столиках. Чтобы показания твердости не искажались из-за наклепа материала, расстояние между отпечатками должно быть не менее 2,5–6 диаметров отпечатка в зависимости от вида материала. Не рекомендуется делать замеры твердости близко (менее 3 мм) к краю образца.

Методы определения твердости основаны на различных принципах воздействия индентора на поверхность, из них три основные:

- *твердость, определенная вдавливанием* – по величине отпечатка, характеризует *сопротивление* материала *пластической деформации*. Таким способом измеряется твердость по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу и микротвердость;
- *твердость, определенная царапанием* – по размерам и количеству микротрещин, ширине царапины, характеризует *сопротивление* материала *разрушению* при срезе. Царапину можно наносить алмазным конусом, пирамидой или шариком. Чаще такой способ осуществляют на микротвердомере;
- *твердость, определенная по отскоку* или динамическим методом (по Шору) – по высоте (или скорости) отскока шарика, наконечника, характеризует *сопротивление* материала *упругой деформации*. Такой способ применяют на твердомере Импульс-2М.

Числа твердости, полученные разными методами, – это условные значения и они связаны между собой. Например, твердость по Бринеллю, можно приблизительно перевести в твердость по Роквеллу.

При определении твердости методами Бринелля, Роквелла, Виккерса измеряется усредненная твердость всех структурных составляющих данного материала, поскольку полученный отпечаток значительно превышает размеры зерен и фазовых частиц. Напротив, при определении микротвердости измеряется твердость отдельных структурных составляющих: самих зерен и фазовых частиц.

Схемы наиболее распространенных методов испытаний на твердость представлены на рис. 2.1.

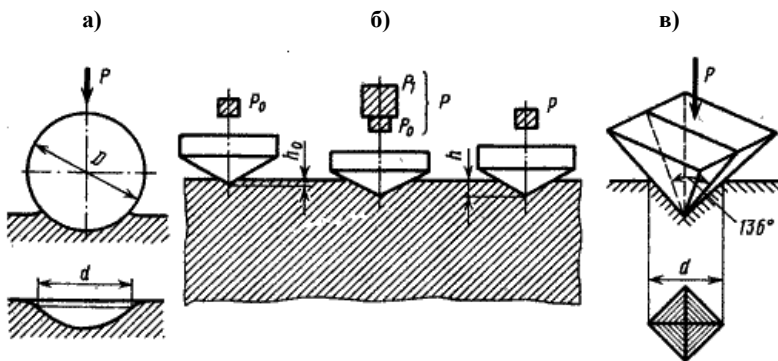


Рис. 2.1. Схемы определения твердости по Бринеллю (а); по Роквеллу (б); твердости по Виккерсу или микротвердости (в)

Определение твердости по Бринеллю

Метод Бринелля (ГОСТ 9012-59) используют для материалов малой и средней твердости и осуществляют поэтапно. На 1 этапе на приборах типа ТШ (рис. 2.2) в плоскую поверхность образца под постоянной нагрузкой P вдавливают стальной закаленный шарик.

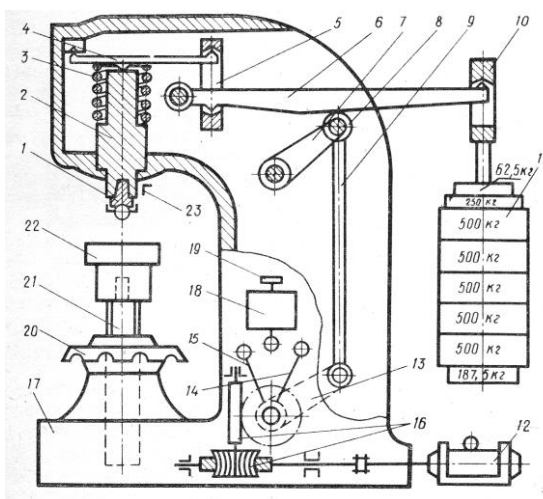


Рис. 2.2. Схема прибора ТШ-2

При этом диаметр шарика D (рис. 2.1, а) размером 2,5; 5; 10 мм выбирается в зависимости от толщины изделия. Нагрузку P и время нагружения τ выбирают: для стали и чугуна $P = 30D^2$, $\tau = 10$ с или 30 с, для бронзы и латуни $P = 10D^2$, $\tau = 30$ с, для алюминия и мягких металлов $P = 2,5D^2$, $\tau = 60$ с. После снятия нагрузки в образце остается отпечаток в виде сферической лунки (рис. 2.1, а).

На 2 этапе испытаний измеряют диаметр лунки d в двух направлениях с помощью лупы Бринелля, на окуляре которой нанесена шкала с делениями (рис. 2.3).

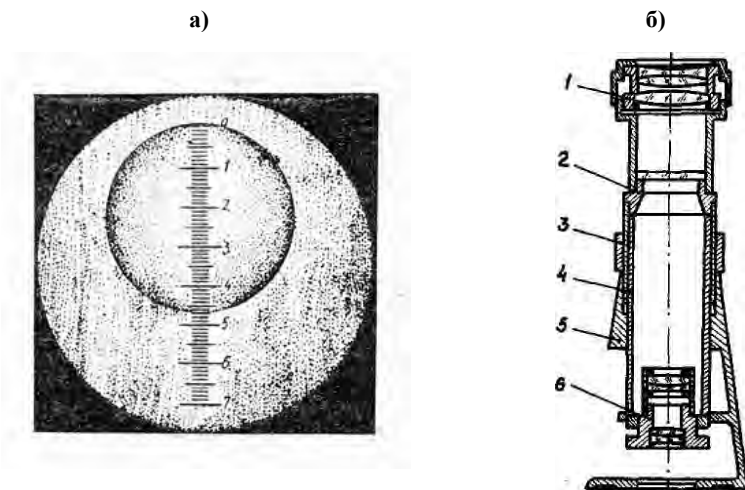


Рис. 2.3. Общий вид сферической лунки и шкалы (а), по которой измеряют диаметр отпечатка на микроскопе МПБ-3 (б): 1 – окуляр; 2 – сетка; 3 – установочное кольцо; 4 – тубус; 5 – колонка; 6 – объектив

Затем величину твердости по Бринеллю рассчитывают, как отношение приложенной нагрузки P к поверхности отпечатка F :

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{P}{\frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Твердость по Бринеллю обозначают расчетными показателями и индексом **НВ**, например, 250 НВ, когда испытания про-

водят при стандартных условиях: $D = 10$ мм; $P = 3000$ кгс; $\tau = 10$ с. В других случаях за индексом НВ ставят цифры, уточняющие параметры испытаний $D/P/\tau$, например, 80 НВ 5/250/30.

Определение твердости по Роквеллу

Метод Роквелла (ГОСТ 9013-59) универсален и высоко производителен, т.к. на одном и том же приборе типа ТК (рис. 2.4, а) осуществляют испытание и показание твердости мягких, твердых и особо твердых материалов. Метод основан на определении глубины отпечатка, полученного при вдавливании в поверхность материала индентора под действием определенной нагрузки (рис. 2.1, б). В зависимости от материала применяют разные инденторы: для мягких материалов используют стальной шарик диаметром 1,59 мм (рис. 2.4, з), для более твердых материалов – алмазный конус с углом при вершине 120° (рис. 2.4, в)

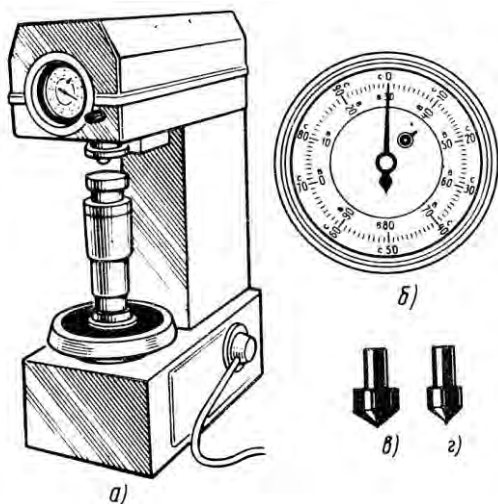


Рис. 2.4. Прибор ТК-2 (а), три шкалы для измерения твердости по Роквеллу (б) и инденторы: алмазный конус (в) и стальной шарик (г)

Нагружение осуществляется в два этапа. Сначала прикладывают предварительную нагрузку P_0 (10 кгс), чтобы исключить влияние

упругой деформации и шероховатости поверхности образца. Тогда индентор погружается в образец на величину h_0 (рис. 2.1, б). Затем прикладывают основную нагрузку P_1 , в результате чего индентор внедряется в поверхность образца на величину h .

На циферблате прибора ТК имеются три шкалы (рис. 2.4, б).

По шкале В измеряют твердость мягких материалов (до НВ 230) с использованием стального шарика, как индентора. Эту твердость обозначают цифрами с символом HRB, например, 50 HRB.

По шкале С измеряют твердость твердых материалов (НВ 230...700 или 20...67 HRC) с использованием индентора – алмазного конуса. Эту твердость обозначают как HRC, например, 65 HRC.

По шкале А измеряют твердость особо твердых материалов (более НВ 700 или 70...90 HRA) с использованием в качестве индентора – алмазного конуса. Данную твердость обозначают цифрами с индексом HRA, например, 85 HRA.

Определение твердости по Виккерсу

Твердость по Виккерсу (ГОСТ 2999-75) определяют по величине отпечатка (рис. 2.1, в) на приборе типа ТП (рис.2.5, а). В качестве индентора используют алмазную четырехгранную пирамиду с углом при вершине 136° (рис. 2.1, б).

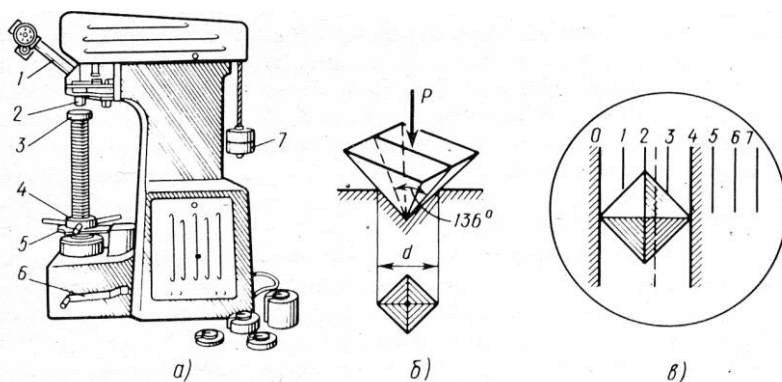


Рис. 2.5. Прибор типа ТП (а), индентор - алмазная пирамида (б) и шкала, по которой измеряют твердость методом Виккерса (в).

С помощью микроскопа, установленного на приборе Виккерса, измеряют обе диагонали отпечатка d_1 и d_2 и определяют среднеарифметическое значение $d = (d_1 + d_2)/2$. При испытании прилагают нагрузку P , которую варьируют в пределах 5...120 кгс.

Твердость рассчитывается как отношение нагрузки P к площади отпечатка F и обозначают символом HV:

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2P \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,8544 \frac{P}{d^2}$$

Данный метод позволяет с высокой точностью измерять твердость любых материалов, тонких изделий и поверхностных слоев.

Определение микротвердости

Микротвердость определяют на приборе типа ПМТ-3 (рис. 2.6).

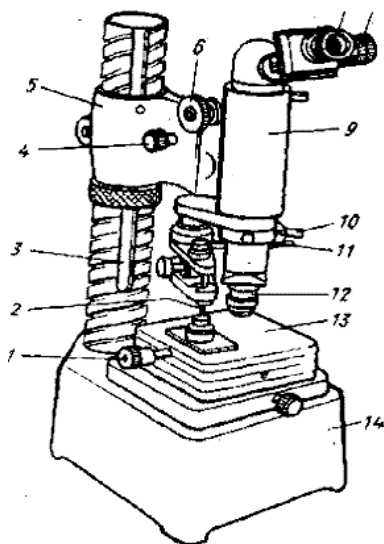


Рис. 2.6. Прибор ПМТ-3

Метод (ГОСТ 9450-76) предназначен для определения твердости отдельных структурных составляющих, в частности, зерен и фаз сплава, очень тонких поверхностных слоев. Он аналогичен методу Виккерса: в качестве индентора применяют пирамиду такой же формы, но меньших размеров, а к индентору прикладывают гораздо меньшие нагрузки, которые составляют 15...500 гс. Микротвердость обозначают символом H_p с указанием нагрузки в граммах, например, $H_{200} = 32$ ГПа, $H_{500} = 15\ 000$ МПа.

Измерение твердости с помощью твердомера Импульс-2М

Метод измерения твердости прибором Импульс-2М (рис. 2.7) основан на принципе определения твердости по упругому отскоку индентора. Прибор универсальный, т.к. может показывать твердость по шкале Роквелла «С» и по шкале Бринелля.

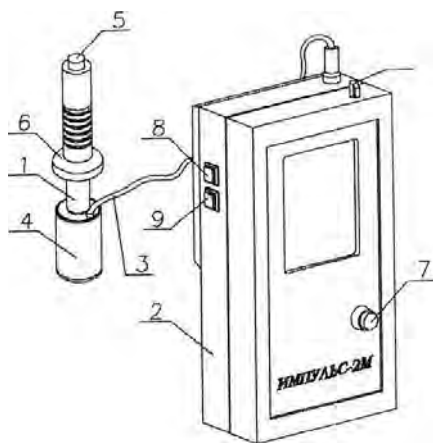


Рис. 2.7. – Прибор Импульс-2М (а)

Твердомер Импульс-2М состоит из ударного преобразователя 1 и размещенных в одном корпусе 2 блока центрального процессора (АЦП) с карманным персональным компьютером (КПК). Ударный преобразователь соединен с блоками АЦП и КПК с помощью специального кабеля 3. Ударный преобразователь 1 содержит пружинный механизм разгона индентора, механизмы взвода и фиксации

индентора в верхнем положении (на рис. 2.7 не показаны), индуктивную катушку 4 с усилителем, соединенные через кабель с блоком АЦП и КПК. В верхней части преобразователя находится пусковая кнопка 5. Индентор состоит из контактного карбидовольфрамового наконечника и постоянного магнита.

После нанесения удара жестким индентором по поверхности образца, наконечник упруго отскакивает. При движении индентора, прикрепленный к нему постоянный магнит наводит в катушке индуктивности ЭДС, пропорциональную скорости движения индентора. Этот сигнал усиливается в предварительном усилителе и поступает в блок АЦП, откуда передается в цифровом формате в КПК. Карманный персональный компьютер обрабатывает сигнал и показывает в окне измерений (рис. 2.8, б) величину твердости по двум шкалам Роквелла «С» и Бринелля.

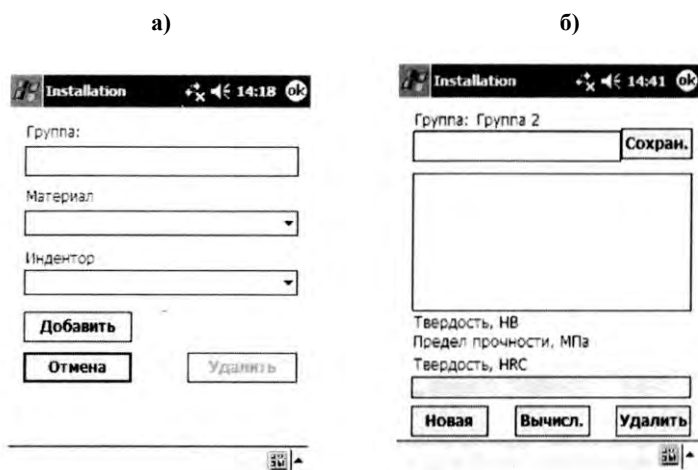


Рис. 2.8. – Окно создания новой группы (а) и окно измерений (б) твердомера Импульс-2М

Пределы допустимой абсолютной погрешности прибора при его поверке по эталонам или мерам твердости 2-го разряда (ГОСТ 9031-75) следующие:

- по шкале Роквелла «С»
 ± 2 HRC на мере твердости (25 ± 5) HRC;

- ±1,5 HRC на мере твердости (45 ± 5) HRC;
- ±1,5 HRC на мере твердости (65 ± 5) HRC;
- по шкале Бринелля
- ±10 HB на мере твердости (100 ± 25) HB;
- ±15 HB на мере твердости (200 ± 50) HB;
- ±15 HB на мере твердости (400 ± 50) HB;

Подготовка прибора к работе

Подготовку к работе и запуск программы installation.exe осуществляют в такой последовательности: 1. Присоединяют разъем ударного преобразователя к блоку АЦП; 2. Включают прибор кнопкой 7, расположенной на передней панели. При этом на дисплее прибора должен появиться экран программы installation.exe. Если экран программы не появился на дисплее, необходимо запустить программу installation.exe. Стилусом 10 нужно нажать на надпись "Start" в левом верхнем углу дисплея и в выпавшем меню "Start" нажать стилусом на значок installation.exe.

После запуска программы installation.exe можно приступить к работе с прибором. Возможны следующие действия:

- создание новой **Группы измерений**;
- редактирование существующей **Группы измерений**;
- проведение новых измерений;
- удаление существующей **Группы измерений**.

Создание Группы измерений

Для создания новой **Группы измерений** нажимают стилусом на кнопку **Новая** на дисплее прибора. В появившемся окне (рис. 2.8, а) выполняют следующие действия: в строке "группа" вводят название новой **Группы измерений**. Для вызова клавиатуры нажимают стилусом на значок в правом нижнем углу дисплея. Для переключения с русского на английский язык и обратно нажимают кнопку Ru на клавиатуре. Для того чтобы скрыть клавиатуру, повторно нажимают на значок клавиатуры. Выберют материал исследуемого образца. Для этого нажимают на строку с обозначением необходимого материала. Для просмотра всего списка материалов используют кнопки прокрутки в правой части выпавшего списка. Выбирают используемый индентор. Для этого находят строку с надписью indenter 1. Затем нажимают кнопку **Добавить** для сохранения созданной **Группы**. Управление прибором осуществляется на жидкокристаллическом дисплее с помощью стилуса, выбор объек-

та из списка) проводится нажатием тонким концом стилуса на соответствующее изображение

Проведение измерений твердости

Перед тем как начать измерения необходимо открыть существующую **Группу**. Для этого в основном окне программы installation.exe выбирают нужную **Группу** и нажимают на кнопку **Открыть**. На дисплее прибора появится окно (рис. 2.8, б). Последовательность действий при проведении измерения: для запуска нового измерения нажимают стилусом на дисплее кнопку **Новое** или кнопку 8 на корпусе прибора. После этого на экране программы появятся три деления на расположенной внизу экрана панели. Это означает, что программа готова к работе.

Далее взводят механизм ударного преобразователя перемещением корпуса 6 в направлении катушки 4 до характерного щелчка; взвод механизма ударного преобразователя должен осуществляться перед каждым измерением. Устанавливают ударный преобразователь основанием катушки 4 на поверхность образца. При этом необходимо обеспечить плотный контакт преобразователя с поверхностью. Нажав кнопку 5 ударного преобразователя услышат характерный щелчок, вызванный ударом индентора по образцу.

После обработки результатов измерения КПК, на дисплее прибора появятся числовые значения твердости. Для сохранения информации стилусом нажимают желаемое измерение и вводят его в верхней строке окна (рис. 2.8, б), нажимая на кнопку **Сохранить**. Для удаления любого измерения нужно нажать на кнопку **Удалить**.

За результат оценки твердости принимаются усредненные значения показателей, полученных при проведении 6 измерений. Для этого проводят измерения в последовательности, указанной в предыдущих пунктах, нажимают на значок OK в правом верхнем углу дисплея для перехода к основному окну программы installation.exe. Выбирают в списке необходимую **Группу** и нажимают кнопку **Вычисл.** На дисплее появится окно с результатами вычисления усредненных значений твердости образца. Для сохранения результатов нажимают кнопку **Сохранить**. Для отмены измерений нажимают кнопку **Отмена**. Для удаления **Группы** необходимо выполнить следующее: выбрать нужную **Группу** из списка в основном окне программы installation.exe, нажать кнопку **Редакт.** и в появившемся окне нажать кнопку **Удалить**.

Выключение прибора осуществляется кнопкой 7, расположенной на передней панели. При этом обязательно должна быть запущена программа installation.exe.

Порядок проведения и задания работы

1. Ознакомиться с известными методами и приборами для измерения твердости и микротвердости.
2. Изучить устройство и принцип работы твердомера типа Импульс-2М.
3. Произвести измерения твердости различных материалов. Показатели твердости оценивать, как усредненное значение замеров в трех-пяти точках одного и того же образца. Расстояние между соседними замерами или от края образца должно быть не менее 3 мм.
4. Данные испытаний твердости занести в таблицу.
5. Сделать выводы и составить отчет по работе.

Содержание отчета

1. Название, цель и задачи работы.
2. Применяемое оборудование и материалы.
3. Краткое описание методов измерения твердости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу и микротвердости.
4. Устройство и порядок работы с твердомером Импульс-2М.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что такое свойство и к каким свойствам относят твердость?
2. Что такое твердость и индентор?
3. Может быть изготовлен индентор из медных или других мягких сплавов и почему?
4. На каких принципах основаны методы определения твердости и какие применяют твердомеры в каждом случае?
5. Сколько шкал в приборе Роквелла и почему этот прибор универсальный?
6. Что общего и чем отличаются методы определения твердости по Виккерсу и микротвердости?
7. Как определяют твердость по Бринеллю, какой используют индентор?
8. Как определяют микротвердость, можно ли определить с по-

мощью этого метода твердость зерен в структуре?

9. Какова размерность твердости для различных способов ее определения?

10. Какое устройство и принцип действия изучаемого твердомера Импульс-2М?

11. По каким шкалам можно определить твердость с помощью прибора Импульс-2М?

Лабораторная работа № 3

ТЕРМИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ДИАГРАММ СОСТОЯНИЯ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ

Цель работы: — изучение оборудования и методики проведения термического анализа, построение диаграмм состояния двойной системы различных типов, изучение типичных микроструктур сплавов

Сплавом называют вещество из двух и более химических элементов (как металлов, так и неметаллов), полученное сплавлением или другими методами (порошковой металлургией, диффузией, возгонкой, электролизом, механохимическим синтезом, т.д.). *Металлический сплав* готовят из металлов; он обладает металлическими свойствами.

Система – любой изучаемый объект (металл, сплав); систему в материаловедении рассматривают, как совокупность фаз в равновесном состоянии. Чистый металл относится к простой, а сплав – к сложной системе. Система является гомогенной, если состоит из одной фазы. Системы многофазные – гетерогенные. Системы бывают однокомпонентными (чистый металл) и многокомпонентными (сплав).

Компоненты – вещества, образующие систему; ими бывают простые вещества (химические элементы) и образуемые при их взаимодействии сложные вещества (химические соединения, промежуточные фазы, пр.). Сплав, как система, может состоять из множества компонентов (веществ).

Фаза – однородная (гомогенная) часть системы, характеризующаяся одинаковыми химическим составом, строением, агрегатным состоянием, свойствами и отделенная от других частей системы поверхностью раздела, при переходе через которую химический состав и структура резко меняются.

Диаграмма состояния – графическое описание фазового состава любого сплава изучаемой системы в зависимости от концентрации компонентов и температуры. Диаграмма состояния строится в координатных осях, по которым откладывают температуру (°С) и массовую долю компонентов (от 100 % одного до 100 % другого). Гео-

метрические образы диаграммы – точки, линии (если система одно- или двухкомпонентная), а также поверхности и объемы (для многокомпонентных систем) являются геометрическим местом критических температур и позволяют определять химическую природу, состав и границы существования равновесных фаз.

Вариантность (С) (число степеней свободы) – это число внутренних и внешних факторов (температура, давление, концентрация, время), которые можно изменять без изменения количества фаз в системе.

Если вариантность $C = 1$ (моновариантная система), то возможно изменение одного из факторов в некоторых пределах, без изменения числа фаз. Если вариантность $C = 0$ (нонвариантная система), то внешние факторы изменять нельзя без изменения числа фаз в системе.

Существует взаимосвязь между числом компонентов (K), числом фаз (Φ) и вариантностью системы (C), которая описывается уравнением под названием *правила фаз* или *закона Гиббса*: $C = K - \Phi + 2$. Металлические системы изучаются при постоянном (атмосферном) давлении и число переменных уменьшается на 1, т.к. учитывается только изменение температуры сплава: $C = K - \Phi + 1$.

Правило фаз используется для анализа фазового состава на кривой охлаждения металла и сплава. Например, двухкомпонентная система может состоять из одной, двух или трех фаз, находящихся в равновесии. В первом случае ($\Phi=1$) система дивариантна ($C = 2$) и при изменении двух ее параметров (температуры и состава) система останется однофазной. Температура может меняться до первого изгиба на кривой охлаждения. Если в равновесии находятся две фазы, то система моновариантна ($C = 1$), и для сохранения этого числа фаз, достаточно изменения только температуры. Равновесие трех фаз в двухкомпонентной системе является нонвариантным ($C = 0$), все параметры системы должны быть постоянными, что соответствует изотермическому участку кривой охлаждения.

Температуры, соответствующие фазовым превращениям, называются *критическими точками*. Точки, соответствующие началу первичной (из жидкости) кристаллизации называют *точками ликвидус*, а конца этой кристаллизации – *точками солидус*. На диаграммах состояния эти точки соединяют в линии, которые называют линиями *ликвидус* и *солидус*.

Диаграммы состояния позволяют не только изучать фазы и структурные составляющие сплавов, но и установить возможность проведения и режимы термообработки, температуры литья и химико-термической обработки, горячей пластической деформации и т.д.

Построение диаграмм состояния осуществляют экспериментальными методами. Чаще используют *метод термического анализа* для определения температур фазовых (внутренних) превращений вещества, которые сопровождаются выделением теплоты при охлаждении (или ее поглощением при нагреве).

Метод осуществляют следующим образом. Отбирают несколько сплавов данной системы с различным соотношением компонентов, входящих в их состав (от 0 до 100 %). Эти сплавы помещают в огнеупорные тигли 2 и нагревают в печи 1. После расплавления сплавов тигли медленно охлаждают и фиксируют с помощью термопары 3, 5 по показаниям гальванометра 7 скорость изменения температуры при охлаждении (рис. 3.1).

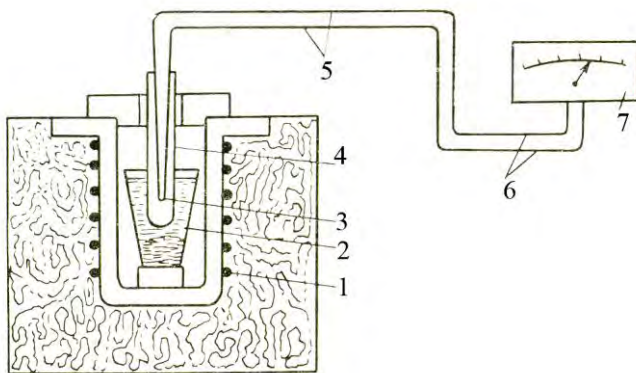


Рис. 3.1. Схема проведения метода термического анализа:
1 – печь, 2 – тигель; 3 – горячий спай термопары; 4 – чехол термопары;
5 – холодные концы термопары; 6 – компенсационные провода; 7 – гальванометр

По полученным данным строят кривые охлаждения в координатах «время-температура» (рис. 3.2, б). Если при охлаждении в сплаве не происходят внутренние превращения (теплового эффекта нет) кривая охлаждения имеет вид плавной нисходящей линии. Если же в сплаве происходят фазовые превращения, на кривой появляются

горизонтальные (изотермические) участки или перегибы. Их длина тем больше, чем больше скрытая теплота превращения, масса вещества и меньше скорость охлаждения.

Рассмотрим примеры построения двух типов диаграмм.

Диаграмма состояния двойной системы с неограниченной растворимостью компонентов (сплавы - твердые растворы)

Диаграмма состояния и кривые охлаждения сплавов данной системы представлены на рис. 3.2. Сначала снимают термические кривые охлаждения. Полученные точки перегибов переносят на диаграмму состояния, где соединив точки начала кристаллизации сплавов и точки конца кристаллизации строят линии.

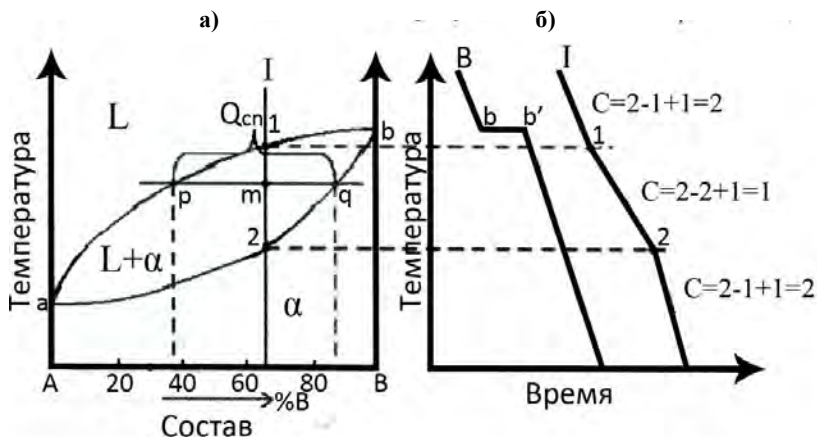


Рис. 3.2. Диаграмма состояния системы с неограниченной растворимостью (а) и кривые охлаждения (б)

Проведем анализ полученной диаграммы:

1. Количество компонентов: $K = 1$ или 2 (компоненты $A + B$).
2. Число фаз: $\Phi = 1$ или 2 (жидкая фаза L + кристаллы твердого раствора α)
3. Основные линии диаграммы:

- apb – линия ликвидус, выше этой линии сплавы находятся в жидком состоянии;
- aqb – линия солидус, ниже этой линии сплавы находятся в твердом состоянии.

4. Характерные сплавы системы:

Чистые компоненты А и В кристаллизуются при постоянной температуре (см. кривую охлаждения В на рис. 3.2, б). Остальные сплавы кристаллизуются, как сплав I (см. кривую охлаждения I на рис. 3.2, б).

Процесс кристаллизации сплава I: до точки 1 он охлаждается в жидком состоянии. При температуре, соответствующей точке 1, начинают образовываться центры кристаллизации твердого раствора α . На кривой охлаждения отмечается перегиб (критическая точка), связанный с уменьшением скорости охлаждения вследствие выделения скрытой теплоты кристаллизации. На участке 1–2 идет процесс кристаллизации, протекающий в процессе снижения температуры, так как согласно правилу фаз при наличии двух фаз (жидкой + кристаллов твердого раствора α), число степеней свободы равно единице ($C = 2 - 2 + 1 = 1$). При достижении температуры в точке 2, сплав затвердевает, при дальнейшем охлаждении сплав находится в твердом состоянии и состоит из однородных кристаллов твердого раствора α . Схема микроструктуры сплава представлена на рис. 3.3.

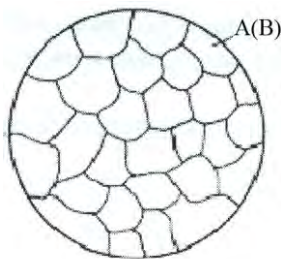


Рис. 3.3. Схема микроструктуры сплава – однородного твердого раствора α или A(B)

5. Правило отрезков – количественный структурно-фазовый анализ сплава. Оно применяется только в областях диаграмм, содержащих

две структурные или фазовые составляющие, позволяет определить их количественное соотношение и состав в структуре. Для проведения количественного структурно-фазового анализа через заданную точку проводят горизонталь (коноду) до пересечения с ближайшими линиями диаграммы (ликвидус, солидус или оси компонентов).

а) Определение состава фаз в точке m :

Для его определения через точку m проводят горизонталь до пересечения с ближайшими линиями диаграммы: ликвидус и солидус. Состав жидкой фазы определяется проекцией точки пересечения горизонтали с линией ликвидус p на ось концентрации. Состав твердой фазы определяется проекцией точки пересечения горизонтали с линией солидус q (или осью компонента) на ось концентрации. Состав жидкой фазы изменяется по линии ликвидуса, а состав твердой фазы – по линии солидуса. С понижением температуры состав фаз изменяется в сторону уменьшения содержания компонента В.

б) Определение количественного соотношения жидкой и твердой фазы при заданной температуре (в точке m):

Количественная масса фаз обратно пропорциональна отрезкам проведенной коноды. Если проведем через точку m коноду общее количество сплава ($Q_{сн}$) определяется отрезком pq . Отрезок, прилегающий к линии ликвидус pm , определяет количество твердой фазы:

$$Q_{тв} = \frac{pm}{pq} \cdot 100\%$$

Отрезок, прилегающий к линии солидус mq , определяет количество жидкой фазы:

$$Q_{ж} = \frac{mq}{pq} \cdot 100\%$$

Диаграмма состояния двойной системы эвтектического типа (механические смеси)

Проведем анализ данной диаграммы состояния (рис. 3.4.)

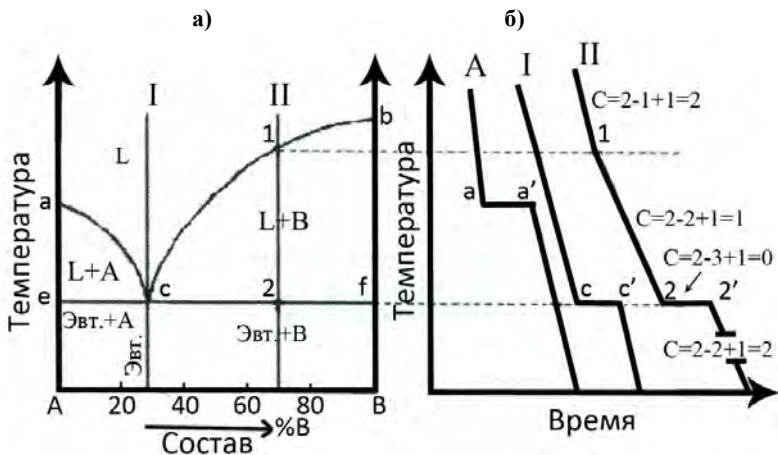


Рис. 3.4. Диаграмма состояния сплавов с отсутствием растворимости компонентов в твердом состоянии (а) и кривые охлаждения сплавов (б)

1. Количество компонентов: $K = 2$ (компоненты А и В);
2. Число фаз: $\Phi = 3$ (кристаллы компонента А, кристаллы компонента В, жидкая фаза).
3. Основные линии диаграммы:
 - линия ликвидус acb , состоит из двух ветвей, сходящихся в одной точке;
 - линия солидус ecf , параллельна оси концентраций стремится к осям компонентов, но не достигает их;
4. Типовые сплавы системы:

Чистые компоненты, кристаллизуются при постоянной температуре (см. кривую охлаждения А на рис. 3.4, б). Эвтектический сплав (сплав I) имеет состав, соответствующий точке c . Его кривая охлаждения аналогична кривым охлаждения чистых металлов (рис. 3.4, б).

Эвтектика – мелкодисперсная механическая смесь из разнородных кристаллов, образованная при первичной кристаллизации сплава (из расплава), который имеет минимальную температуру плавления в системе. При образовании сплавов механических смесей эвтектика состоит из кристаллов компонентов А и В: Эвт.(А+В)

Процесс кристаллизации эвтектического сплава I (рис. 3.4, б) следующий: до точки 1 охлаждается сплав в жидком состоянии. При температуре, соответствующей точке 1, начинается одновременная кристаллизация двух разнородных компонентов. На кривой охлаждения наблюдается изотермическая полочка, т.к. по правилу фаз в двухкомпонентной системе при наличии трех фаз (жидкой и кристаллов компонентов А и В) число степеней свободы будет равно нулю ($C = 2 - 3 + 1 = 0$). В точке 1' процесс кристаллизации завершается; сплав, состоит из дисперсных разнородных кристаллов компонентов А и В.

Другие сплавы охлаждаются аналогично сплаву II (рис. 3.4, б). Процесс кристаллизации сплава II следующий: до точки 1 охлаждается сплав в жидком состоянии. При температуре, соответствующей точке 1, начинают образовываться центры кристаллизации избыточного компонента В и отмечается перегиб, связанный с выделением скрытой теплоты кристаллизации. На всем участке 1–2 в процессе снижения температуры продолжается процесс кристаллизации, т.к. согласно правилу фаз в двухкомпонентной системе при наличии двух фаз (жидкой и кристаллов компонента В) число степеней свободы равно единице ($C = 2 - 2 + 1 = 1$). При охлаждении состав жидкой фазы изменяется по линии ликвидус до эвтектического состава (точка с). На участке 2–2' кристаллизуется эвтектика. Ниже точки 2' сплав состоит из кристаллов избыточного компонента В и эвтектики Эвт.(А+В).

Схема микроструктур сплавов представлена на рис. 3.5.

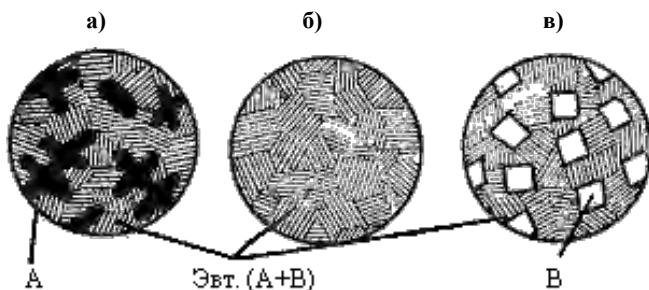


Рис. 3.5. Схема микроструктур сплавов:
а – доэвтектического, б – эвтектического, в – заэвтектического

5. При проведении количественного структурно-фазового анализа, конода, проведенная через заданную точку, пересекает линию ликвидус и оси компонентов, поэтому состав твердой фазы – это 100 % компонента А или В.

Порядок проведения и задания работы

1. Изучить установку для исследования процесса кристаллизации сплава термическим методом и зарисовать ее схему.

2. Изучить диаграммы состояния и методику построения диаграмм с помощью метода термического анализа.

3. Построить кривые охлаждения (с применением правила Гиббса и пояснением фазовых превращений) для выбранного преподавателем сплава двойной системы.

4. Определить с помощью правила отрезков состав и количественное соотношение фаз для заданной температуры сплава.

5. Посмотреть шлифы сплавов системы с эвтектикой типа Pb–Sb или Sn–Zn, схематично зарисовать их микроструктуры.

6. Сделать выводы и составить отчет по работе.

Содержание отчета

1. Название, цель и задачи работы.

2. Порядок проведения термического анализа, его основное назначение, схема оборудования для осуществления метода.

3. Диаграмма состояния эвтектического типа с кривыми охлаждения, основные определения.

4. Типичные микроструктуры сплавов в двойной металлической системе эвтектического типа.

5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Каким способом можно построить диаграмму состояния, на чем основан этот способ?

2. Какая температура кристаллизации у эвтектического сплава, выше или ниже исходных компонентов?

3. Можно ли по микроструктуре однофазного сплава определить его химический состав?

4. Какие структурные составляющие имеют до- и заэвтектические сплавы?

5. Можно ли по микроструктуре однофазного сплава определить его химический состав?

6. Каким компонентом обогащается расплав в процессе первичной кристаллизации заэвтектического сплава?

7. Как определить долю эвтектики и первичных кристаллов по диаграмме состояния эвтектического типа?

8. Сколько фаз двухкомпонентной системы должно быть в равновесии, чтобы на кривой охлаждения сплава появился горизонтальный (изотермический) участок.

Лабораторная работа № 4

ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗО – УГЛЕРОД

Цель работы: — изучение диаграмм состояния метастабильного и стабильного равновесия железуглеродистых сплавов, определение фазового и структурного состояния сплавов в зависимости от их состава и температуры, построение кривых охлаждения сталей и чугунов.

Диаграмма состояния системы железо – углерод дает основное представление о строении сталей и чугунов. Различают два типа диаграмм: Fe – C (рис. 4.1) и Fe – Fe₃C (рис. 4.2). В первом случае углерод находится в свободном состоянии в виде графита (Г), во втором случае он химически связан с железом в цементит Fe₃C (Ц).

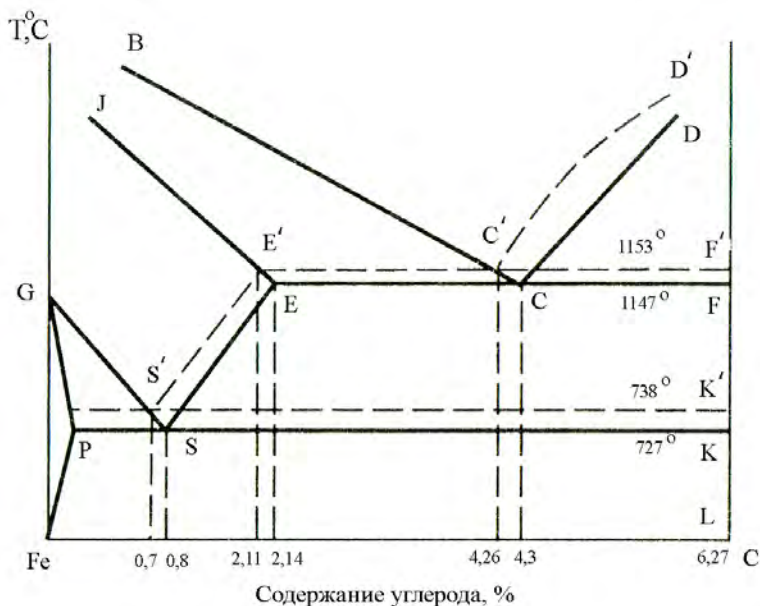
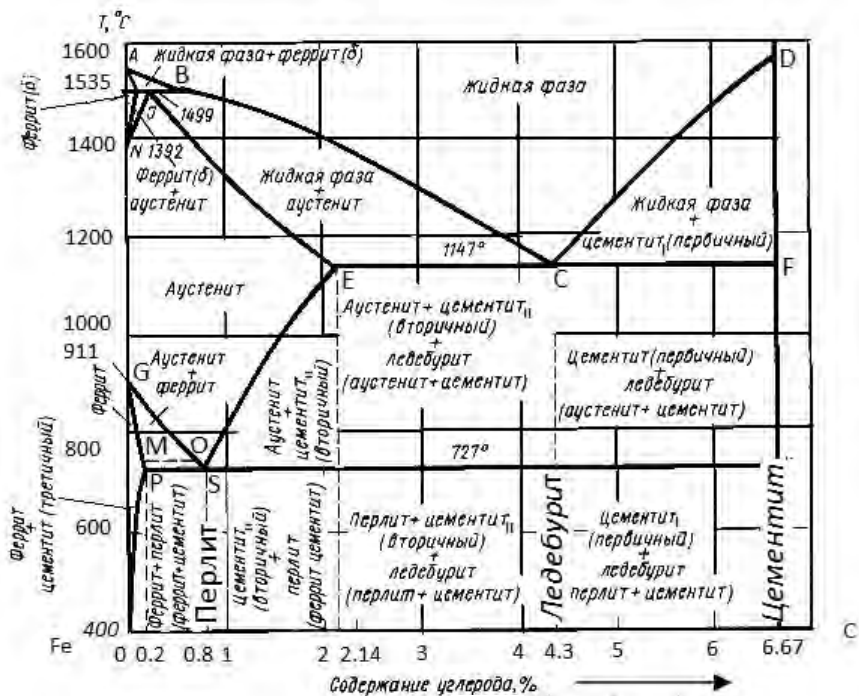
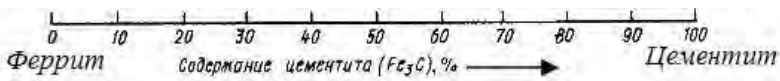


Рис. 4.1. Диаграмма состояния железо - графит



а)



б)

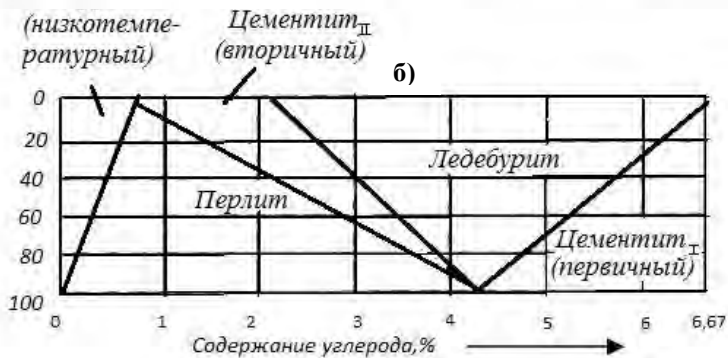


Рис. 4.2. Диаграмма состояния железо – цементит со шкалой фазового состава (а)

и шкалой структурного состояния (б) железоуглеродистых сплавов при 400°С

Диаграмма состояния Fe – Fe₃C характеризует фазовый состав и превращения в сплавах с концентрацией от чистого железа до цемента. Положение точек диаграммы указано в табл. 4.1.

Компонентами железоуглеродистых сплавов являются *железо, углерод и цементит*.

Таблица 4.1

Обозначение точки на диаграмме	Температура, °С	Концентрация углерода, %
<i>A</i>	1539	0
<i>H</i>	1499	0,1
<i>J</i>	1499	0,16
<i>B</i>	1499	0,51
<i>N</i>	1392	0
<i>D</i>	1600	6,67
<i>E</i>	1147	2,14
<i>C</i>	1147	4,3
<i>F</i>	1147	6,67
<i>G</i>	911	0
<i>P</i>	727	0,02
<i>S</i>	727	0,8
<i>K</i>	727	6,67
<i>Q</i>	600	0,006

Железо – переходный металл серебристого цвета. Имеет высокую температуру плавления, равную 1539° С. В твердом состоянии железо может находиться в двух модификациях. Полиморфные превращения происходят при температурах 911° С и 1392° С. При температуре ниже 911° С существует α -Fe с объемно-центрированной кубической (ОЦК) решеткой. В интервале температур 911...1392° С устойчивым является γ -Fe с гранцентрированной кубической (ГЦК) решеткой. Выше 1392° С железо имеет ОЦК решетку и называется δ -Fe или высокотемпературным α -Fe. Критическую температуру 911° С превращения α -Fe ↔ γ -Fe обозначают точкой *A*₃, а температуру 1392° С превращения γ -Fe ↔ δ -Fe - точкой *A*₄. При температуре ниже

768° С железо ферромагнитно, а выше – парамагнитно. Точка Кюри железа (768° С) обозначается A_2 .

Железо технической чистоты обладает невысокой твердостью (80 HV) и прочностью (предел прочности $\sigma_b = 250 \text{ МПа}$, предел текучести $\sigma_T = 120 \text{ МПа}$) и высокими характеристиками пластичности (относительное удлинение $\delta = 50 \%$, а относительное сужение $\Psi = 80 \%$). Железо характеризуется высоким модулем упругости.

Углерод относится к неметаллам. Обладает полиморфным превращением, в зависимости от условий образования существует в форме графита с гексагональной кристаллической решеткой (температура плавления 3500° С, плотность 2,5 г/см³) или в форме алмаза со сложной кубической решеткой с координационным числом равным четырем (температура плавления – 5000° С).

В сплавах железа с углеродом углерод находится в состоянии твердого раствора с железом, и в виде химического соединения – цементита (Fe_3C), а также в свободном состоянии в виде графита.

Цементит (Fe_3C) – химическое соединение железа с углеродом (карбид железа), содержит 6,67 % углерода. Аллотропических превращений не испытывает. Кристаллическая решетка цементита состоит из ряда октаэдров, оси которых наклонены друг к другу. Температура плавления цементита точно не установлена (1250...1600° С). Цементит при определенных условиях распадается с образованием графита.

При низких температурах цементит слабо ферромагнитен, магнитные свойства теряет при температуре около 217° С. Цементит имеет высокую твердость (более 800 HV , легко царапает стекло), но чрезвычайно низкую, практически нулевую, пластичность.

Фазы в системе Fe – Fe_3C присутствуют в следующем виде: *жидкая фаза, феррит, аустенит, цементит* (рис. 4.2).

Жидкая фаза (Ж). В жидком состоянии железо хорошо растворяет углерод с образованием однородной жидкой фазы.

Феррит (Ф) $Fe_\alpha(C)$ *низкотемпературный* – твердый раствор внедрения углерода в α -железо. Феррит имеет переменную растворимость углерода: минимальную – 0,006 % при комнатной температуре (точка Q), максимальную – 0,02 % при температуре 727° С (точка P). Выше 1392° С существует *высокотемпературный феррит* $Fe_\beta(C)$, с предельной растворимостью углерода 0,1 % при температу-

ре 1499° С (точка *H*). Свойства феррита близки к свойствам железа. Он мягок (твердость 130 *HB*, $\sigma_B = 300$ *МПа*) и пластичен ($\delta = 30$ %), магнитен до 768° С.

Аустенит (*A*) Fe_3C – твердый раствор внедрения углерода в γ -железо. Углерод занимает место в центре ГЦК ячейки. Аустенит имеет переменную растворимость углерода: минимальную – 0,8 % при температуре 727° С (точка *S*), максимальную – 2,14 % при температуре 1147° С (точка *E*). Аустенит имеет твердость 200...250 *HB*, пластичен ($\delta = 40...50$ %), парамагнитен.

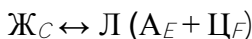
Цементит (*Ц*) В железоуглеродистых сплавах присутствуют фазы: цементит первичный (*Ц_I*), цементит вторичный (*Ц_{II}*), цементит третичный (*Ц_{III}*). Физико-химические свойства этих фаз одинаковы. На свойства сплавов оказывает влияние их размеры, количество и расположение. Цементит *Ц_I* выделяется из жидкой фазы в виде крупных пластинчатых кристаллов. Цементит *Ц_{II}* выделяется из аустенита при охлаждении в виде сетки вокруг зерен перлита. Цементит *Ц_{III}* выделяется из феррита в виде мелких включений по границам ферритных зерен.

Три структурные изотермические превращения происходят в системе Fe - Fe₃C (рис. 4.2):

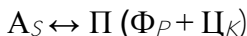
- перитектическое превращение на линии *HJB* (1499 °С):



- эвтектическое превращение на линии *ECF* (1147 °С):

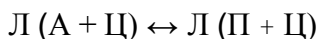


- эвтектоидное превращение на линии *PSK* (727 °С):



Эвтектоидная механическая смесь феррита и цементита называется *перлитом* (0,8 % С). Эвтектическая смесь аустенита и цементита называется *ледебуритом* (4,3 % С). Такой *ледебурит* считается *аустенитным* (высокотемпературным) и образуется при температуре 1147° С. При температуре 727° С из-за изотермического распада

аустенита образуется *перлитный* (низкотемпературный) *ледебурит*, представляющий собой механическую смесь перлита и цементита:



Критические точки - температуры, при которых происходят фазовые и структурные превращения в сплавах системы Fe - Fe₃C:

Точка А₁ – на линии *PSK* (А ↔ П)

Точка А₂ – на линии *MO* (768°C)

Точка А₃ – на линии *GOS* (А ↔ Ф) или (Fe_α(С) ↔ Fe_γ(С))

Точка А₄ – на линии *NJ* (А ↔ Ф) (Fe_γ(С) ↔ Fe_δ(С))

Точка *А_{cm}* – на линии *SE* (иногда обозначают, как А₃).

Линии, разделяющие фазовые области на диаграмме Fe – Fe₃C:

ABCD – линия ликвидус системы,

AHJECF – линия солидус,

ECF – линия эвтектического превращения,

PSK – линия эвтектоидного превращения;

MO – линия магнитного превращения,

BC – линия начала кристаллизации аустенита,

CD – линия начала кристаллизации цементита первичного,

SE – линия начала выделения цементита вторичного из аустенита,

PQ – линия начала выделения цементита третичного из феррита

Все сплавы системы Fe – Fe₃C по структурному признаку делят на две большие группы: *стали* и *чугуны*. *Углеродистыми сталями* называют сплавы железа с углеродом, содержащие 0,02...2,14 % углерода, заканчивающие кристаллизацию образованием аустенита. Сплавы железа с углеродом, содержащие углерода более 2,14 % (до 6,67 %), заканчивающие кристаллизацию образованием эвтектики (ледебурита), называют *чугунами*. Особую группу составляют сплавы с содержанием углерода менее 0,02 % (точка P), их называют *техническим железом*.

По содержанию углерода и микроструктуре *стали* подразделяются на: *доэвтектоидные* ($0,02\% < C < 0,8\%$) со структурой $\Phi + \Pi$ (феррит + перлит); *эвтектоидные* ($C = 0,8\%$) со структурой Π (перлит) и *заэвтектоидные* ($0,8\% < C < 2,14\%$) со структурой $\Pi + \text{Ц}_{\text{II}}$ (перлит + цементит вторичный). В свою очередь *чугуны* (белые) подразделяются на: *доэвтекктические* ($2,14\% < C < 4,3\%$) со структурой $\Pi + \text{Л} + \text{Ц}_{\text{II}}$ (перлит + ледебурит + цементит вторичный); *эвтекктические* ($C = 4,3\%$) со структурой Л (ледебурит), *заэвтекктические* ($4,3\% < C < 6,67\%$) со структурой $\text{Л} + \text{Ц}_I$ (ледебурит + цементит первичный).

Хотя стали и чугуны (белые) состоят из двух фаз: феррита и цементита, свойства этих сплавов значительно отличаются. Во многом свойства зависят от соотношения фаз и структурных составляющих. Поэтому важно уметь определять фазовый и структурный составы железоуглеродистых сплавов по диаграмме состояния $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$.

Соотношение фазовых или структурных составляющих сталей с достаточной точностью можно определить по правилу отрезков. Правило можно применять только в областях диаграммы, содержащих две составляющие. Например, сталь 40 ($0,4\% \text{ C}$) при 400° C имеет структуру $\Phi + \Pi$, процентное содержание ее составляющих такое:

$$\begin{aligned}\Phi &= (0,8 - 0,4)/(0,8 - 0,01) \times 100\% \sim 50\%. \\ \Pi &= 100 - 50 = 50\%\end{aligned}$$

Рис. 4.2, б подтверждает правильность расчетов, т.е. структура стали 40 должна содержать примерно 50 % феррита и 50 % перлита.

А процентное соотношение фаз ($\Phi + \text{Ц}$) в стали 40 следующее:

$$\begin{aligned}\Phi &= (6,67 - 0,4)/(6,67 - 0,01) \times 100\% \sim 94\% \\ \text{Ц} &= 100 - 94 = 6\%\end{aligned}$$

Для самопроверки на рис. 4.2, а по шкале «содержание цементита (Fe_3C)» находим, что сталь с $0,4\% \text{ C}$ содержит 6 % цементита.

Порядок проведения и задания работы

1. Вычертить диаграмму состояния железоуглеродистых сплавов, обозначив буквами ее линии, указав значения температур и содержание углерода.
2. Изучить кристаллическое строение и свойства компонентов железоуглеродистых сплавов.
3. Изучить фазы и структурные составляющие железоуглеродистых сплавов, показать их расположение на диаграмме Fe – Fe₃C.
4. Рассмотреть реакции структурообразования железоуглеродистых сплавов применительно к диаграмме Fe – Fe₃C.
5. Построить с применением правила фаз кривые охлаждения железоуглеродистых сплавов, указав фазы и структурные составляющие.
6. Определить процентное соотношение фаз и структурных составляющих в исследуемых сплавах на диаграмме Fe – Fe₃C.
7. Сделать выводы и написать отчет по работе.

Содержание отчета

1. Название, цель и задачи работы.
2. Диаграмма состояния Fe – Fe₃C с характерными кривыми охлаждения.
3. Основные представления о компонентах, фазах, критических точках и линиях в системе Fe – Fe₃C.
4. Расчет структурно-фазового состава железоуглеродистого сплава, заданного преподавателем.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Каким способом можно построить диаграмму состояния железо-углерод, чем различаются равновесная и неравновесная диаграммы?
2. Почему твердость железоуглеродистого сплава в системе Fe – Fe₃C возрастает с повышением содержания углерода в нем?
3. Какие и сколько фаз и структурных составляющих присутствуют в доэвтектоидной и заэвтектоидной сталях?
4. Чем отличается сталь от чугуна?
5. Можно ли по химический составу стали определить количество структурных составляющих в микроструктуре и наоборот?

6. При какой температуре проходят эвтектическое и эвтектоидное превращения, какой химический состав эвтектики и эвтектоида?

7. Какая самая твердая и какая самая мягкая фазы присутствуют в системе Fe – Fe₃C? Какой их химический состав и кристаллографическая структура?

8. Что общего и в чем различие между эвтектоидом и эвтектикой?

9. Сколько видов существует феррита, цементита, ледебурита, аустенита, перлита?

10. Как отличить феррит в доэвтектоидной стали от цементита в заэвтектоидной стали?

11. Почему перлит серого цвета, а феррит и цементит – белого цвета при рассмотрении их в оптическом микроскопе?

Лабораторная работа № 5

МИКРОСТРУКТУРА, СВОЙСТВА И МАРКИРОВКА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Цель работы — изучение микроструктуры углеродистых сталей в равновесном состоянии и определение марки углеродистой стали по структуре, построение кривых охлаждения углеродистых сталей.

Равновесные структуры сталей и превращения в них описываются диаграммой состояния системы Fe – Fe₃C (рис. 4.2). Такие структуры формируются после отжига путем охлаждения сталей вместе с печью из аустенитной области диаграммы Fe – Fe₃C.

Все стали состоят из двух фаз: феррита и цементита. Феррит мягок (80...130 НВ, $\sigma_b = 300$ МПа) и пластичен ($\delta = 30$ %), а цементит напротив – тверд (более 800 НВ) и хрупок. По мере увеличения содержания углерода стали в ее структуре возрастает доля цементита и уменьшается доля феррита (рис. 4.2, а), что в результате приводит к повышению твердости, прочности стали, с одной стороны, и снижению ее пластичности, вязкости, с другой (рис. 5.1).

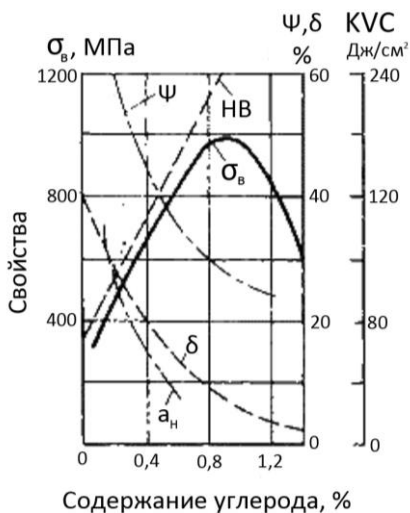


Рис. 5.1. Влияние углерода на свойства сталей

Вместе с тем изменяются и другие эксплуатационные, технологические и физико-химические свойства, например, сталь становится более износостойкой с увеличением в ней содержания углерода; хорошо сваривается сталь, содержащая до 0,37 % углерода, с большим содержанием углерода свариваемость стали ухудшается и т.д.

Микроструктуры углеродистых сталей

Структура сталей в отожженном состоянии зависит от содержания в них углерода и может быть определена с помощью диаграммы Fe – Fe₃C (рис. 4.2). *Углеродистыми сталями* называют сплавы железа с углеродом, содержащие 0,02...2,14 % углерода. Их структура формируется в результате перекристаллизации аустенита и представлена на рис. 5.2. Для выявления микроструктуры сталей чаще всего используют травильный раствор 3...5 % HNO₃ в спирте.

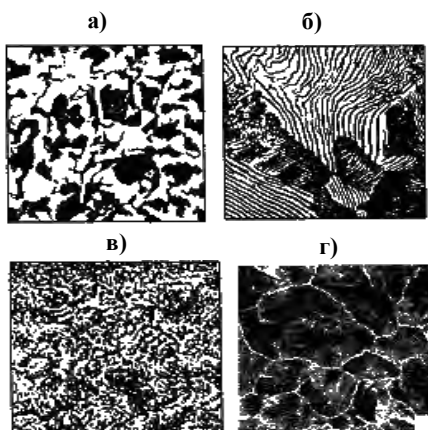


Рис. 5.2. Микроструктуры сталей:

- а – доэвтектоидная сталь (Ф + П); б – эвтектоидная сталь (пластинчатый П);
в – эвтектоидная сталь (зернистый П); г – заэвтектоидная сталь (П + Ц_{II})

По углеродному составу и микроструктуре углеродистые стали подразделяются на доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные.

Доэвтектоидные стали (0,02 % < C < 0,8 %) имеют Ф + П структуру, состоящую из избыточного феррита и перлита (рис. 5.2, а). Избыточный феррит зарождается как на границах аустенитных зерен, так и внутри них в виде равноосных или слегка вытянутых

кристаллов с искривленными границами. После травления избыточный феррит светлый, а перлит – темный. Чем больше углерода в доэвтектоидной стали, тем меньше в ее структуре избыточного феррита.

Эвтектоидная сталь ($C = 0,8 \%$) имеет П структуру, в которой перлит может быть пластинчатым (рис. 5.2, б) или зернистым (рис. 5.2, в). Доля цементита в эвтектоидной смеси, в соответствии с правилом рычага, составляет 12 %. Эвтектоид растет внутри аустенитных зерен в виде колоний, состоящих из пластин феррита (более толстых) и пластин цементита. При травлении раствором азотной кислоты полированная поверхность шлифа приобретает перламутровый оттенок.

У *заэвтектоидных сталей* ($0,8 \% < C < 2,14 \%$) П + Ц_{II} структура состоит из темных зерен перлита и светлой сетки вторичного цементита, который располагается вокруг перлитных зерен (см. рис. 5.2, в).

Перлит присутствует как в доэвтектоидной, так и в заэвтектоидной стали, отличить при микроанализе одну сталь от другой можно только по избыточным выделениям. Сложность состоит в том, что при травлении азотной кислотой избыточный феррит и цементит имеют светлый оттенок. Отличить их друг от друга можно следующим образом.

Если в отожженной стали наряду с темным перлитом обнаруживается светлая составляющая, занимающая более 23 % площади шлифа, видимого в микроскоп, то эта светлая составляющая является избыточным ферритом, и сталь, следовательно, доэвтектоидная. Это вытекает из того, что максимальная доля вторичного цементита, рассчитанная по правилу отрезков, не может превышать 23 %:

$$(2,14 - 0,8)/(6,67 - 0,8) \times 100\% \sim (23 \%).$$

Можно отличить вторичный цементит от избыточного феррита по форме и оттенку выделений. Сетка избыточного феррита после отжига составлена из отдельных частиц, в то время как вторичный цементит на шлифе выявляется в виде почти непрерывной сетки. Сетка из вторичного цементита выступает на поверхности, так как твердый цементит после полировки слегка возвышается над более мягким и сильнее отполированным перлитом. Вторичный цементит

может выделяться из аустенита также в виде изолированных игл как по границам, так и внутри колоний перлита. Наконец, цементит кажется под микроскопом более светлым по сравнению с ферритом.

Особую группу сплавов с содержанием углерода менее 0,02 % (точка Р) называют *техническим железом* (рис. 5.3). Его структура при содержании углерода ($C < 0,006$ %) состоит из зерен феррита (рис. 5.3, а) или из зерен феррита с кристаллами цементита третичного, расположенных по границам ферритных зерен (рис. 5.3, б), если содержание углерода в пределах ($0,006 < C < 0,02$ %). Максимальное количество (доля) третичного цементита составляет всего около 0,3 %. Поэтому в структуре всех сталей третичный цементит практически не виден.

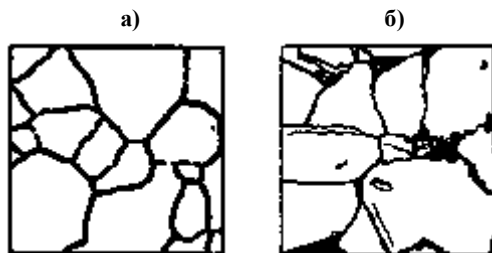


Рис. 5.3. Микроструктуры технического железа:
а – содержание углерода менее 0,006%; б – содержание углерода 0,006...0,02 %

Металлографическое определение содержания углерода в отожженных сталях

По равновесной микроструктуре (отожженных) углеродистых сталей, с помощью правила пропорций на диаграмме состояния Fe – Fe₃C (рис. 4.2) можно приблизительно рассчитать количество углерода в составе сплава и определить марку стали. Для этого на микрошлифе оценивается (в процентах по массе) соотношение площадей структурных составляющих стали. Пропорция вытекает из примерного равенства плотностей феррита, перлита, цементита; в противном случае можно было бы судить только об объемных соотношениях. Если абсолютная ошибка в оценке площади, занимаемой перлитом, составляет 10 %, то абсолютная ошибка в определении

содержания углерода составляет 0,08 %. При расчете следует учитывать, что при комнатной температуре количество углерода в феррите составляет 0,006 %, в перлите – 0,8 %, в цементите – 6,67 %.

Например, содержание углерода в доэвтектоидной стали, содержащей 50 % П + 50 % Ф определяют как сумму составляющих:

$$\begin{aligned} & 50\% \text{ П } (0,8\% \text{ С}) / 100\% \sim 0,4\% \text{ С} \\ & 50\% \text{ Ф } (0,006\% \text{ С}) / 100\% \sim 0,003\% \text{ С} \end{aligned}$$

Ничтожное количество углерода в феррите можно не учитывать. Тогда марка углеродистой стали определяется только при содержании 0,4 % С. Согласно ГОСТ 1050-74 – это конструкционная сталь 40.

При определении содержания углерода в заэвтектоидной стали по микроструктуре следует определить соотношение площадей, занятых перлитом и цементитом вторичным. Например, содержание углерода в заэвтектоидной стали, содержащей 95 % П + 5 % Ц определяют по формуле, как сумму слагаемых:

$$\begin{aligned} & 95\% \text{ П } (0,8\% \text{ С}) / 100\% \sim 0,76\% \text{ С} \\ & 5\% \text{ Ц } (6,67\% \text{ С}) / 100\% \sim 0,33\% \text{ С} \end{aligned}$$

В сумме это составит 1,09 % С. Это содержание согласно ГОСТ 1050-74 соответствует инструментальной стали марка У11.

Стандартные марки углеродистых сталей

Различают углеродистые стали обыкновенного качества, качественные и высококачественные. Качество и рабочие свойства сталей повышаются с уменьшением вредных примесей серы и фосфора.

Конструкционные углеродистые стали обыкновенного качества (ГОСТ 380-88) содержат повышенное количество серы и фосфора. Маркируют: Ст2кп., БСт3кп, ВСт3пс, ВСт4сп., где Ст – индекс данной группы стали; кп, пс, сп – степень раскисленности стали: кп – кипящая, пс – полуспокойная, сп – спокойная. По гарантиям при поставке стали делят на три группы: А, Б и В. Стали группы А при поставке гарантируют механические свойства (индекс группы А не указывается) и предназначены для изготовления изделий, не подвер-

гающихся горячей обработке. Стали группы Б гарантируют химический состав и используют для изделий, подвергающихся горячей обработке. Стали группы В гарантируют механические свойства и химический состав; из них изготавливают сварные конструкции. Цифры 0...6 – условный номер марки стали, содержащей углерод в пределах:

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

При переходе от марки Ст1 к марке Ст6 предел прочности возрастает от 300 до 600 МПа, а пластичность снижается. Стали обыкновенного качества широко используют для изготовления деформированных полуфабрикатов: листов, прутков, труб, заклепок, болтов, шайб и т.д.

Конструкционные качественные углеродистые стали (ГОСТ 1050–74) содержат не более 0,035 % фосфора, не более 0,04 % серы, 0,05...0,6 % углерода и выпускаются следующих марок: 05кп, 08кп, 08пс, 08, 10кп, 10пс, 10, 15кп, 15пс, 15, 20кп, 20пс, 20, 25, 35, 45 и т. д. Качественные стали маркируют двумя цифрами, которые указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента:

Марка стали...	08	10	15	20	30	40	50	60
С, %...	0,05...0,12	0,07...0,14	0,12...0,19	0,17...0,24	0,27...0,35	0,37...0,45	0,47...0,55	0,57...0,65

Качественные стали поставляют с гарантированными механическими свойствами и химическим составом. Степень раскисленности указывается, если она отличается от спокойной. Они могут использоваться без упрочняющей термической обработки или после нее.

Качественные стали обладают более высокими свойствами (пластичностью, прочностью, свариваемостью), чем стали обыкновенного качества. Их применяют для деталей более ответственного назначения: коленчатых валов, зубчатых колес, пружин, рессор, осей, винтов, втулок, тяг, прокатных валков, дисков сцепления, шатунов и т.д.

Инструментальные углеродистые стали (ГОСТ 1435–74) выпускаются *качественными* (У7, У8, У9...У13) с содержанием вредных примесей $S < 0,028$, $P < 0,035$ %) или высококачественными (У7А ...У13А) с содержанием $S < 0,02$ %, $P < 0,03$ %). Маркируют буквой У и цифрой, указывающей среднее содержание углерода в

десятых долей %:

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

Для обозначения высокого качества в конце марки инструментальной стали ставят букву А: У10А, У12А.

Инструментальные углеродистые стали обладают высокой твердостью и износостойкостью, поэтому их используют для изготовления инструмента, работающего в условиях ударных нагрузок (штампов, молотков, стамесок, долот, зубил), режущего инструмента для обработки мягких материалов (резцов, сверл, метчиков, фрез, напильников, бřitв) и мерительного инструмента (калибров, пробок, линеек).

Для нарезания на станках-автоматах деталей массового производства (шайб, болтов, гаек, шпилек, пр.) применяют низкоуглеродистые стали (0,08...0,45 % С) с повышенным содержанием серы (0,08...0,3 %), фосфора (0,05...0,16 %) и марганца (0,6...1,55 %). Такие стали называются автоматными. Образование хрупких включений (MnS и др.) на границах зерен стали облегчает резание, способствует дроблению и легкому отделению стружки. Увеличивается срок службы режущего инструмента и улучшается качество обрабатываемых поверхностей. В соответствии с ГОСТ 1414-75 автоматные стали маркируют А11, А12, А20, А30, А40Г. В обозначении марки буква А указывает, что сталь автоматная, а цифры – содержание углерода в сотых долях процента.

Порядок проведения и задания работы

1. Начертить участок диаграммы состояния Fe – Fe₃C с обозначениями фаз, соответствующий углеродистым сталям.
2. Просмотреть набор приготовленных шлифов углеродистых сталей при увеличении 250...500.
3. Подробно рассмотреть шлиф эвтектоидной стали для изучения строения перлита при увеличении не менее 500.
4. Схематично зарисовать изученные микроструктуры сталей.
5. По микроструктуре углеродистых сталей определить содержание в них углерода, изучить их структурно-фазовый состав.

6. Сделать выводы и составить отчет по работе.

Содержание отчета

1. Название, цель и задачи работы.
2. Основные представления об углеродистых сталях, их структурное различие, свойства и маркировка.
3. Зарисовки микроструктур углеродистых сталей. Каждую структуру (эвтектоидной, доэвтектоидной и заэвтектоидной стали) нужно подписать, а стрелками указать структурные составляющие.
4. Определение содержания углерода в стали по микроструктуре.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какие сплавы относятся к сталям?
2. Как классифицируют углеродистые стали?
3. Какова предельная растворимость углерода в $\alpha\text{-Fe}$ и $\gamma\text{-Fe}$?
4. Какой процесс протекает в сталях при переохладении аустенита ниже температуры 727°C ?
5. Что такое перлит и сколько углерода он содержит?
6. Какие структурные составляющие имеют доэвтектоидная и заэвтектоидная стали и как их отличить по микроструктуре?
7. По какой формуле, используя микроструктуру, определяют содержание углерода в отожженной углеродистой стали?
8. В каких пределах может изменяться количество избыточного феррита в доэвтектоидных сталях разного состава?
10. Какое максимальное количество избыточного цемента может быть в заэвтектоидных сталях?
11. Как обозначают качественные и инструментальные стали?
12. До какой температуры надо нагреть сталь У12, чтобы полностью исчез цементит?
13. Как оценить количество перлита в стали У10?

Лабораторная работа № 6

МИКРОСТРУКТУРА, СВОЙСТВА И МАРКИРОВКА ЧУГУНОВ

Цель работы — изучение микроструктуры чугунов разных марок в равновесном состоянии, определение структурно-фазового состава белых чугунов, построение кривых охлаждения.

Чугунами называют железоуглеродистые сплавы, содержащие более 2,14 % углерода. По структуре чугуны делят на три группы: (1) на белые (БЧ), в которых углерод растворен и химически связан с железом; (2) на серые (СЧ), ковкие (КЧ), высокопрочные (ВЧ), в которых углерод находится в свободном состоянии в виде графита; (3) на половинчатые (ИЧ), в которых часть углерода находится в виде графита, остальная (> 2 % С) – в форме цементита (рис. 6.1).


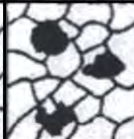
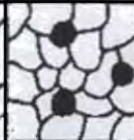






Металлическая основа	Класс чугуна		
	Серый СЧ	Ковкий КЧ	Высокопрочный ВЧ
Феррит			
Феррит + Перлит			
Перлит			

Рис. 6.1. Схема микроструктур чугуна в зависимости от металлической основы и формы графитовых включений

В структуре серых чугунов присутствует графит пластинчатой формы ($\Gamma_{пл}$); в ковких чугунах - хлопьевидный ($\Gamma_{хл}$), в высокопрочных – шаровидный ($\Gamma_{ш}$) и вермикулярный графит. Включения графита могут распределяться в ферритной, перлитной или ферритно-перлитной матрице:

Белые чугуны

Белые чугуны кристаллизуются по диаграмме равновесия системы $Fe - Fe_3C$ (рис. 4.2). В белых чугунах углерод, не вошедший в твердый раствор на основе железа, образует с железом карбид Fe_3C (цементит). В них обязательно кристаллизуется эвтектика (аустенит + цементит), называемая *ледебуритом* (Л). Чугуны с таким фазовым составом имеют белый блестящий излом и поэтому их называют белыми. По химическому составу и структуре белые чугуны подразделяют на эвтектические, доэвтектические и заэвтектические чугуны (рис. 6.2).

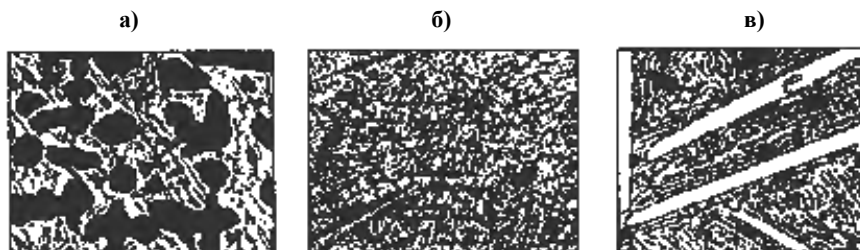


Рис. 6.2. Микроструктуры белых чугунов
 а – доэвтектический белый чугун ($\Pi + Л + Ц_{II}$); б – эвтектический белый чугун (Л);
 в – заэвтектический белый чугун (Л + Π)

Эвтектический белый чугун содержит 4,3 % углерода. Его структура (рис. 6.2, б) при комнатной температуре полностью состоит из ледебуритной эвтектики, состоящей из цементита и расположенного в нем перлита сравнительно высокой дисперсности. *Доэвтектические белые чугуны* ($2,14 \% < C < 4,3 \%$) имеют структуру (рис. 6.2, а), состоящую из перлита Π ($\Phi + Ц$), цементита вторичного $Ц_{II}$ и ледебурита Л ($\Pi + Ц$). Перлит имеет дендритное (древовидное) строение, наследуемое от аустенита, кристаллизующего-

ся из жидкости, и затем претерпевшего эвтектоидное превращение (при 727 °С). А цементит вторичный сливается с цементитом, входящим в состав ледебурита. *Заэвтектические белые чугуны* ($4,3 \% < C < 6,67 \%$) имеют структуру, состоящую из ледебурита Л (П + Ц) и цементита первичного Ц₁ (рис. 6.2, в). В матрице ледебурита расположены крупные призматические кристаллы цементита первичного.

Все белые чугуны состоят из двух фаз: мягкого феррита (80...130 НВ) и твердого (более 800 НВ), но хрупкого цементита. По мере увеличения содержания углерода в структуре белого чугуна возрастает доля цементита и уменьшается доля феррита, например, чугун с 4,3 % С содержит значительное количество цементита (до 66 %). Из-за избытка цементита в структуре, белые чугуны имеют повышенную хрупкость и низкие показатели механических свойств. Поэтому их используют для изготовления деталей, работающих в условиях повышенного абразивного изнашивания (мельничные шары, лопатки пескоструйных и дробеметных машин, детали гидромашин и др.).

Влияние графита на механические свойства чугунов

Графитовые включения можно рассматривать как различной формы пустоты, возле которых концентрируются напряжения; их значения тем выше, чем острее дефект. Поэтому графит пластинчатой формы в наибольшей мере разупрочняет матрицу, а шаровидной – в наименьшей. Так, относительное удлинение δ серых чугунов составляет 1 %, ковких – до 12 %, высокопрочных – до 15 %. Графит сильно снижает сопротивление удару, разрыву и мало – сжатию.

Преимущества присутствия графита в структуре чугуна:

- улучшается обрабатываемость резанием чугуна, т.к. образуется более ломкая стружка;
- улучшаются антифрикционные свойства чугуна, по сравнению со сталью, т.к. графит выполняет роль смазки;
- чугун хорошо гасит вибрации и имеет повышенную циклическую вязкость из-за микропустот, заполненных графитом;
- детали из чугуна не чувствительны к внешним концентраторам напряжений (выточкам, отверстиям, резким переходам в сечениях);
- чугун значительно дешевле стали;

- чугун обладает хорошими литейными свойствами, литьем можно дешевле и проще изготавливать изделия сложной формы;
- чугун на ферритной основе имеет хорошую коррозионную стойкость, поскольку свободный графит и феррит устойчивы при коррозионной воздействию окружающей среды.

Ковкие чугуны

Ковкий чугун получают из белого чугуна с помощью графитизирующего отжига. При этом отжиге образуется графит хлопьевидной формы (рис. 6.1), называемый *графитом отжига*. Хотя ковкий чугун не куют, его относительное удлинение δ достигает 12 %, а у исходного белого чугуна δ не превышает 0,2 %.

Ковкий чугун маркируют буквами КЧ и двумя цифрами, обозначающие минимальные значения σ_b (кгс/мм²) и δ (%). Например, у ферритного ковкого чугуна марки КЧ37-12 $\sigma_b = 370$ МПа, $\delta = 12$ %, у перлитного чугуна КЧ63-2 $\sigma_b = 630$ МПа и $\delta = 2$ %. Перлит примерно в 2,5 раза прочнее феррита, но менее пластичен. Поэтому ферритный ковкий чугун более пластичный, чем перлитный, а по прочности - наоборот. Литые изделия из КЧ самые разнообразные: пробки, гайки, кронштейны, втулки, фланцы, ступицы, тормозные колодки, коленчатые валы, др.

Режим отжига белого чугуна для получения ковкого представлен на рис. 6.3 и состоит из 2 стадий; его продолжительность составляет 20...40 ч. Рекомендуемый химический состав белого чугуна: 2,4...2,9 % С; 1,0...1,6 % Si; 0,3...1,0 % Mn, причем соблюдается условие: Si + C < 3,8 %. Его исходная структура П + Л(П + Ц) + Ц_{II}, а фазовый состав: Ф + Ц. На 1-й стадии графитизации при нагреве белого чугуна до 900...1050° С происходит аустинизация и растворение вторичного цементита; после 10 часовой выдержки весь цементит превращается в хлопьевидный графит Г_{хл}; и тогда структура из А + Ц преобразуется в А + Г_{хл} (рис. 6.3, 1). На 2-й стадии графитизирующего отжига формируется металлическая матрица ковкого чугуна. Для получения чисто перлитной матрицы проводят ускоренное охлаждение (рис. 6.3, 1/). Для получения чисто ферритной матрицы проводят очень медленное охлаждение или изотермическую выдержку в интервале температур эвтектоидного распада (727 °С). Для

повышения пластичности ковкого чугуна и сохранения высокой прочности еще осуществляют отжиг на зернистый перлит, который состоит в замедленном охлаждении или 2...4 часовой выдержке при 690...650° С. В результате такого отжига происходит сфероидизация пластин цементита.

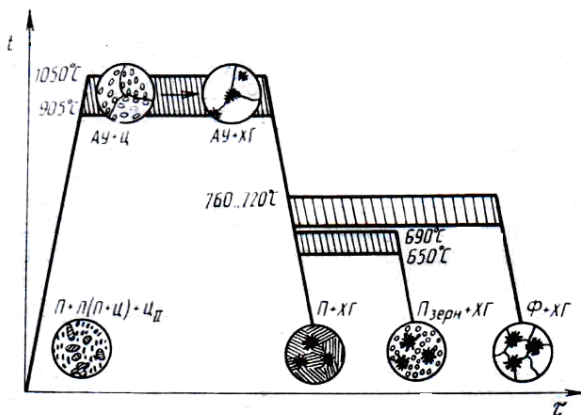


Рис. 6.3. Схема отжига белого чугуна для получения ковкого

Серые чугуны

Структура серого чугуна (рис. 6.1) формируется непосредственно при кристаллизации в соответствии с диаграммой стабильного равновесия системы железо – графит (рис. 4.1). Чем больше углерода и кремния в сплаве и ниже скорость его охлаждения, тем выше вероятность кристаллизации по диаграмме стабильного равновесия с образованием графитной эвтектики:



Обычно в серых чугунах содержится 3,0...3,7 % С; 1,2...6 % Si; 0,5...0,8 % Mn; 0,1...0,3 % P; < 0,12 % S. При удовлетворении условия: $\text{C} + \text{Si}/3 = 4,3$ %, чугун становится эвтектическим и обладает хорошими технологическими свойствами: жидкотекучестью, малой усадкой, небольшим пригаром литевой формы. Роль кремния, как сильного графитообразующего элемента, состоит в том, что крем-

ний способствует уменьшению растворимости углерода в аустените, жидкая фаза обогащается углеродом и процесс образования графита облегчается.

Согласно ГОСТ 1412-85 серые чугуны подразделяют на 10 марок: СЧ10, СЧ15, СЧ18, СЧ20, СЧ25, СЧ30, СЧ35 и др. Цифры соответствуют минимальному пределу прочности при растяжении σ_b (кгс/мм²).

Структура не оказывает влияние на пластичность, она остается чрезвычайно низкой. Но оказывает влияние на твердость. Механическая прочность в основном определяется количеством, формой и размерами включений графита. Мелкие, завихренной формы чешуйки графита меньше снижают прочность. Такая форма достигается путем модифицирования алюминием, силикокальцием, ферросилицием.

Серые чугуны (ГОСТ 1412-85) могут иметь ферритную (СЧ10), феррито-перлитную (СЧ18) и перлитную (СЧ25) металлическую основу. При выборе матрицы лучшими прочностными свойствами и износостойкостью обладают перлитные серые чугуны.

Серые чугуны широко применяются в машиностроении. При конструировании деталей машин учитывают, что серые чугуны работают на сжатие лучше, чем на растяжение. Они мало чувствительны к надрезам при циклическом нагружении, хорошо поглощают колебания вибраций, обладают высокими антифрикционными свойствами из-за смазывающей способности графита, хорошо обрабатываются резанием, изделия из них дешевы и просты в изготовлении. В станкостроении из серых чугунов изготавливают базовые корпусные детали, станины станков, столы и верхние салазки, шпиндельные бабки, колонки, каретки, кронштейны, зубчатые колеса, направляющие; в автомобилестроении - блоки цилиндров, поршневые кольца, распределительные валы, диски сцепления, картеры, тормозные барабаны, гильзы, маховики. Отливки из серого чугуна используются в электромашиностроении, для изготовления художественных изделий и товаров народного потребления.

Высокопрочные чугуны

При введении в жидкий серый чугун 0,1...0,5 % Mg, 0,2...0,3 % Се графит кристаллизуется в шаровидной или близкой к ней форме

(рис. 6.1). На практике широко используют комплексные модификаторы, содержащие Mg, Ca и редкоземельные металлы. Поэтому такой чугун называют *модифицированным*. Высокопрочные чугуны обычно содержат: 3,2...3,8 % C; 1,9...2,6 % Si; 0,6...0,8 % Mn; 0,12 % P. Содержание в них серы (0,02...0,03 % S) существенно ниже, чем в серых и ковких чугунах (0,1...0,15 % S).

Согласно ГОСТ 7293-85 применяют высокопрочный чугун следующих марок: ВЧ35, ВЧ40, ВЧ45, ВЧ50, ВЧ60, ВЧ70, ВЧ80, ВЧ100. Цифры соответствуют минимальному пределу прочности при растяжении $\sigma_{в}$, (кгс/мм²).

Высокопрочные чугуны (ГОСТ 7293-85) могут иметь ферритную (ВЧ 35), феррито-перлитную (ВЧ45) и перлитную (ВЧ 80) металлическую основу. При выборе матрицы лучшими прочностными свойствами обладают перлитные чугуны, а более пластичны – ферритные. Отливки из высокопрочных перлитных чугунов имеют высокий предел текучести $\sigma_T = 300...420$ МПа, что даже выше предела текучести стальных отливок, а также обладают достаточно высокой ударной вязкостью и усталостной прочностью $\sigma_{-1} = 230...250$ МПа.

Шаровидные включения графита меньше, чем пластинчатые, ослабляют сечение металлической матрицы, являясь менее сильными концентраторами напряжений. Поэтому по сравнению с серыми чугунами, механические свойства высокопрочных чугунов повышаются. Кроме того, эти чугуны обладают высокой жидкотекучестью, линейная усадка отливок – около 1 %. Они хорошо обрабатываются резанием, удовлетворительно свариваются.

Обладая хорошими литейными и технологическими свойствами, высокопрочные чугуны применяются для замены стальных литых и кованных деталей: коленчатые и распределительные валы, детали зубчатых передач, т.д. Такие детали малочувствительны к внешним концентраторам напряжения, имеют лучшие антифрикционные свойства, более высокую циклическую прочность и значительно дешевле. Из высокопрочного чугуна изготавливают тонкостенные поршневые кольца, шаботы ковочных молотов, станины и рамы прессов и прокатных станов, изложницы, резцедержатели, планшайбы.

К числу высокопрочных также относят чугуны, имеющие вермикулярную (червеобразную) форму графита.

Высокой износостойкостью обладают половинчатые чугуны (ИЧ); в них часть углерода находится в виде шаровидного или пластинчатого графита, остальная часть - в виде цементита. На практике используют, например, чугун ИЧНХ2, легированный никелем и хромом (с пластинчатым графитом), чугуны ИЧХНТ и ИЧН1МШ (с шаровидным графитом) и т.д. Из них отливают детали двигателей внутреннего сгорания: крышки и днища цилиндров, головки поршней и др.

К износостойким относится отбеленный серый чугун (ОЧ), имеющий тонкий поверхностный слой со структурой белого чугуна. Применяется для изготовления отливок прокатных валов, вагонных колес и т.д.

Микроструктурный анализ чугунов проводят первоначально на нетравленных шлифах. Графит выглядит темной фазой на светлом фоне. По форме, распределению и размерам включений графита устанавливают вид чугуна: серый, ковкий, высокопрочный. Металлическую матрицу изучают после травления микрошлифов, определяя на какой основе чугуны: на перлитной, ферритной и т.д. Согласно ГОСТ 3443-77 дают детальную оценку структуры чугунов.

Порядок проведения и задания работы

1. Начертить участок диаграммы состояния $Fe - Fe_3C$ с обозначениями фаз, соответствующий белым чугунам.
2. Просмотреть набор приготовленных шлифов белых, серых, ковких, высокопрочных чугунов при увеличении 250...500.
3. Подробно рассмотреть шлиф эвтектического чугуна для изучения строения ледебурита при увеличении не менее 500.
4. Схематично зарисовать изученные микроструктуры чугунов.
5. По микроструктуре белых чугунов определить содержание в них углерода, изучить их структурно-фазовый состав.
6. Сделать выводы и составить отчет по работе.

Содержание отчета

1. Название, цель и задачи работы.
2. Основные представления о чугунах, их структурное различие, свойства и маркировка.
3. Зарисовки микроструктур различных чугунов. Каждую структуру чугуна нужно подписать, а стрелками указать структурные со-

ставляющие.

4. Расчет структурно-фазового состава белого чугуна железо-углеродистого сплава, заданного преподавателем.

5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какие сплавы относятся к чугунам?
2. Какие чугуны называют серыми и чем они отличаются от белых?
3. Как отличить по микроструктуре заэвтектический белый чугун от доэвтектического?
4. Какие реакции протекают при формировании доэвтектического белого чугуна?
5. Что такое ледебурит и сколько в нем содержится углерода?
6. Какие фазы присутствуют (при комнатной температуре) в структуре серого чугуна на ферритно-перлитной основе?
7. При какой температуре исчезнет феррит при нагреве эвтектического белого чугуна?
8. Какой процесс протекает в белых чугунах при переохлаждении ниже температуры 1147°C ?
9. Какой белый чугун тверже доэвтектический или заэвтектический?
10. Какими методами получают ковкий и высокопрочный чугуны? Как они маркируются?
11. Почему с повышением содержания углерода белый чугун становится более хрупким?
12. Чем отличается по структуре серый чугун от высокопрочного, если оба чугуна имеют одинаковую ферритную матрицу и одно и то же содержание углерода?
13. Почему круглая форма графитовых включений обеспечивает более высокие свойства чугунам, чем пластинчатая?

Лабораторная работа № 7

МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

Цель работы — изучение микроструктур покрытий, полученных на сталях при химико-термической обработке, режимов ее проведения и составов насыщающих сред

Уровень развития современной техники характеризуется высокой интенсивностью эксплуатации инструментов, деталей машин и изделий. Это требует существенного улучшения их эксплуатационных свойств и работоспособности, что можно достичь путем применения различные способов упрочнения и нанесения защитных покрытий.

Упрочнение материала – это *повышение конструкционной прочности* в результате положительных изменений его химического состава, структуры и напряженного состояния, а *упрочняющие технологии* - это различные технологические, металлургические и другие процессы, которые обеспечивают материалу высокую конструкционную прочность в данных условиях эксплуатации. *Работоспособность* определяет состояние, при котором в данный момент основные рабочие параметры материала (изделия) находятся в пределах, установленных требованиями технической документации. При разных условиях эксплуатации изделий эти требования меняются, поэтому одна и та же технология в одних условиях работы может иметь упрочняющий эффект, в других – нет.

Согласно Савицкому Е.М. *конструкционная прочность* рассматривается, как сопротивление материала внешним воздействиям, приводящим к снижению его работоспособности и разрушению. Арзамасов Б.В. считает, что *конструкционная прочность* материала представляет собой совокупность механических и физико-химических свойств, обеспечивающих работоспособность материала в течение длительной эксплуатации. С этих позиций основными *критериями* конструкционной прочности материала являются его *жесткость, надежность, долговечность и прочность*; а *качество* материала гарантирует стабильное сохранение свойств последних трех критериев (рис. 7.1).

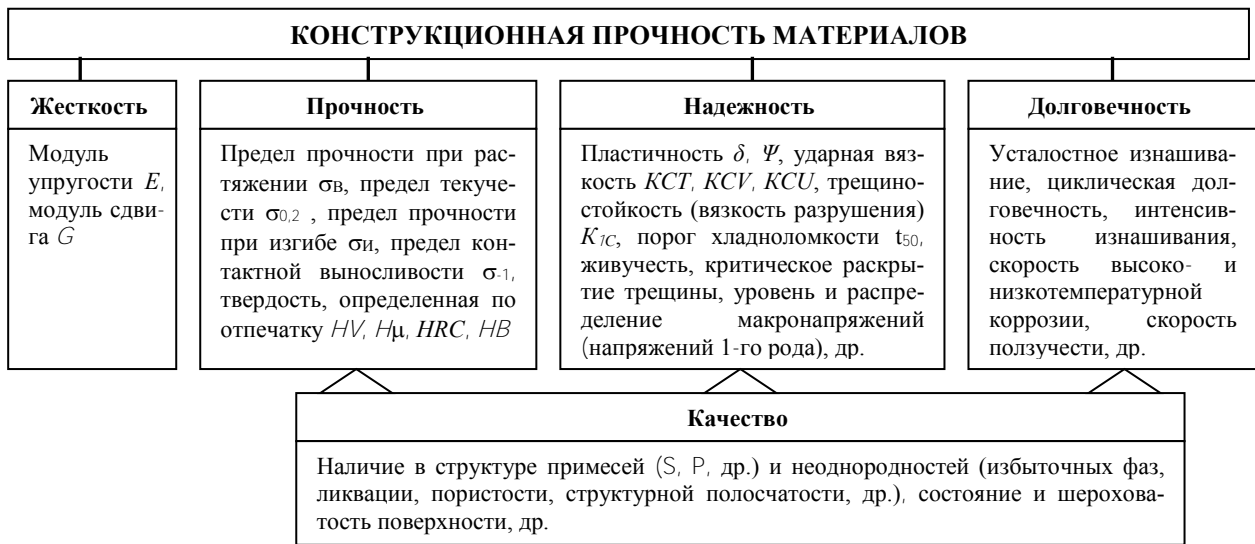


Рис. 7.1. – Основные критерии конструкционной прочности материалов

В зависимости от того, на какую глубину изделия идет упрочнение, может быть *поверхностное или объемное упрочнение*. Среди различных способов поверхностного упрочнения сплавов следует выделить способы нанесения защитных покрытий путем применения методов химического, термического, химико-термического и др. воздействий. К покрытиям предъявляют несколько требований, выполнение которых обеспечивает изделиям высокую работоспособность (рис. 7.2).

На практике широко используются покрытия, полученные при химико-термической обработке (ХТО) сталей и сплавов, а именно: при цементации, азотировании, нитроцементации, борировании, диффузионном цинковании, хромировании и др.

Химико-термическая обработка – процесс изменения химического состава, структуры и свойств поверхностного слоя материала в результате его нагрева в химически активной среде (твердой, жидкой, газообразной, вакуумной, плазменной). ХТО можно рассматривать, и как диффузионное насыщение поверхности материала одним или несколькими легирующими элементами.

Любой процесс ХТО включает три основные стадии: 1) *диссоциацию* – образование в насыщающей среде активных атомов насыщающего элемента в результате химических реакций, а также испарения; 2) *адсорбцию* – поглощение (захват) активных атомов поверхностью насыщаемого материала; 3) *диффузию* – проникновение адсорбированных атомов вглубь насыщаемого материала.

Непременным условием осуществления процесса ХТО должно являться взаимодействие насыщающего элемента с основным металлом, между которыми должны образовываться твердые растворы или химические соединения. Фазовый состав диффузионных слоев можно определить по изотермическому разрезу диаграммы в системе «основной металл – насыщающий элемент» при температуре проведения ХТО, например, по диаграмме Fe – C при цементации. Скорость формирования (толщина) диффузионного слоя зависит от природы насыщающего элемента и насыщаемого металла, температуры и продолжительности ХТО. Элементы (C, N, B), имеющие атомы значительно меньшего размера, чем насыщаемый металл (Fe), и образующие твердые растворы внедрения, диффундируют значительно быстрее, чем элементы, образующие твердые растворы замещения (Cr, Ti, V, Mn).

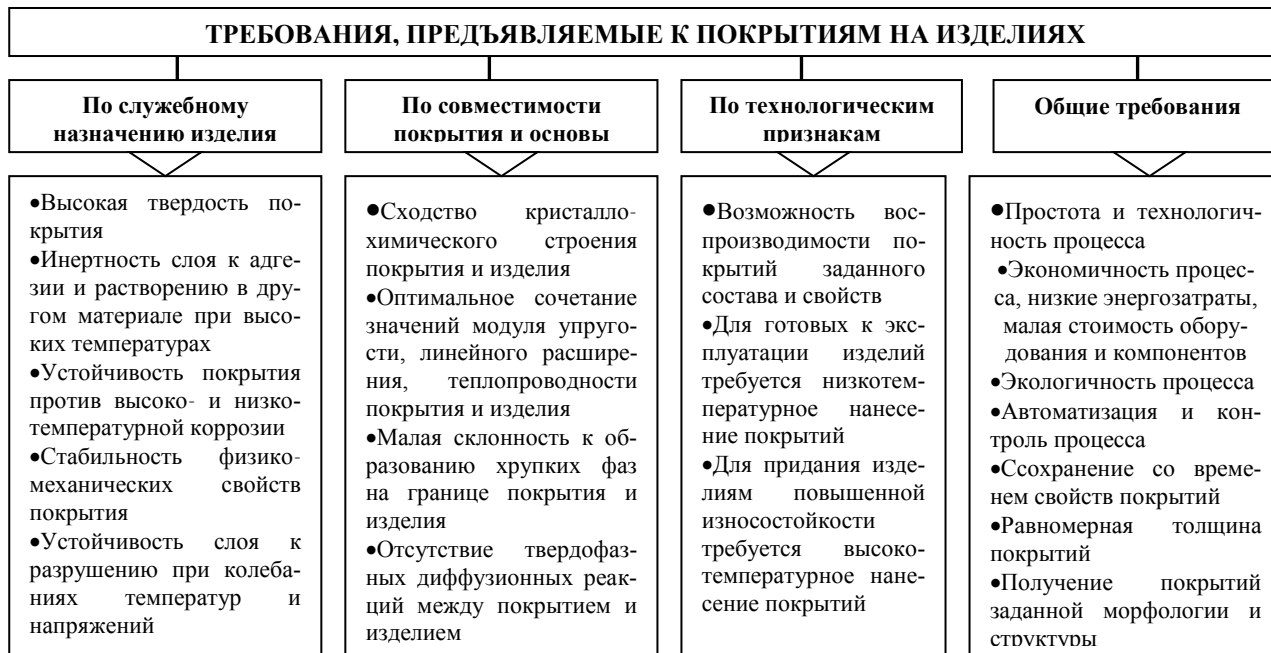


Рис. 7.2. – Требования, предъявляемые к покрытиям на изделиях

На практике широко используются покрытия, полученные при химико-термической обработке (ХТО) сталей и сплавов, а именно: при цементации, азотировании, нитроцементации, борировании, диффузионном цинковании, хромировании и др.

Химико-термическая обработка – процесс изменения химического состава, структуры и свойств поверхностного слоя материала в результате его нагрева в химически активной среде (твердой, жидкой, газообразной, вакуумной, плазменной). ХТО можно рассматривать, и как диффузионное насыщение поверхности материала одним или несколькими легирующими элементами.

Любой процесс ХТО включает три основные стадии: 1) *диссоциацию* – образование в насыщающей среде активных атомов насыщающего элемента в результате химических реакций, а также испарения; 2) *адсорбцию* – поглощение (захват) активных атомов поверхностью насыщаемого материала; 3) *диффузию* – проникновение адсорбированных атомов вглубь насыщаемого материала.

Непременным условием осуществления процесса ХТО должно являться взаимодействие насыщающего элемента с основным металлом, между которыми должны образовываться твердые растворы или химические соединения. Фазовый состав диффузионных слоев можно определить по изотермическому разрезу диаграммы в системе «основной металл – насыщающий элемент» при температуре проведения ХТО, например, по диаграмме Fe – C при цементации. Скорость формирования (толщина) диффузионного слоя зависит от природы насыщающего элемента и насыщаемого металла, температуры и продолжительности ХТО. Элементы (C, N, B), имеющие атомы значительно меньшего размера, чем насыщаемый металл (Fe), и образующие твердые растворы внедрения, диффундируют значительно быстрее, чем элементы, образующие твердые растворы замещения (Cr, Ti, V, Mn).

Диффузионный слой – поверхностный слой материала изделия, отличающийся от исходного по химическому составу. Зона материала, не подвергнутая воздействию активной среды, считается *сердцевинной, основой или матрицей*. Под *общей толщиной диффузионного слоя* понимают наименьшее расстояние от поверхности до сердцевины материала. Обычно указывают *эффективную толщину диффузионного слоя* – толщину слоя только с определенной твердостью.

Основными процессами ХТО являются: цементация, азотирование, нитроцементация (цианирование), диффузионная металлизация. Методом ХТО наносят защитные покрытия на конструкционные, коррозионно-стойкие и жаростойкие стали и сплавы, чугуны, инструментальные стали и твердые сплавы, другие материалы.

Цементация

Цементация (науглероживание) – это процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя материала углеродом при нагреве до температур $880...950^{\circ}\text{C}$ в углеродсодержащей среде. Выбор температур выше A_{s3} обусловлен значительной растворимостью углерода в аустените. Цементации подвергают низкоуглеродистые и легированные стали и сплавы, содержащих до $0,25...0,3\%$ С. Такие стали называют цементуемыми. С увеличением углерода в стали диффузионный слой охрупчивается из-за избыточного содержания цементита.

При цементации на поверхности изделия образуется слой заэвтектоидной стали, состоящий из перлита и цементита (П + Ц). По мере удаления от поверхности, содержание углерода снижается, формируется зона, состоящая только из перлита (П). Затем по мере удаления от поверхности появляются зерна феррита (Ф) и их количество увеличивается. Структура этой зоны ферритно-перлитная (Ф + П), такая же как и исходная (рис. 7.3).

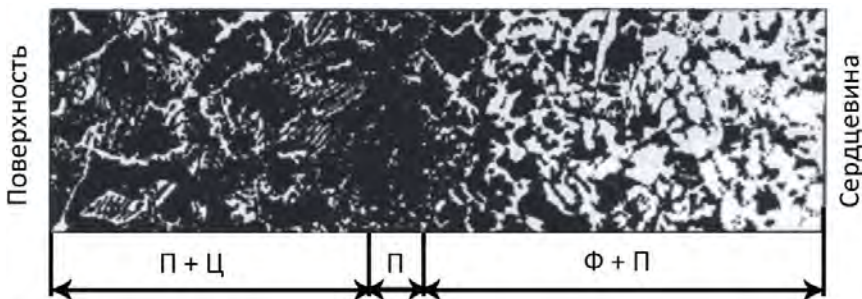


Рис. 7.3. Схема микроструктуры цементованного слоя, полученного при диффузионном насыщении малоуглеродистой стали углеродом

При науглероживании и последующей термообработке стали создается композиция из твердого поверхностного слоя и вязкой сердцевины. *Глубина цементации* – расстояние от поверхности изделия до середины зоны, где в структуре имеются одинаковые объемы феррита и перлита, обычно составляет 0,4...2 мм, а *степень цементации* – среднее содержание углерода в нем – 0,9... 1,2 %.

Цементацию вместе с термообработкой проводят с целью повышения твердости, износостойкости и предела выносливости стали. Цементации подвергают зубчатые колеса, распределительные валики, втулки, поршневые кольца, червяки, оси, ролики и др. детали.

На практике широко применяют цементацию в твердом и газовом карбюризаторе (науглероживающей среде). Участки деталей, которые не подвергаются цементации, предварительно покрывают медью (электролитическим способом) или глиняной смесью.

Цементация в твердом карбюризаторе применяется в мелкосерийном производстве. Изделия с припуском под шлифование, укладывают в контейнеры их жаропрочной стали и засыпают порошковым карбюризатором, в состав которого входит древесный уголь и 10...40 % солей BaCO_3 , Na_2CO_3 . После герметизации контейнеры помещают в печь, нагретую до 930...950° С. Общий химизм процесса состоит в образовании при неполном сгорании угля окиси углерода (CO) и выделении из него атомарного углерода по реакции:



Образующиеся атомы углерода адсорбируются поверхностью изделий и диффундируют вглубь металла.

Недостатками данного способа являются: большая длительность процесса (скорость роста слоя 0,1 мм/час), низкая производительность и сложность автоматизации процесса, ухудшение экологии.

Газовая цементация применяется в серийном и массовом производстве. В качестве карбюризатора используют легко испаряемые жидкие углеводороды (керосин, синтин), специальные эндогазы, пропан-бутановые смеси, метан, образующие при их диссоциации атомарный углерод по реакции:



Процесс ведут при 910...930° С в течение 6...12 ч в шахтных печах или безмуфельных агрегатах непрерывного действия. Для получения науглероженного слоя на стали толщиной 1 мм требуется 6...7 ч.

Преимущества газовой цементации следующие: регулирование концентрации углерода в слое путем изменения состава науглероживающей атмосферы; высокая производительность процесса, т.к. термообработку осуществляют сразу с температуры цементации; полная автоматизация и экологичность процесса.

Термическая обработка обязательно проводится после цементации, поскольку окончательно формирует свойства цементованной детали. При цементации формируется градиентная по распределению углерода структура. Все изделия подвергают закалке с низким отпуском. После закалки цементованное изделие приобретает высокую поверхностную твердость и износостойкость при сохранении вязкой сердцевины, также повышается предел контактной выносливости и выносливости при изгибе. Комплекс термической обработки зависит от материала и назначения изделия. Если сталь наследственно мелкозернистая (18ХГТ, 25ХГТ, 20ХГР, 20ХГНТР) и изделия неотчетственного назначения, то проводят однократную закалку от температуры 820...880° С (рис. 7.4, а). При этом формируется науглероженный слой со структурой высокоуглеродистого мартенсита, а также измельчаются зерна сердцевины. При газовой цементации изделия сначала подстуживают, а затем проводят закалку (рис. 7.4, б). Для особо ответственных деталей, после цементации применяют двойную закалку (рис. 7.4, в). Первую закалку (или нормализацию) проводят от температуры 880...900° С для исправления структуры сердцевины, вторую – от температуры 760...780° С для получения мелкоигльчатого мартенсита в поверхностном слое.

Завершающей операцией термической обработки всегда является низкий отпуск, проводимый при температуре 150...180° С. В результате отпуска в цементованном слое формируется структура мартенсита отпуска и частично снимаются напряжения.

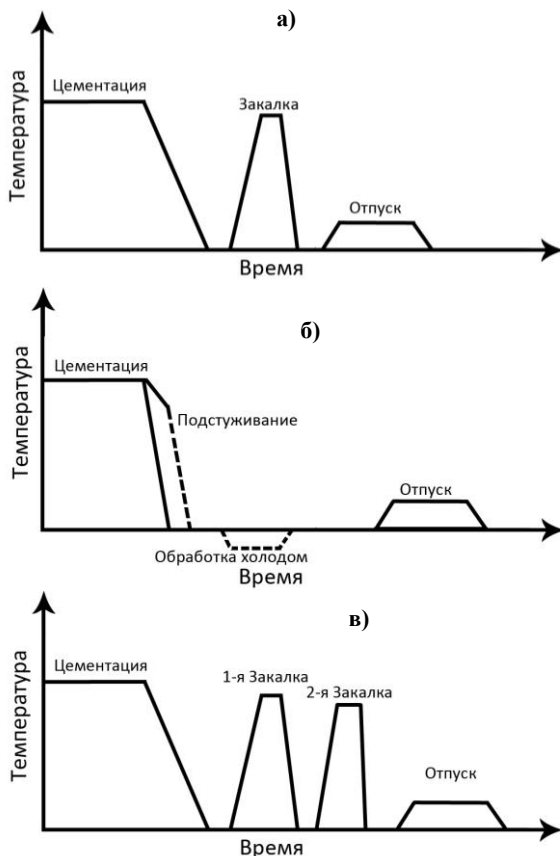
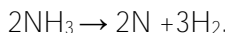


Рис. 7.4. Режимы термической обработки цементованных изделий

Азотирование

Азотирование — диффузионное насыщение поверхностного слоя материала азотом при нагреве до температур $500...700^{\circ}\text{C}$ в азотсодержащей среде. Азотирование повышает твердость, износостойкость, предел выносливости и коррозионную стойкость сталей и применяют для ответственных деталей машин: зубчатых колес, гильз цилиндров, штоков пароводяной арматуры, валов, др.

На практике широко используют газовое и ионное азотирование. При газовом азотировании нагретый аммиак диссоциирует с выделением атомарного азота:



Активные атомы азота адсорбируются поверхностью и диффундируют в сталь, образуя в ней твердые растворы и химические соединения (нитриды).

Для азотирования используют нитраллои – специальные азотируемые стали (38ХМЮА, 35ХМЮА, 30ХТ2НЗЮ, 35ХМА, 30Х2В2НФА, 38ХНМФА, 38ХВФЮА, 3Х2ВФ), содержащие Al, Mo, Cr, Ti, V, W. Нитриды этих элементов (VN, W₂N, A1N, CrN) дисперсны и обладают высокой твердостью и термической устойчивостью.

Если твердость углеродистой азотированной стали составляет около 200 HV, среднелегированной стали – до 800 HV, то нитраллоя – 1000...1200 HV. Поэтому для легированных и углеродистых сталей проводят антикоррозионное азотирование (в газовой среде при 650...700° С в течение 10 часов), а высоколегированные стали азотируют для повышения твердости, износостойкости, предела выносливости (в газовой среде при 500...560° С в течение 24...90 часов).

Время азотирования сокращается при ионном азотировании, когда между катодом (деталью) и анодом вакуумной установки возбуждается тлеющий разряд. Происходит ионизация азотосодержащего газа, ионы азота бомбардируют поверхность детали, нагревая ее до температуры насыщения. Продолжительность процесса – до 24 часов.

Азотированию подвергают готовые изделия, прошедшие окончательную механическую и термическую обработку (закалку с высоким отпускком). Азотированный слой сохраняет твердость до высоких температур (500...520° С). Это главные преимущества азотирования перед цементацией. Недостатками являются большая продолжительность процесса и малая толщина диффузионного слоя (не более 0,8 мм). После азотирования в сердцевине стали сохраняется структура сорбита, которая обеспечивает изделиям повышенную прочность и вязкость.

Цианирование и нитроцементация

Цианирование (жидкостное) или *нитроцементация* (газовая) – процесс одновременного диффузионного насыщения поверхности изделий азотом и углеродом. Полученный слой обладает высокой твердостью HRC 56...64, повышает сопротивляемость изнашиванию, усталостную прочность и коррозионную стойкость.

Жидкостное цианирование осуществляют в ваннах с расплавленными цианистыми солями (NaCN, NaCNO, $K_4Fe(CN)_6$) с добавлением солей NaCl, $CaCl_2$, $BaCl_2$. При окислении цианистых солей образуются атомарный азот и окись углерода (поставщик атомов углерода):



Высокотемпературное цианирование проводят при температуре 800...950° С в течение 0,5...3 ч.; на стали формируется слой толщиной 0,15...2 мм, который преимущественно содержит углерод. Цианированные изделия подвергают закалке из ванны и низкому отпуску.

Структура покрытия: внешняя зона карбонитридов $Fe_2(C, N)$, под ней – зона азотистого мартенсита. По сравнению с цементацией, такое цианирование проходит с большей скоростью, детали меньше деформируются, обеспечивает им высокую твердость (57...64 HRC) и износостойкость. *Низкотемпературное цианирование* осуществляют при 540...600° С; тогда поверхность стали в основном насыщается азотом. Цианированию подвергают инструменты из быстрорежущих и высокохромистых сталей. Является окончательной обработкой. Основным недостатком цианирования является токсичность цианистых солей.

Нитроцементацию осуществляют в газовых смесях из науглероживающего газа и аммиака. *Высокотемпературной нитроцементации* (при температуре 830...860° С в течение 4...10 часов) подвергают детали машин (зубчатые колеса, втулки, валы) из углеродистых и малолегированных сталей. Для этого используют автоматизированные безмуфельные агрегаты. Завершается процесс закалкой с температуры печи и низким отпуском на твердость 56...62 HRC. Структура полученного слоя: мелкокристаллический мартен-

сит с небольшим содержанием карбонитридов и 25 % остаточного аустенита. Изделия испытывают меньшие деформации, чем при цементации, повышается их износо- и коррозионная стойкость. *Низкотемпературной нитроцементации* подвергают инструмент из быстрорежущих сталей после термообработки (заковки и отпуска). Процесс проводят при температуре 530...570° С, в течение 1,5...3 часов. Формируется слой толщиной до 20 мкм с твердостью 900...1200 НV. Нитроцементация отличается низкой стоимостью и экологичностью.

Диффузионное борирование

Борирование — процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя изделий бором при температурах 900...950° С в течение 2...6 ч. Борирование проводят в твердых, жидких и газообразных средах.

В качестве источника бора может быть карбид бора (B_4C), бура ($Na_2B_4O_7$), ферробор, аморфный бор, диборан (B_2H_6) и др.

Полученный диффузионный слой, состоящий из боридов FeB и Fe_2B (рис. 7.5, *a*), имеет толщину 50...150 мкм и обладает высокой твердостью (до $H_{\mu} = 21$ ГПа), абразивной износостойкостью, коррозионной стойкостью, но очень хрупок. Процесс борирования используют для повышения срока службы бурильного, строительного, штампового инструментов и быстроизнашиваемых деталей машин.

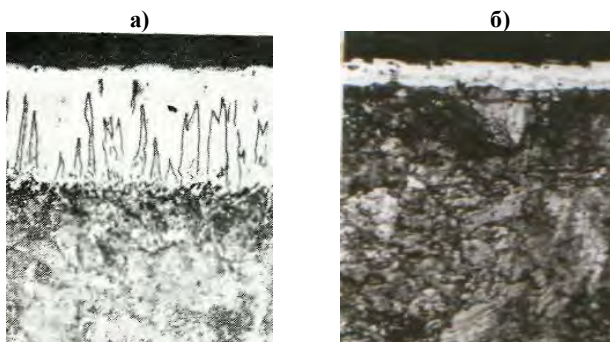


Рис. 7.5. Микроструктуры (x200) боридного слоя при борировании стали 45 (а) и карбидного слоя при хромировании стали У8 (б)

Диффузионная металлизация

Диффузионная металлизация – процесс диффузионного насыщения поверхности стальных изделий металлами (Cr, Zn, Al, Si, Sn, др). При насыщении хромом процесс называют *хромированием*, цинком – *цинкованием*, алюминием – *алитированием*, кремнием – *силицированием*, оловом – *оловянирование* т.д.

Диффузионную металлизацию проводят в твердых, жидких и газообразных средах. При *твердой металлизации* термодиффузионную обработку изделий осуществляют в порошковой смеси из насыщающего металла (ферросплава) с добавлением 2 % хлористого аммония (NH_4Cl). Образующиеся хлориды (AlCl_3 , CrCl_2 , SiCl_4) диссоциируют и являются источником активных атомов металлов. *Горячую (жидкостную) металлизацию* проводят путем погружения изделий в расплавленный металл (алюминий, цинк, олово). *Газовую диффузионную металлизацию* проводят в средах, содержащих газообразные хлориды металлов и восстановитель (водород).

Диффузия металлов протекает медленно, т.к. образуются твердые растворы замещения, и при одинаковых температурах процесса скорость роста диффузионных слоев идет в десятки раз медленнее, чем при цементации. Диффузионную твердую металлизацию изделий хромом, алюминием, кремнием осуществляют при высоких температурах ($1000 \dots 1200^\circ \text{C}$), а жидкостную металлизацию оловом, цинком, алюминием – при более низких температурах ($400 \dots 700^\circ \text{C}$) в течение длительного времени (6...10 ч.).

Назначение процессов различное. Диффузионное *цинкование, оловаживание, латунирование* повышает коррозионную стойкость труб, листового железа, металлокорда; *алитирование, силицирование* – жаростойкость и коррозионную стойкость стальных муфтелей, горелок, арматуры; *хромирование* – износо-, жаро- и коррозионную стойкость быстроизнашивающих деталей машин, работающих в агрессивных средах (насосов, мельниц, шнеков). После диффузионного хромирования формируется диффузионный слой из карбидов $(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$ и $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ (рис. 7.5, б) толщиной 25 – 30 мкм с микротвердостью $H_{\mu} = 20$ ГПа. На практике все большее применение находят многокомпонентные покрытия, поскольку сочетают преимущества каждого из насыщающих металлов.

Порядок проведения и задания работы

1. Просмотреть набор приготовленных шлифов с диффузионными цементованными и карбидными слоями на углеродистых сталях при увеличении 250...500.

3. Подробно рассмотреть (при увеличении не менее 500) шлиф цементованной стали с целью выявления зон с различным содержанием углерода, которые соответствуют микроструктуре доэвтектоидной, эвтектоидной и заэвтектоидной сталям.

4. Схематично зарисовать стали с различными диффузионными покрытиями.

5. Ознакомиться с режимами и составами диффузионного насыщения сталей, характером влияния на их структуру и свойства.

6. Сделать выводы и составить отчет по работе.

Содержание отчета

1. Название, цель и задачи работы.

2. Классификация методов ХТО по назначению, по виду и количеству насыщаемых компонентов, по агрегатному состоянию насыщающих сред.

3. Зарисовки микроструктур покрытий, полученных при диффузионном насыщении сталей углеродом и карбидообразующими металлами. Каждую структуру нужно подписать, а стрелками указать структурные составляющие.

4. Указать области применения, режимы ХТО и свойства изучаемых покрытий.

5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какие требования предъявляются к покрытиям?

2. Назовите преимущества и недостатки химико-термической обработки сталей?

3. Какие стадии включает в себя технологический процесс ХТО?

4. Какие виды и особенности цементации и азотирования?

5. Можно ли цементировать высокоуглеродистую сталь?

6. Зависит ли содержание углерода в поверхностном слое от температуры цементации?

7. В каких случаях применяют цементацию, азотирование, бори-

рование, металлизацию?

8. Какие свойства имеют карбидные диффузионные покрытия?
9. Какие материалы можно подвергать методом ХТО?
10. Можно ли упрочнять готовые изделия методом ХТО?
11. Какие процессы ХТО самые производительные?
12. При каких процессах ХТО достигается высокая коррозионная стойкость поверхности сталей?
13. Почему комплексное насыщение материалов несколькими легирующими элементами предпочтительнее, чем одним?

Лабораторная работа № 8

МИКРОСТРУКТУРА, СВОЙСТВА И МАРКИРОВКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СПЛАВОВ

Цель работы — изучение микроструктуры и свойств инструментальных сталей и твердых сплавов, режимов термообработки сталей.

В зависимости от условий работы инструментов применяют различные материалы: *стали* (углеродистые, штамповые, быстрорежущие), *твердые сплавы* (металлокерамику) и *алмазосодержащие материалы*. Инструментальные материалы предназначены для изготовления *режущего, штампового и измерительного* инструментов. Режущие и штамповые инструменты в наибольшей мере испытывают тепловое, химическое и механическое воздействие с ударными, растягивающими, сжимающими, изгибающими нагрузками. Существуют две основные причины выхода из строя металлообрабатывающих инструментов: (1) хрупкое разрушение в виде выкрашивания и скалывания режущей части и (2) пластическое разрушение в виде потери формоустойчивости, истирания и затупления режущей кромки (рис. 8.1). Характер изнашивания инструментов при работе различный. *Абразивное* изнашивание проявляется при работе быстрорежущего и алмазного инструментов, когда их рабочая поверхность царапается более твердыми включениями обрабатываемого материала. *Диффузионный* износ характерен для высокоскоростного стального, твердосплавного и алмазного инструментов, когда рабочая кромка нагревается до высокой температуры и идет диффузионное взаимодействие с обрабатываемым материалом. *Адгезионному* износу подвергаются все виды режущего и штампового инструментов за счет схватывания их контактных поверхностей с обрабатываемым материалом; часто носит усталостный характер, когда повторяются циклы «схватывание-разрушение». *Окислительный* износ присущ стальному режущему инструменту и образуемые на его поверхности оксидные пленки разрушаются под действием нагрузок; он интенсифицируется при нагреве выше 450° С. Пластическое разрушение рабочей кромки имеет место для инструментов из твердых сплавов и сталей в результате пластического течения контактных слоев и их последующем срезе. Поэтому все инструментальные материалы должны иметь очень высокие показатели твердости, износостойкости, прочности, теплостойкости, термостойкости, вязкости и других рабочих и технологических свойств (рис. 8.1).

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ОЦЕНКА МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ



Рис. 8.1. – Эксплуатационные требования и причины выхода из строя металлообрабатывающих инструментов

Теплостойкость (или *красностойкость*) – это способность материала (стали, сплава) сохранять структуру и эксплуатационные свойства при повышенных температурах. Теплостойкость обозначается величиной максимальной температуры нагрева образцов (в течение 4 часов), до которой материал сохраняет рабочую твердость. В процессе резания с большими скоростями или при горячем деформировании рабочая часть инструмента может нагреваться до 500...1000° С. В зависимости от теплостойкости все инструментальные материалы, стали и сплавы делят на *нетеплостойкие* (рабочие температуры не выше 200...250° С), *полутеплостойкие* (до 250...400° С), *теплостойкие* (до 550...640° С) и *повышенной теплостойкости* (до 800...1050° С). Теплостойкость стали достигается легированием железной матрицы вольфрамом, молибденом, ванадием, а твердых сплавов – легированием тугоплавкими карбидами тантала, титана, вольфрама и др.

Чтобы иметь высокую прочность и твердость инструментальные стали содержат не менее 0,6 % С и подвергаются закалке и отпуску на заданную твердость. Для большинства сталей проводят низкий отпуск, в результате чего твердость стали достигает HRC 60...65, а предел прочности при изгибе $\sigma_{и} = 1500...3000$ МПа. Только стали, предназначенные для штампов горячего деформирования, должны содержать 0,3...0,6 % С и иметь твердость рабочей части HRC 40...50.

Прокаливаемость – способность стали образовывать мартенситную или трооститмартенситную структуру на определенную глубину. Это важное технологическое свойство определяется критической скоростью охлаждения ($v_{кр}$), которая зависит от химического состава стали. Прокаливаемость может быть повышена за счет легирования стали хромом, марганцем, кремнием. В этом случае увеличивается интервал устойчивости переохлажденного аустенита и снижается $v_{кр}$. Стали повышенной прокаливаемости можно использовать для изготовления крупного инструмента. Тонкий и сложной формы инструмент, изготовленный из этих сталей, меньше деформируется и менее склонен к трещинообразованию, поскольку закаливается в охлаждающих средах с меньшей скоростью, чем в воде.

Маркируют инструментальные стали по-разному. *Углеродистые инструментальные стали* (У8, У10А) обозначают буквой У и цифрой, указывающей среднее содержание углерода в десятых долях %: В высококачественных сталях в конце марки ставят букву А. *Легированные инструментальные стали* (5ХНМ, ХВГ, 9ХС) маркируют

буквами, соответствующие легирующим элементам (Х – Cr, Н – Ni, Г – Mn, С – Si, М – Mo, В – W, Ф – V, Т – Ti, К – Co и др.) и за ними цифрами, указывающими среднее содержание этих элементов в %. Цифра, стоящая впереди марки, обозначает среднее содержание углерода в десятых долях %. *Быстрорежущие стали* (P18, P6M5, P12M3K8Ф2МП) маркируются буквой Р, после которой следует число, указывающее среднее содержание вольфрама в % (буква В пропускается), затем после букв М, К, Ф ставится число, указывающее содержание молибдена, кобальта, ванадия в %. Буквы МП в конце марки указывают, что сталь изготовлена методом порошковой металлургии.

Стали для режущих инструментов

Режущая кромка стального инструмента может нагреваться до 640° С, поэтому важнейшим свойством сталей является теплостойкость. Инструментальные стали должны обладать высокой твердостью, износостойкостью, прочностью и особенно большой вязкостью, если режущий инструмент работает с ударными нагрузками.

Углеродистые инструментальные стали (ГОСТ 1435–74) марки У7...У13А содержат 0,65...1,35 % углерода и относятся к классу не-теплостойких сталей. Эти стали имеют высокую твердость, хорошо шлифуются, дешевы и недефицитны.

Из сталей марок У7, У8 изготавливают деревообрабатывающие инструменты (резцы, долота, стамески, топоры, фрезы, пилы), инструменты ударного действия небольших размеров (зубила, насечки, бойки, кернеры) и слесарные инструменты (кусачки, плоскогубцы, бородки). Стали марок У9...У12 с более высокой твердостью и износостойкостью используются для изготовления сверл, метчиков, фрез, ножей, ножниц. Сталь У13 повышенной твердости предназначена для изготовления напильников, граверного и хирургического инструментов, бритвенных ножей и лезвий.

Углеродистые инструментальные стали подвергаются термообработке: закалке и отпуску. Закалку для доэвтектоидных сталей проводят полную, а для заэвтектоидных – неполную. Формируется структура закалки: мартенсит или мартенсит + цементит. Температура отпуска выбирается в зависимости от условий работы режущего инструмента. Для сверл, метчиков, плашек, напильников отпуск проводят при температуре 150...200° С с целью получения твердости HRC 62...64. Для зубил, насечек, долот, требующих повышенной вязкости, отпуск проводят при температуре 280...300° С, чтобы достичь твердости HRC 56...58.

Недостатками углеродистых инструментальных сталей является их невысокая прокаливаемость (5...10 мм), низкая теплостойкость (до 200° С), а значит и невысокие скорости резания инструментов.

Легированные нетеплостойкие инструментальные стали содержат 0,9...1,4 % углерода и легирующие элементы: хром, вольфрам, ванадий, марганец, кремний (до 5 %).

Высокая твердость и износостойкость в основном определяются высоким содержанием углерода. Легирование используется для повышения закаливаемости и прокаливаемости, сохранения мелкого зерна, повышения прочности и вязкости.

Термическая обработка сталей включает закалку и отпуск. Проводят закалку от температуры 800...850° С в масло или изотермическую закалку для уменьшения коробления и образования закалочных трещин. Для получения твердости HRC 61...66 отпуск осуществляют при 150...200° С. Если требуется повышенная вязкость, температуру отпуска поднимают до 300° С; это снижает твердость до HRC 55...60.

Из сталей 7ХФ...11ХФ изготавливают деревообрабатывающие инструменты. Для большей надежности (вязкости, трещиностойкости) стали подвергают изотермической закалке.

Стали 9ХС, ХВГ, имея повышенную прокаливаемость (до 40–100 мм), предназначены для изготовления массивных инструментов и инструментов сложной формы. Они закаляются в масле.

Сталь 9ХС имеет высокие режущие свойства; из нее изготавливают фрезы, сверла, метчики сечением до 35 мм. Недостатком стали, содержащей кремний, является чувствительность к обезуглероживанию при термообработке, плохая обрабатываемость резанием.

Сталь ХВГ из-за присутствия марганца имеет большое количество остаточного аустенита, что уменьшает деформацию инструмента при закалке. Поэтому эту сталь применяют для изготовления длинного стержневого инструмента: сверл, разверток, протяжек.

Сталь 6ХС используют для изготовления пневматических зубил и ряда инструментов, работающих при ударных нагрузках и вибрации.

«Алмазная» сталь ХВ5, содержащая 5 % W, отличается особо высокой твердостью (HRC 67...69) и износостойкостью, вследствие образования избыточных мелкодисперсных карбидов вольфрама. Сталь ХВ5 используется для изготовления инструмента, сохраняющего длительное время острую режущую кромку и высокую размерную точность: для разверток, фасонных резцов, граверного инструмента, а также для чистовой обработки

твердых материалов (белого чугуна, стекла, камня).

Быстрорежущие стали (ГОСТ 19265–73) относятся к группе теплостойких сталей и сохраняют твердость до 600-640° С. Инструмент из этих сталей может работать в 3-5 раз более производительнее, чем инструмент из нетеплостойких сталей. В состав всех быстрорежущих сталей непременно входят углерод (0,8... 1,25 %), хром (около 4 %) и ванадий (1...2 %), содержание которых в марке не указывается.

По режущим свойствам быстрорежущие стали делят на две группы: нормальной и повышенной производительности. *Группу нормальной производительности* образуют вольфрамовые (P9, P12, P18) и вольфрамо-молибденовые (P6M5, P6M3) стали. К *группе повышенной производительности* относятся стали, содержащие кобальт или повышенное количество ванадия (P18Ф2, P14Ф4, P6M5K5, P9M4K8, P9K5, P9K10, P10K5Ф5, P18K5Ф2). Они превосходят стали первой группы по теплостойкости (640° С), износостойкости и твердости (HRC 67...70), но уступают по прочности и пластичности. Их этих сталей изготавливают инструмент для резания труднообрабатываемых сплавов (жаропрочных, коррозионно-стойких, титановых, др.)

Микроструктура быстрорежущей стали в литом состоянии имеет эвтектическую структурную составляющую. Для улучшения свойств инструмента из быстрорежущей стали необходимо по возможности устранить структурную неоднородность стали – карбидную ликвацию. Для этого слитки из быстрорежущей стали подвергают пластической деформации – интенсивной ковке. При этом происходит дробление карбидов эвтектики и тогда карбиды более однородно распределяются по сечению заготовки. Затем проводят отжиг при температуре 860...900 °С. Структура отожженной быстрорежущей стали: мелкозернистый сорбит и карбиды (мелкие эвтектоидные и более крупные первичные эвтектические). Сталь с такой структурой хорошо обрабатывается резанием. Количество карбидов обычно составляет около 25 %. Большинство легирующих элементов находится в карбидной фазе.

Для формирования оптимальных свойств в инструменте проводят закалку и отпуск стали таким образом, чтобы максимально растворить в мартенситной матрице легирующие элементы, находящиеся в карбидах. Особенность закалки быстрорежущих сталей – это высокая температура нагрева; она необходима для обеспечения теплостойкости и получения высоколегированного мартенсита. Например, температура нагрева под закалку быстрорежущей стали P18 – 1270...1280° С (рис. 8.2). Нагрев

обычно осуществляют в хорошо раскисленной печи-ванне, наполненной расплавленной солью $BaCl_2$, чем достигают равномерность прогрева заготовки, уменьшают окисление и обезуглероживание поверхности. Для снижения термических и фазовых напряжений нагрев осуществляют ступенчато: замедляют нагрев при температурах $600...650^\circ C$ и $850...900^\circ C$. Охлаждение от закалочной температуры производится в масле или в селитровой ванне. Структура стали Р18 после закалки состоит из легированного тонкодисперсного (бесструктурного) мартенсита, остаточного аустенита (30 – 40 %) и первичных карбидов вольфрама. Полученная твердость составляет $60...62 HRC$. Наличие остаточного аустенита в структуре стали ухудшает режущие свойства инструмента.

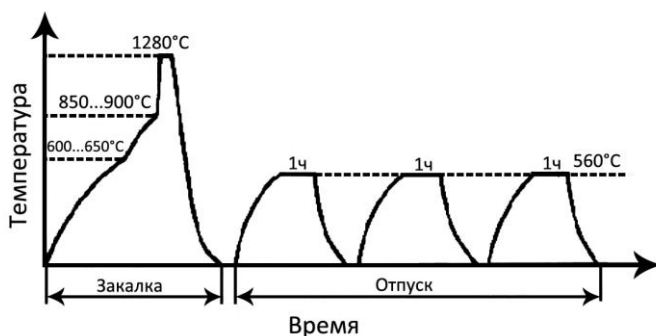


Рис. 8.2. Схема термической обработки быстрорежущей стали

Для снижения остаточного аустенита в стали Р18 проводят трехкратный отпуск при температуре $560^\circ C$ с охлаждением на воздухе. В результате отпуска наблюдается дополнительное увеличение твердости (вторичная твердость). Это объясняется тем, что при изотермической выдержке при $560^\circ C$ из легированного остаточного аустенита выделяются мелкодисперсные карбиды, а при охлаждении от температуры отпуска аустенит превращается в мартенсит отпуска. После однократного отпуска количество остаточного аустенита снижается до 10 %. Чтобы уменьшить его количество до минимума, отпуск повторяют три раза. Твердость стали Р18 после отпуска составляет $HRC 64...65$. Структура термообработанной стали – мартенсит отпуска + карбиды (рис. 8.3)

Для максимального снижения остаточного аустенита в структуре стали рекомендуют проводить обработку холодом: закаленную быстрорежущую сталь охлаждают до температур $-80...-100^\circ C$, после чего проводят еще отпуск для снятия напряжений при $560^\circ C$.

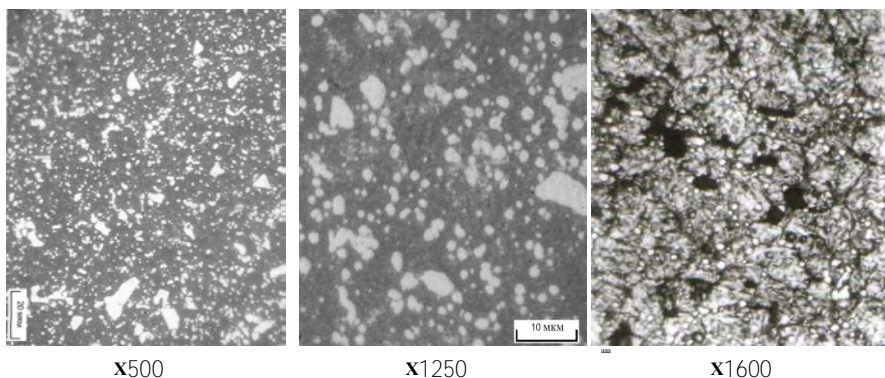


Рис. 8.3 - Микроструктуры термообработанной быстрорежущей стали P18
 Режим: ТО: закалка от 1270° С + отпуск 560° С, 1 ч., 3 раза

Иногда для повышения износостойкости быстрорежущих сталей применяют низкотемпературное азотирование и цианирование.

Основными видами режущих инструментов из быстрорежущих сталей являются резцы, сверла, долбяки, протяжки, метчики, ножи для резки бумаги и др. Из-за высокой стоимости быстрорежущей стали из нее часто изготавливают только рабочую часть режущих инструментов.

Стали для измерительных инструментов

Основными требованиями, предъявляемыми к этим сталям, являются высокая твердость, износостойкость и постоянство размеров в течение длительного времени. Последнее требование обеспечивается минимальным температурным коэффициентом линейного расширения и сведением к минимуму структурных превращений со временем. Термообработка проводится таким образом, чтобы затруднить процесс старения, который проходит в закаленной стали и вызывает объемные изменения. Причинами старения являются частичный распад мартенсита, превращения остаточного аустенита и релаксация напряжений.

Применяют следующие стали:

- высокоуглеродистые и низколегированные стали (У12, X, ХГ, 9ХС, ХВГ) для изготовления большинства мерительного инструмента: пробок, калибров, линеек. Подвергают закалке с более низкой температуры и стабилизирующему отпуску при 120...170° С в течение 24...48 ч. Инструмент высокой точности после закалки еще обрабатывают холодом. Получают твердость HRC 62...65;

- малоуглеродистые цементуемые стали 15, 20, 15X, 20X или стали 50, 55, закаливаемые ТВЧ, для изготовления плоских инструментов: скоб, линеек, шаблонов;
- азотируемая сталь 38ХМЮА для мерительных инструментов большого размера и сложной формы

Штамповые стали

Различают стали для штампов холодного и горячего деформирования в зависимости от температуры обработки металлов давлением.

Стали для штампов холодного деформирования должны обладать высокой твердостью, износостойкостью, прочностью, вязкостью.

Применяют следующие штамповые стали:

- углеродистые инструментальные стали У10, У11, У12 используют для штампов небольших размеров (до 25 мм). После закалки и низкого отпуска на твердость HRC 57...59 ударные инструменты (молотки, пуансоны, матрицы) становятся износостойкими и вязкими.
- низколегированные полутеплостойкие стали X, X9, X6ВФ, ХВСГ применяют для изготовления более крупных инструментов и сложной формы (высадочных штампов), а стали 4ХС, 6ХС, 4ХВ2С, 5ХВ2С используют для инструментов с повышенными ударными нагрузками: зубил, наконечников отбойных молотков. Такой ударный инструмент подвергают закалке и отпуску на твердость HRC 53...59.
- Высокохромистые стали X12, X12М, X12Ф1 обладают самой глубокой прокаливаемостью (150-200 мм) и лучшей износостойкостью. Из этих сталей изготавливают большинство штампов и накатных роликов. Стали термообработывают на первичную (закалка + низкий отпуск) и вторичную твердость (закалка + высокий отпуск). После обработки на вторичную твердость (HRC 60...62), теплостойкость сталей поднимается до 500 °С.

Для повышения износостойкости инструмента после термообработки проводят цианирование или хромирование рабочих поверхностей.

Для уменьшения брака при закалке углеродистых сталей проводят ступенчатое охлаждение (сначала в воде, потом в масле), а легированные стали подвергают изотермической закалке.

Стали для штампов горячего деформирования должны быть термостойкие и окалиностойкие, иметь хорошую теплопроводность для отвода теплоты от рабочих поверхностей штампов и большую прокаливаемость для обеспечения прочности по всему сечению инструмента.

Термостойкость (разгаростойкость) – устойчивость к образованию сетки разгарных трещин, возникающих на рабочей поверхности при циклическом нагреве и охлаждении штампов.

Стали делятся по назначению:

- хромоникелевые среднеуглеродистые стали 5ХНМ, 5ХНВ, 5ХНСВ применяют для изготовления молотовых штампов. Молотовые штампы имеют большие размеры и работают с ударными нагрузками при относительно невысоких температурах (400...500° С). После термической обработки (закалка 760...820° С + отпуск 460...540° С), стали имеют структуру: сорбит или троостит + сорбит, а твердость HRC 40...45.
- стали повышенной теплостойкости 3Х2В8Ф, 4Х5В2ФС используют для тяжело нагруженных штампов горячей высадки, протяжки и прессования. Сталь 3Х2В8Ф сохраняет твердость HRC > 45 до температур 650 – 670° С, но наличие карбидов вольфрама снижает вязкость. Сталь 4Х5В2ФС имеет более высокую вязкость и окалиностойкость. Штампы из этой стали применяют для высокоскоростной штамповки.

Твердые сплавы

Твердые сплавы – керамические материалы, состоящие из высокотвердых тугоплавких карбидов и связующей фазы (кобальта), и которые изготовлены методами порошковой металлургии.

Твердые сплавы имеют очень высокую твердость HRC 87...92 при достаточной прочности. Твердость и прочность зависят от количества связующей фазы и величины зерен карбидов. Чем мельче зерна карбидов, тем выше прочность. Увеличение количества связующего снижает твердость, но повышает прочность и вязкость. Твердые сплавы отличаются большой износостойкостью и теплостойкостью (800 – 1000° С).

Твердыми сплавами делятся на три основные группы: *БК* (WC + Co), *ТК* (WC + TiC + Co) и *ТТК* (WC + TiC + TaC + Co). *Сплавы группы БК* марок ВК3, ВК6, ВК8, ВК20 используют для режущего инструмента при обработке чугунов, фарфора, керамики, а также для бурильного и штампового инструментов. Маркируются буквами ВК и цифрами, где число указывает содержание Со в %, остальное – карбиды WC. *Сплавы группы ТК* марок Т15К6, Т30К6, Т14К8 применяют для средне- и высокоскоростного резания сталей. Эти сплавы, по сравнению с первой группой, обладают большей твердостью, износостойкостью и жаростойкостью, но меньшей пластичностью. Маркируют буквами ТК и цифрами, где первое число

указывает содержание карбидов TiC в %, а второе – содержание Co в %. Сплавы группы ТТК марок ТТ17К2, ТТ10К8, ТТ20К9 используют для наиболее тяжелых условий резания: при черновой обработке стальных отливок. От предыдущей группы отличаются большей прочностью и лучшей сопротивляемостью вибрациям. Маркируют буквами ТТК и цифрами, где первые числа указывают суммарное содержание карбидов TiC + TaC в %, а последнее – содержание Co в %. Микроструктуры типичных твердых сплавов представлены на рис. 8.4.

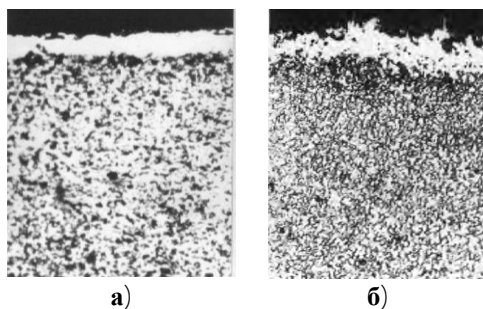


Рис. 8.4. Микроструктуры (x500) твердых сплавов Т15К6 (а) и ВК6 (б) с карбидными покрытиями

Сплавы с малым количеством кобальта обладают повышенной твердостью и износостойкостью, но минимальной прочностью, Поэтому их используют для чистового точения (BK3, Т30К4). Сплавы с повышенным содержанием кобальта применяют для чернового точения (BK8, Т14К8). Сплав BK20 используют для армирования штампов.

Твердые сплавы производят в виде пластин и круглых стержней. Неперетачиваемые пластины – одноразового пользования, их жестко закрепляют на стальной державке винтами (резцы, фрезы, развертки, зенкера, сверла). Перетачиваемые пластины напаивают на стальную державку; они многократно перетачиваются с инструментом (резцы, фрезы, сверла). Из круглых стержней делают цельный твердосплавный инструмент (сверла, червячные фрезы, волоки).

Для повышения износостойкости на поверхность твердых сплавов наносят многокомпонентные покрытия ионно-плазменным, вакуумным методами, химико-термической обработкой и др.

Порядок проведения и задания работы

1. Просмотреть набор приготовленных шлифов углеродистых, быстрорежущих и штамповых сталей, твердых сплавов при увеличении 250...500.

2. Подробно рассмотреть шлиф закаленной быстрорежущей стали Р18 с целью определения размера зерна при увеличении не менее 500.
3. Схематично зарисовать изученные микроструктуры сталей и твердых сплавов.
4. Ознакомиться с режимами термообработки рассмотренных сталей, характером влияния на их структуру и свойства.
5. Сделать выводы и составить отчет по работе.

Содержание отчета

1. Название, цель и задачи работы.
2. Классификация инструментальных материалов, их назначение, структурное различие, свойства и маркировка.
3. Зарисовки микроструктур твердых сплавов, быстрорежущих и штамповых сталей. Каждую структуру нужно подписать, а стрелками указать структурные составляющие.
4. Указать области применения, режимы термообработки, свойства изучаемых сталей и сплавов.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какие материалы используют для изготовления инструментов?
2. Какие основные причины выхода из строя инструментов?
3. Что такое теплоустойкость и как разделяют все инструментальные материалы по теплоустойкости?
4. Что такое прокаливаемость, почему так важно иметь большую прокаливаемость сталей?
5. Как маркируются инструментальные стали и сплавы?
6. Какие группы сталей используют для режущих инструментов, их назначение?
7. Почему быстрорежущие стали надо нагревать до очень высоких температур при закалке и для чего проводят тройной отпуск?
8. Что делают, чтобы достичь постоянства размеров измерительных инструментов со временем?
9. Почему стали для штампов горячего деформирования имеют меньшее содержание углерода, чем другие инструментальные стали?
10. Что такое разгаростойкость, как ее повысить в сталях?
11. На какие три основные группы делятся твердые сплавы?
12. Какой твердый сплав становится более вязким, если в нем больше или меньше содержится кобальта?

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1 Макроструктурный и микроструктурный анализы металлов и сплавов	3
Лабораторная работа № 2 Определение твердости металлов и сплавов	13
Лабораторная работа № 3 Термический метод построения диаграмм состояния двойной системы	26
Лабораторная работа № 4 Диаграмма состояния железо–углерод	36
Лабораторная работа № 5 Микроструктура, свойства и маркировка углеродистых сталей	45
Лабораторная работа № 6 Микроструктура, свойства и маркировка чугунов	53
Лабораторная работа № 7 Микроструктура и свойства покрытий, сформированных химико-термической обработкой	62
Лабораторная работа № 8 Микроструктура, свойства и маркировка инструментальных сплавов	77

Учебное издание

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум
для студентов специальностей
1-36 20 04 «Вакуумная и компрессорная техника»
и 1-08 01 01 «Профессиональное обучение»

С о с т а в и т е л и :

ШМАТОВ Александр Анатольевич
ИВАНОВ Игорь Аркадьевич

Технический редактор *О. В. Песенько*

Подписано в печать 04.10.2013. Формат 60×84^{1/16}. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 5,23. Уч.-изд. л. 4,09. Тираж 110. Заказ 520.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.