

Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Т. П. Колина

**МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА В
МАШИНОСТРОЕНИИ**

Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ
для студентов, обучающихся в магистратуре по направлению подготовки
15.04.01 Машиностроение

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
2023

УДК 642.5

Рецензент

доктор технических наук, доцент, доцент кафедры инжиниринга технологического оборудования ФГБОУ ВО «КГТУ» О. В. Агеев

Колина, Т. П.

Металлографические методы анализа в машиностроении: учеб.-метод. пособие по выполнению лабораторных работ для студентов, обучающихся в магистратуре по напр. подгот. 15.04.01 Машиностроение / Т. П. Колина. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2023. – 166 с.

В учебно-методическом пособии по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Металлографические методы анализа в машиностроении» представлены учебно-методические материалы и отражены рекомендации для выполнения лабораторных работ студентами очной, заочной и очно-заочной форм обучения.

Рис. 105, табл. 34, список лит. – 19 наименований

Учебное пособие рассмотрено и рекомендовано к опубликованию кафедрой инжиниринга технологического оборудования 30 марта 2023 г., протокол № 6

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины рекомендовано к изданию в качестве локального электронного методического материала методической комиссией института агроинженерии и пищевых систем ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» 30 мая 2023 г., протокол № 5

УДК 642.5

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет», 2023 г.
© Колина Т. П., 2023 г

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Лабораторная работа № 1 Макроскопический метод исследования металлов и сплавов. Фрактография.....	5
Лабораторная работа № 2 Микроскопический метод исследования металлов и сплавов.....	16
Лабораторная работа № 3 Определение твердости металлов и сплавов.....	26
Лабораторная работа № 4 Пластическая деформация и рекристаллизация металлов.....	36
Лабораторная работа № 5 Определение величины зерна в стали.....	46
Лабораторная работа № 6 Микроанализ углеродистых сталей и чугунов.....	53
Лабораторная работа № 7 Влияние термической обработки на микроструктуру и свойства углеродистой стали.....	67
Лабораторная работа № 8 Изучение основ химико-термической обработки сталей, технологические особенности и микроструктура.....	77
Лабораторная работа № 9 Микроанализ легированных сталей.....	86
Лабораторная работа № 10 Микроанализ медных и алюминиевых сплавов...	115
Лабораторная работа № 11 Микроанализ титановых, антифрикционных сплавов и припоев.....	136
Лабораторная работа № 12 Изучение структуры и свойств полимерных материалов.....	152
Список рекомендуемых источников.....	163
Техническая документация.....	165

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее учебно-методическое пособие предназначено для студентов магистратуры по направлениям подготовки 15.04.01 Машиностроение по дисциплине «Металлографические методы исследования в машиностроении».

Лабораторные работы являются важным звеном профессиональной подготовки магистров машиностроительных направлений подготовки.

Лабораторные работы способствуют овладению практическими умениями по организации научных исследований и прививают навыки структурного анализа машиностроительных материалов.

В процессе подготовки и выполнения лабораторных работ студент закрепляет знаний по общим принципам микро- и маркроскопического исследования металлов и сплавов методами микроскопического исследования металлов и сплавов методами прочностных и физико-механическим характеристикам промышленных материалов.

Целью выполнения лабораторных работ является формирование умений и навыков в области материаловедения, которые направлены на выбор материала для изготовления детали и окончательного вида упрочняющей термической обработки.

В результате выполнения лабораторных работ студент должен:

уметь:

- использовать на практике современные представления наук о материалах;
- работать на световом и цифровом микроскопах;
- изготавливать микрошлифы и выявлять на шлифах типичные структурные составляющие; – проводить металлографический анализ промышленных сталей и чугунов, цветных металлов и сплавов;
- изготавливать макрошлифы и проводить макроструктурный анализ;
- определять величину зерна и фазовый состав сплавов;

владеть:

- методами отбора образцов для металлографического исследования и анализа свойств материалов;
- практическими навыками металлографического исследования;
- методами выявления микроструктуры металлов;
- методами определения неметаллических включений.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

МАКРОСКОПИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ. ФРАКТОГРАФИЯ

Цель работы: получить практические умения и навыки приготовления макрошлифов и определения макроструктуры и дефектов строения металлов и сплавов

Оборудование, приборы, материалы

1. Набор образцов сплавов, изготовленных различными способами: литьем, ковкой, штамповкой, сваркой, термической обработкой.
2. Шлифовальная бумага.
3. Лупы с 5-, 10- и 20-кратным увеличением.
4. Вата, фильтровальная бумага, спирт, реактивы для травления, глянцевая бромосеребряная фотографическая бумага.
5. Электрическая плитка, фарфоровые или стеклянные ванночки, щипцы, резиновый валик.

Методические указания по выполнению работы

Научиться готовить макрошлифы; ознакомиться с коллекцией образцов и деталей, полученных различными методами формообразования (литье, обработка давлением, сварка), указав вид макроструктуры и дефекты; определить вид излома деталей и дать заключение о причинах разрушения; определить наличие ликвации вредных примесей (серы, фосфора) на предложенных образцах.

Содержание отчета

Отчет должен содержать в себе ряд теоретических сведений; рисунки исследуемых макроструктур и дефектов; рисунки изломов деталей с описанием их характеристик, причин разрушения.

Краткие теоретические сведения

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

Не выявляя подробностей строения, макроанализ позволяет определить участки металла, требующие дальнейшего микроскопического исследования. Макроанализом можно определить:

1. Нарушения сплошности металла: центральную пористость, свищи, подкорковые пузыри, трещины, непровары и газовые пузыри при сварке.
2. Дендритное строение, размеры и ориентацию зерен в литом состоянии.
3. Химическую неоднородность литого металла – *ликвацию* (исследуется макрошлиф).
4. Волокнистое строение деформированного металла.

5. Вид излома: вязкий, хрупкий, нафталинистый, камневидный и т. д.
6. Глубину слоя после химико-термической обработки (исследуется изломом);
7. Фрактография – изучение изломов.

Макроанализ проводят на продольных и поперечных макрошлифах (темплетах) и изломах. Для успешного выполнения макроанализа необходим выбор наиболее характерного для изучаемого изделия сечения или излома. Вырезанные темплеты подвергают механической обработке, химическому травлению и исследованию.

Приготовление макрошлифа обычно включает следующие основные операции.

1. Вырезку образцов и подготовку поверхности (выравнивание).
2. Шлифование.
3. Полирование.
4. Травление.

Методы макротравления подразделяют на три группы: глубокого травления; поверхностного травления; отпечатков. Структура, выявляемая глубоким травлением, слабо зависит от подготовки поверхности образца; поверхностное травление или метод отпечатков требует более тщательной подготовки поверхности. Способы макроанализа различны в зависимости от состава сплава и задач, стоящих перед исследователем. Для многих марок стали, с целью выявления дефектов, нарушающих сплошность, применяют горячий (60–80 °С) 50 % водный раствор соляной кислоты. Темплеты травят в течение 5–45 мин. до четкого выявления макроструктуры – это глубокое травление.

Химическую неоднородность стали, например, ликвацию фосфора, серы, свинца определяют методом поверхностного травления и отпечатков.

При необходимости полного макроскопического исследования, а также определения нарушений сплошности металла и дефектов строения целесообразно придерживаться следующей последовательности; сначала травить образец реактивом поверхностного травления, затем снова шлифовать и определять распределение серы по отпечатку на фотобумаге, после чего производить глубокое травление для определения нарушений сплошности.

Макроструктура сварных соединений

На поперечных макрошлифах видна структура закристаллизовавшегося металла (рисунок 1а – л), а также размер области, в которой произошло расплавление и совместная кристаллизация металла свариваемых листов. Можно определить наличие непровара (рисунок 1а – в) и трещин.

Внутренние дефекты сварных соединений, которые могут привести к разрушению детали, выявляются неразрушающими методами контроля.

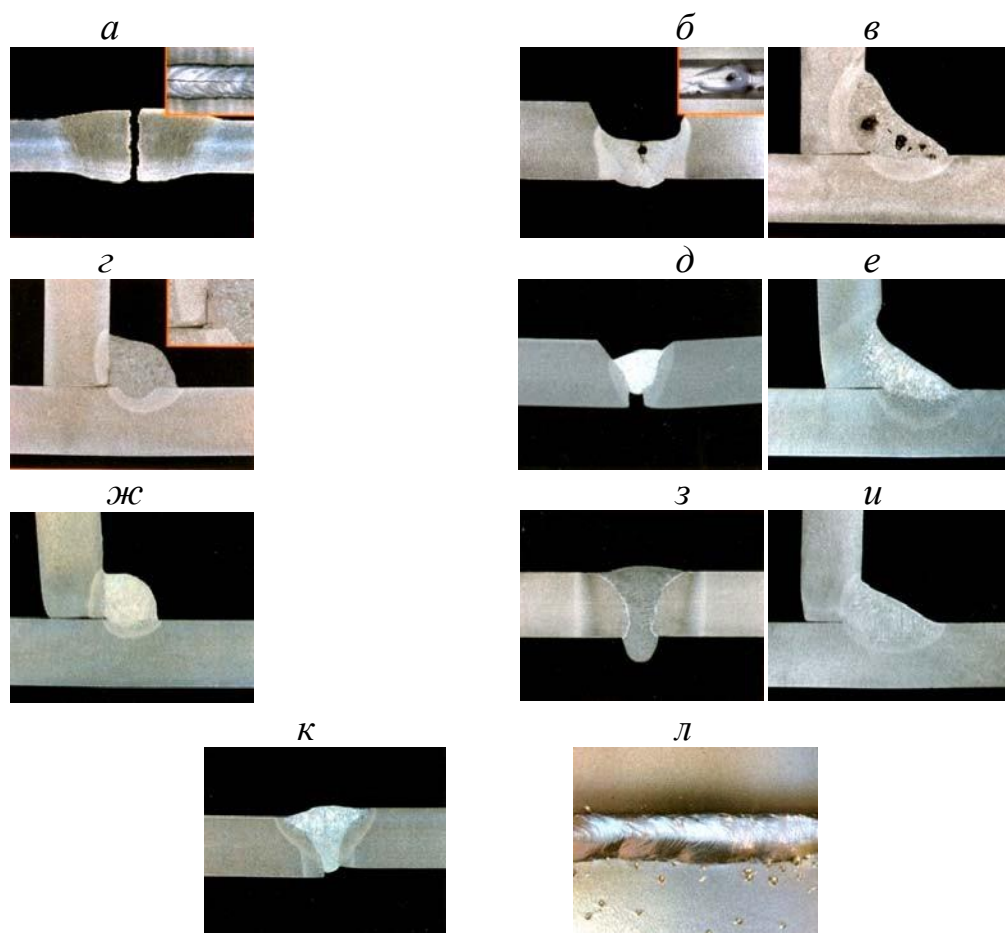


Рисунок 1 – Дефекты сварных соединений:

а – трещины; *б* – кратерные трещины и свищи; *в* – поры; *г* – несплавление; *д* – непровар; *е* – подрез; *ж* – превышение выпуклости шва; *з* – превышение проплава; *и* – несимметричный шов; *к* – смещение кромок; *л* – брызги

Исследование макростроения литого металла

Кристаллы с правильной огранкой при кристаллизации сплавов наблюдаются редко, наиболее типичной формой образования твердой фазы являются *дендриты*. Дендрит представляет собой древовидный разветвленный кристалл, каждый дендрит вырастает из одного центра кристаллизации. В процессе кристаллизации дендриты растут беспрепятственно только в начальный момент, затем они сталкиваются и мешают росту друг друга. После затвердевания расплава сформировавшийся дендрит принято называть *макрозерно*. Размеры макрозерна колеблются в больших пределах: от десятых долей до нескольких десятков миллиметров. По геометрической форме принято различать равноосные и столбчатые дендриты. Следовательно, макроструктура металла может быть *равноосной*, *столбчатой* или *смешанной*. Дендритное строение металла оказывает большое влияние на комплекс свойств слитка, фасонной отливки. Даже после горячей механической обработки, например, в поковках, остаются следы дендритной кристаллизации, и сохраняется ее влияние на комплекс

свойств материала. Поэтому одной из основных задач макроанализа является исследование дендритной структуры сплавов.

В условиях металлургического производства закономерности кристаллизации металлов можно наблюдать не только косвенно в виде фигур травления, но и в виде отдельно свободно развившихся кристаллов. На рисунке 2 показаны дендриты, извлеченные из усадочной раковины слитка весом 3,6 т стали 55С2.

В крупных усадочных порах фасонных отливок также можно наблюдать ветви дендритов и свободно сформировавшиеся отдельные дендриты (рисунок 3). Дендриты образовались в фасонной отливке из титанового сплава BT23Л.

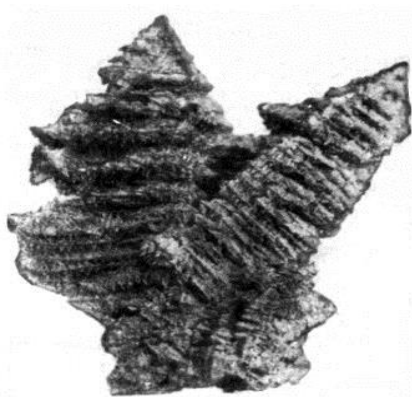


Рисунок 2 – Дендрит, извлеченный из усадочной раковины стального слитка.

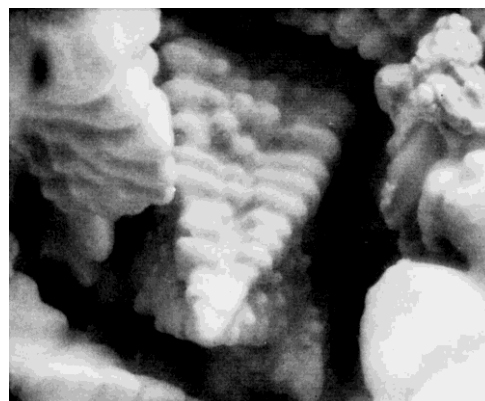


Рисунок 3 – Дендриты в усадочной поре литейного титанового сплава

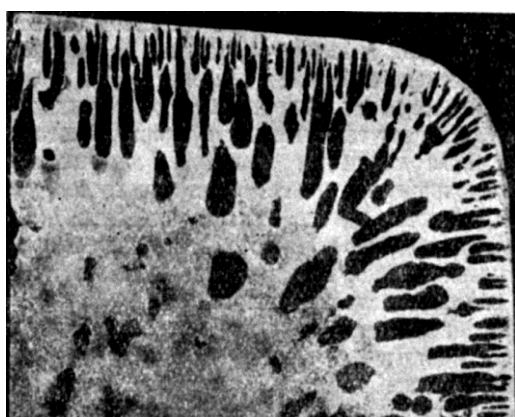


Рисунок 4 – Ситовидная пористость в латунном слитке



Рисунок 5 – Верхняя часть стального слитка. Примеси серы и фосфора в междудендритных пространствах дендритов; $\times 5$

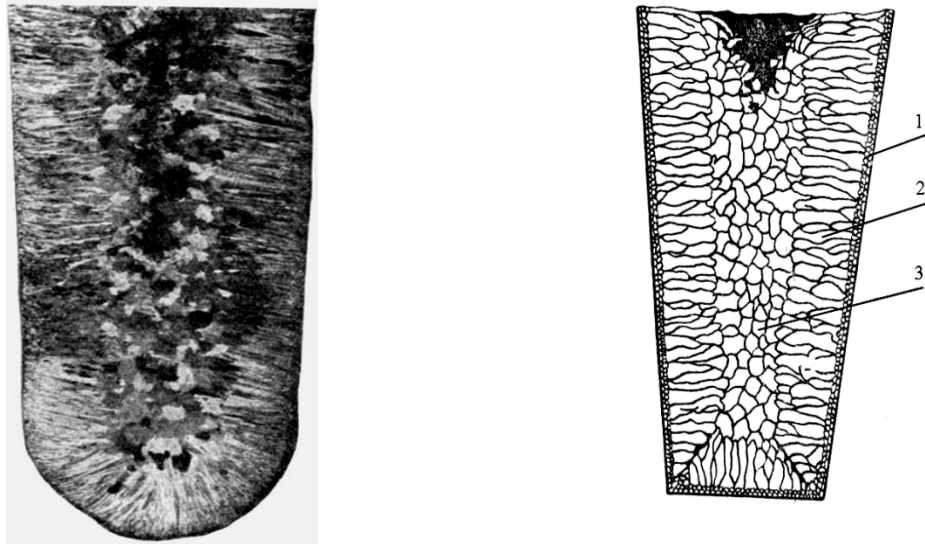


Рисунок 6 – Макроструктура стального слитка и схема его макростроения: мелкозернистая корка (1), столбчатые кристаллы (2) и равноосная структура (3)



Рисунок 7 – Макроструктура литых лопаток ГТД

Для исследования макроструктуры и дефектов слитков, как правило, используют их продольные или поперечные разрезы. Многие дефекты – несплошности (поры, раковины, рыхлоты) выявляются на макрошлифах без травления. В качестве примера на рисунке 4 приведен участок продольного разреза латунного слитка, сильно пораженного ситовидной пористостью.

Ликвация подразделяется на зональную и дендритную. Зональная ликвация характеризует неоднородность химического состава по объему слитка, дендритная – по объему дендритов. Ликвация видна в виде скопления темных неметаллических включений – сульфидов (рисунок 5).

Типичное макростроение слитка и схема этого строения приведена на рисунке 6. На поверхности слитка формируется мелкозернистая корка (1). От нее перпендикулярно стенкам формы растут столбчатые кристаллы (2), которые показывают направление теплоотвода от центра слитка к стенкам формы. По-

сле снятия перегрева и уменьшения температурного градиента в центральном участке слитка образуется равноосная структура (3)

При изучении технологии фасонного литья в качестве объекта макроанализа используют небольшие отливки или отливки с литниковой системой. Макроструктуру выявляют путем протравливания поверхности детали, например, лопатки ГТД. При этом выявляются размер и ориентировка макрозерен (рисунок 7).

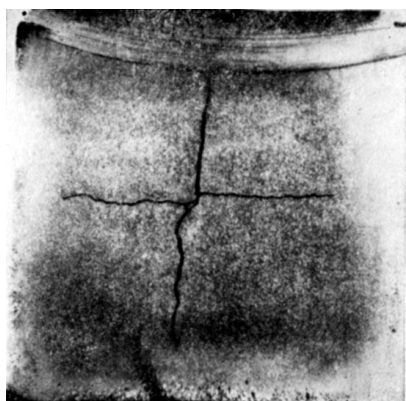
Макростроение деформированного металла

Для исследования внутренних дефектов деформированных полуфабрикатов – поковок, штамповок, прессованных профилей необходимо изготовить образцы из различных участков полуфабриката. Их можно изучать в нетравленном состоянии или после специального травления для выявления неоднородностей химического состава и макроструктуры.

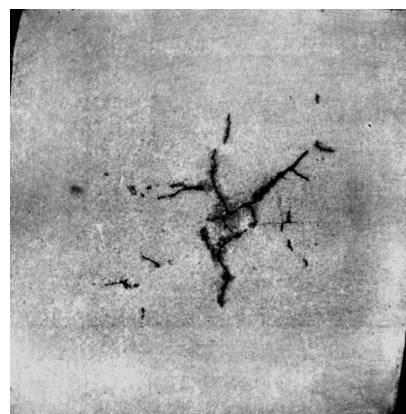
Ковка прутков квадратной формы из круглых слитков трудно деформируемых сталей и сплавов может приводить к образованию разрывов в виде «ковочного креста» (рисунок 8 а), или разветвленных разрывов, расходящихся от центра (рисунок 8 б).

Флокены представляют собой тонкие разрывы металла округлой или овальной формы, образующиеся в стали, насыщенной водородом. Они располагаются в средней зоне слитков, поковок или прутков. Флокены выявляются на макрошлифах после глубокого травления в виде тонких трещин размером от 1 до 30 мм (рисунок 9).

Все дефекты выявляются только после травления темплета 50%-ной соляной кислотой.



а



б

Рисунок 8 – Ковочные трещины деформированной заготовки сплава Х35Н50ВМ: «ковочный крест» (а); трещины, разветвленные по направлению ковочного креста (б)

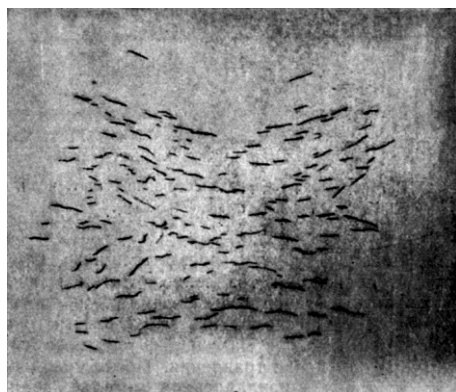


Рисунок 9 – Флокены в хромоникелевой стали, глубокое травление; (н. в.)

Изделия, полученные горячей пластической деформацией (ковка, штамповка, прессование) имеют волокнистую структуру. Для выявления такой волокнистой структуры небольшие поковки разрезают целиком для приготовления макрошлифа. Волокна представляют собой разрушенные и вытянутые в направлении деформации дендриты, границы зерен, интерметаллидные выделения и неметаллические включения. Поэтому по расположению волокон можно судить о направлении течения металла во время деформации. Такую структуру называют *текстура деформации*. На рисунке 10 показана макроструктура двух заготовок для крупных стальных шестерен. Одна из них вырезана из кованого полуфабриката, волокна расположены в одном направлении и перерезаются контурами детали. Вторая заготовка получена горячей штамповкой, волокна не перерезаются, а изменяют свое направление и повторяют конфигурацию детали. Можно ожидать, что во втором случае усталостная прочность готовой шестерни будет выше, чем в первом.

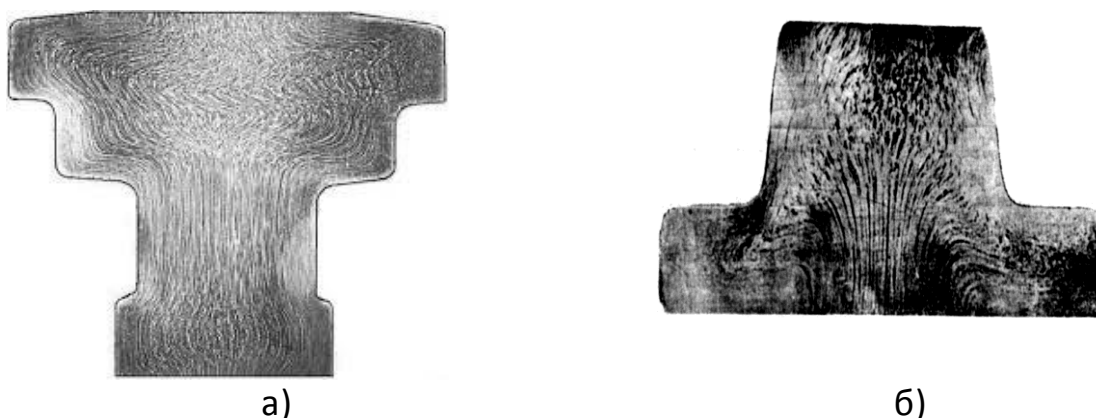


Рисунок 10 – Макроструктура стальных заготовок для шестерен:
(а) – заготовка вырезана из полуфабриката; (б) – получена горячей штамповкой

Изучение термической и химико-термической обработки

Трещины в деталях или заготовках при объемной закалке получаются из-за остаточных напряжений. Эти напряжения возникают в виду резких переходов толщины в различных частях изделий или вследствие острого подреза, связанного с конструкцией детали. Закалочные трещины хорошо выявляются на нетравленных макрошлифах. Так, например, последней причиной обусловлены трещины, образовавшиеся в валике зацепления с продольными канавками (рисунок 11). На фотографии хорошо видно, что все трещины на валике зацепления получили свое начало из остро подрезанных углов канавок. Для предотвращения появления таких трещин в конструкции деталей следует не допускать резкие заострения и переходы. Если это невозможно, то при закалке рекомендуется применять менее энергичные охладители, например, заменить охлаждение водой на охлаждение маслом.

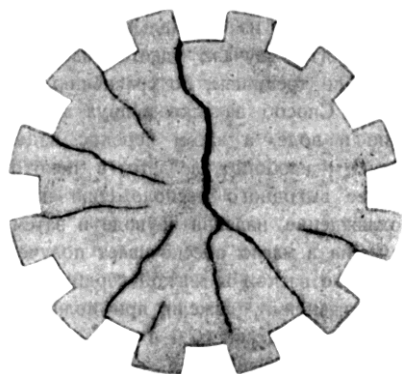


Рисунок 11 – Поперечный разрез валика зацепления с продольными фрезерованными канавками (макрошлиф нетравлен)

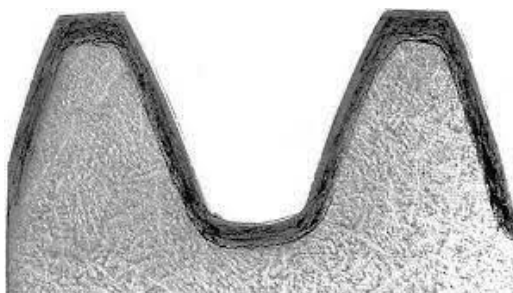


Рисунок 12 – Закаленный слой шестерни, закалка в воду; $\times 3$

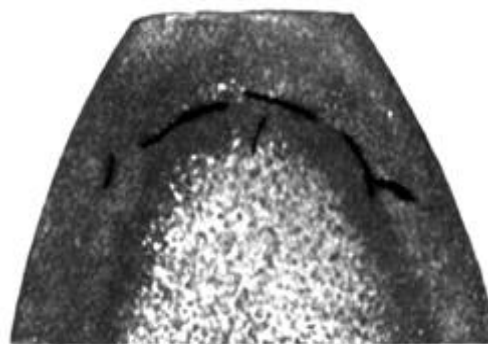


Рисунок 13 – Образование отслоений в головке зуба после цементации зубчатого колеса; $\times 5$

При объемно-поверхностной закалке применяют охлаждение быстро движущимся потоком воды или душевой установкой. В этом случае по сечению упрочняемого изделия создается значительный перепад скоростей охлаждения. Поверхностный слой, в котором скорость охлаждения превышает критическую скорость закалки, закаливается на мартенсит, на макрошлифе он выглядит светлой оторочкой (рисунок 12). Более глубокие слои, где скорость охлаждения

не достигает критической, закаливаются на ферритно-цементитную смесь, т. е. троостит закалки или сорбит закалки. Структура сердцевины остается без изменений.

Для исследования химико-термической обработки также применяют методы макроанализа. Например, наиболее распространенным способом обработки зубчатых колес является цементация или нитроцементация. На рисунке 12 закаленный цементованный слой зубчатого колеса выглядит темным контуром, сердцевина стали не протравлена и имеет светлый оттенок. Дефектами при цементации являются обычно слишком сильное науглероживание или неравномерное распределение углерода в цементованном слое. При слишком резком падении содержания углерода по глубине, особенно при крупнозернистом наружном слое, в цементованной зоне могут возникать трещины, отделяющие поверхностную корочку от сердцевины (рисунок 13).

Фрактография – изучение изломов

Макроскопическое строение поверхности разрушения металлов проводят внешним осмотром изломов.

В зависимости от механизма разрушения, который может быть вязким, хрупким или смешанным, его макроскопическое строение будет различным.

Макроскопический излом при вязком разрушении (вязкий излом) характеризуется волокнистостью, матовой, сильно шероховатой поверхностью и свидетельствует о значительной пластической деформации, предшествующей разрушению. По виду вязкого излома нельзя судить о форме и размерах зерен металла (рисунок 14, а, I, II).

При хрупком разрушении (хрупкий излом) поверхность излома имеет кристаллическое строение и характерный блеск (рисунок 14, б, I, II), поскольку разрушение протекает без заметной пластической деформации. Форма зерен не искажается и на хрупком изломе видны исходные форма и размер зерен металла. При смешанном разрушении поверхность образца состоит из участков обоих типов (рисунок 14, в, I, II). Чем больше доля вязкой составляющей в изломе, тем выше сопротивление металла разрушению, тем большая деформация предшествует разрушению.

Вид излома является очень важным критерием вязкости металлов при ударных испытаниях. Большинство изломов имеют неоднородное строение. Однородными изломами являются только очень хрупкие изломы металлов (например, излом углеродистых сталей после разрушения при низких температурах).

Хрупкое разрушение наиболее опасно, так как происходит чаще всего при напряжениях ниже предела текучести материала. Кроме того, при хрупком разрушении распространение трещины происходит лавинообразно с большой скоростью, соизмеримой со скоростью распространения звука в металле (около 1800 м/с).

Зарождение и распространение трещины облегчается при низкой температуре, ударных нагрузках, наличии хрупких включений по границам зерен и крупнозернистости металла.

Более детальное микроскопическое изучение изломов проводят специальными методами, например, электронно-фрактографическим методом. Это позволяет выявить микроочаги разрушения и структурные составляющие, которые ускоряют, замедляют или не влияют на распространение трещин, а также определить структуры, обладающие большей или меньшей способностью к микролокальной деформации, определяющей сопротивление развитию разрушения.

Изломы могут быть транскристаллитными, когда разрушение происходит по телу кристаллитов (зерен) или межкристаллитными (межзеренными) при разрушении по границам зерен. Последний вид разрушения имеет место при наличии на границах неметаллических включений (фосфиды, сульфиды, оксиды и др.), ослабляющих прочность границ зерен.

Основным признаком вязкого излома при фрактографическом методе исследования является ямочная структура, которая называется также сотовой или ячеистой (рисунок 14, *а*, III). Ямки образуются в вязких металлах, как правило, всегда, когда металл содержит большое количество включений. Ямочная структура излома чаще имеет место при транскристаллитном разрушении (рисунок 14, *а*), но во многих случаях наличие ямок обнаруживается на межзеренных поверхностях разрушения (рисунок 14, *б*).

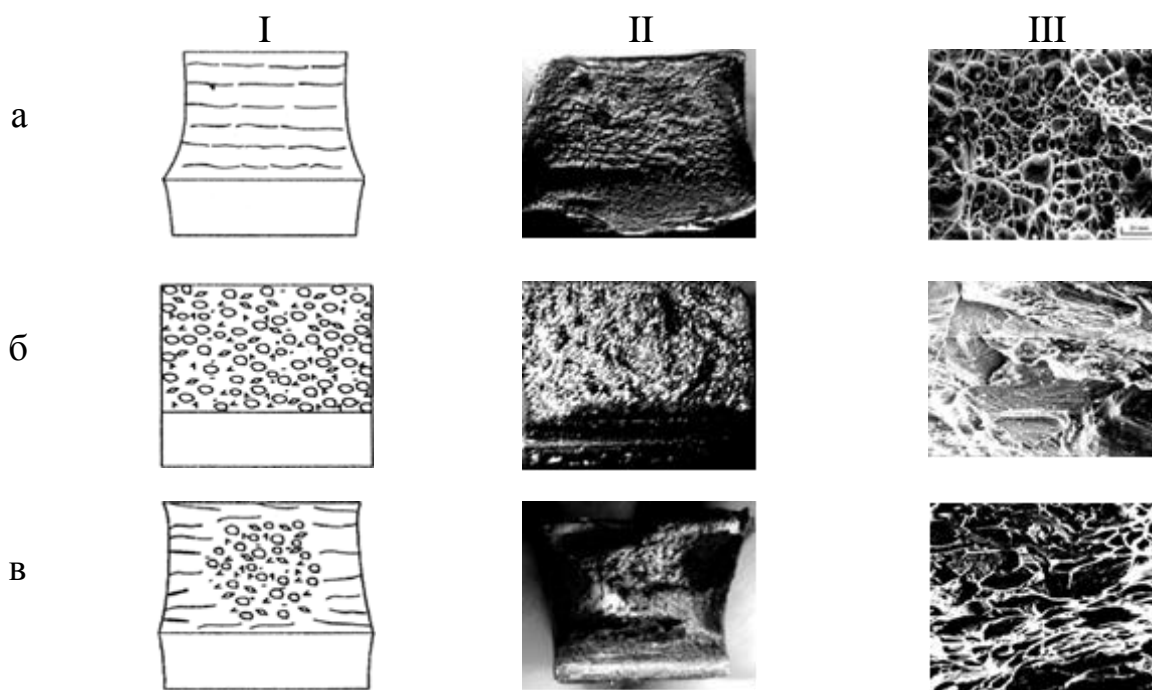


Рисунок 14 – Изломы сталей:

а – вязкий; *б* – хрупкий; *в* – смешанный:

I – схема; II – макроизломы; III – фрактограммы изломов

Основным признаком хрупкого разрушения является образование плоских и гладких фасеток (рисунок 14, б, III). Хрупкое разрушение может иметь как транскристаллитный, так и межкристаллитный характер. По поверхностям фасеток транскристаллического хрупкого излома трещины могут распространяться только в пределах данного зерна. По тонким линиям и ступенькам на поверхности разрушения можно определить путь и направление распространения трещин, которые могут образовывать ручьиистые (веерообразные) или перистые узоры. При хрупком разрушении происходит спонтанное распространение трещин от одного зерна к другому через все поперечное сечение образца. Напротив, при ямочном вязком разрушении образуются отдельные мелкие ветвящиеся трещины и поры, которые, в конце концов, объединяются.

Главным признаком межзеренного разрушения является рельеф, соответствующий огранке зерен. В межзеренных хрупких изломах наблюдаются гладкие площадки часто с частицами включений, которые приводят к хрупкости.

Смешанный излом имеет признаки как вязкого, так и хрупкого разрушения (см. рисунок 14, в, III). При фрактографическом анализе проводят качественное и количественное описание изломов: производят измерение линейных размеров ямок, фасеток и другое, а также доли той или иной составляющей (хрупкой, вязкой) от общей площади поверхности излома. Количественное описание изломов можно проводить с помощью учебно-методического комплекса, используя программу количественного анализа.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое макроанализ?
2. Какие объекты изучаются при макроанализе?
3. Как приготавливаются макрошлифы?
4. Какие сведения о строении металла можно получить при изучении макрошлифов?
5. Какие основные литейные дефекты могут быть выявлены на макрошлифах?
6. Опишите макроструктуру деформированных полуфабрикатов. На какие особенности их строения следует обращать внимание?
7. Как происходит поверхностная закалка и как при этом меняется структура детали?
8. Каковы наиболее распространенные дефекты цементованного слоя?
9. Чем отличаются поверхностные слои деталей после нитроцементации и азотирования?
10. Чем отличаются структура литого слитка и структура деформированного изделия после рекристаллизационного отжига?
11. Каковы особенности строения зоны сварного шва?
12. Назовите основные дефекты сварных швов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цель работы: получить практические умения и навыки в области изготовления образцов для исследования и выявления микроструктуры металлов и сплавов

Оборудование, приборы и материалы

Оборудование: шлифовально-полировальные станки “Нерис”, оптические микроскопы МИМ-7, ММУ-3.

Материалы: образцы металлов и сплавов, абразивная бумага, полировальные пасты, растворы кислот.

Методические указания по выполнению работы

1. Прочитать теоретическую часть данного пособия.
2. Ознакомиться с приборами и их работой.
3. В соответствии с заданием приготовить микрошлиф, выявить структуру образцов, зарисовать ее или сфотографировать.
4. Под рисунками указать увеличение микроскопа, при котором велось наблюдение, а также необходимые пояснения к рисунку.
4. Написать отчет.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующий материал:

1. Наименование и цель работы.
2. Краткое теоретическое введение.
3. Краткое описание методики приготовления микрошлифов.
4. Микроструктуры нетравленных и травленных микрошлифов.
5. Схему, поясняющую видимость границ зёрен под микроскопом.
6. Ответы на все вопросы в задании.
7. Результаты и выводы лабораторной работы.

Краткие теоретические сведения

Микроскопический анализ заключается в исследовании структуры специально подготовленных образцов (микрошлифов) при увеличениях от 30–50 до 1500–2000 крат.

Микроанализ проводят с целью определения:

1. Количества, размеров и типа структурных составляющих;
2. Фазового состава сталей и сплавов;
3. Связи химического состава, условий производства и обработки сплава с его микроструктурой и свойствами.

Для проведения высококвалифицированного микроанализа необходимы знания не только в области металлографии, но и в методике приготовления

микрошлифов, в устройстве микроскопов и методах микроскопического анализа.

Приготовление микрошлифа обычно включает следующие основные операции.

1. Вырезку образцов и подготовку поверхности.
2. Выравнивание поверхности среза.
3. Шлифование.
4. Полирование.
5. Выявление структуры травлением.

Выбор числа образцов, места вырезки и сечения материала, по которому проходит плоскость микрошлифа, определяется целью металлографического исследования, размерами, формой и особенностями структуры изучаемого объекта.

Наиболее удобны простые формы образцов следующих размеров: цилиндр или параллелепипед с диаметром или стороной основания 10–20 мм и высотой 10–15 мм. Образцы малых размеров (лента, проволока) или сложной конфигурации после вырезки для изготовления шлифов помещают в пластмассы или легкоплавкие сплавы, используя заливку или запрессовку в цилиндрические обоймы. Наиболее часто для холодной заделки шлифов используют эпоксидные смолы. Они обладают достаточной твердостью, малой объемной усадкой при отверждении и хорошо соединяются с большинством металлических образцов.

Обработку шлифа на плоскость производят с помощью напильника или наждачного круга. Затем производят шлифовку вручную или на шлифовальных станках. Шлифование осуществляют на 4–5 номерах наждачной бумаги, последовательно уменьшая размер абразива. Направление движения образца по наждачной бумаге при смене номера бумаги следует изменять на 90° , а шлифование на одном номере вести до исчезновения рисок от предыдущей шлифовальной бумаги. При смене номера бумаги следует удалять со шлифа частички абразива. После шлифования на последней бумаге шлиф тщательно промывают в воде, чтобы частички абразива не попали на полировальный круг.

На рисунке 1 приведены микрошлифы различной степени готовности.

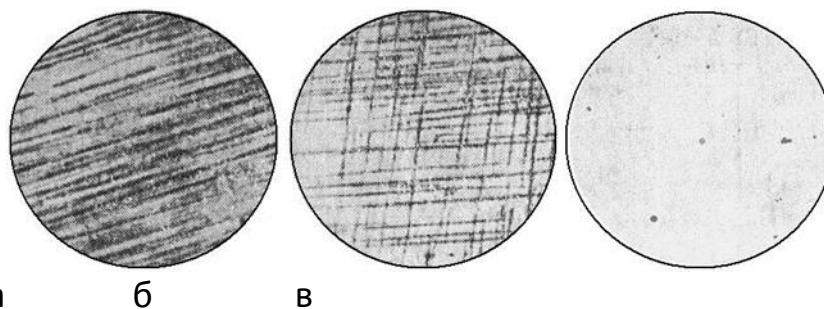


Рисунок 1 – Различная степень готовности микрошлифа:

а – подготовлен к более тонкой шлифовке; б – требуется продолжение шлифовки на данном абразиве; в – состояние поверхности микрошлифа после полировки

При шлифовании очень мягких металлов в ряде случаев шкурку предварительно смачивают в керосине или натирают парафином (например, при изготовлении микрошлифов из алюминия), чтобы свести к минимуму вдавливание абразивных частиц в поверхность шлифов.

Полирование служит для удаления мелких рисок, оставшихся после шлифования, и получения гладкой зеркальной поверхности шлифа. Применяют механическое или электрохимическое полирование.

Механическое полирование производят на вращающемся круге с натянутым полировальным материалом (фетр, сукно, драп), на который непрерывно или периодически наносят очень мелкий абразив в виде суспензии в воде. В качестве абразивов применяют оксид хрома, оксид алюминия и оксид железа. Все более широкое использование находят полировальные алмазные пасты, которые наносят на специальную ткань или бумагу.

Основные характеристики алмазных паст приведены в таблице 1.

Полирование ведут до получения зеркальной поверхности, и оно считается законченным, когда на поверхности шлифа под микроскопом не наблюдаются риски или царапины. После полировки шлиф промывают в воде или спирте и сушат полированную поверхность фильтровальной бумагой.

Таблица 1 – Основные характеристики полировальных алмазных паст

Обозначение зернистости по ГОСТ 9206-70	Размеры абразивных частиц, мкм	Концентрация алмазного порошка, %		Цвет пасты и этикетки
		нормальная Н	повышенная П	
60/40	60-40	10	20	красный
40/28	40-28	7	14	красный
28/20	28-20	7	14	голубой
20/14	20-14	5	10	голубой
14/10	14-10	5	10	голубой
10/7	10-7	3	6	зеленый
7/5	7-5	3	6	зеленый
5/3	5-3	2	4	зеленый
3/2	3-2	2	4	желтый
2/1	2-1	1	2	желтый
1/0	1-0	1	2	желтый

Электрохимическое полирование основано на использовании процесса анодного растворения металла, который при определенных условиях протекает с образованием гладкой блестящей поверхности. Образец после механического шлифования погружают в качестве анода в электролизную ванну и выдерживают при заданном режиме (напряжении, плотности тока и температуре электролита) определенное время. Катодом обычно служит пластинка, изготовленная из нержавеющей стали.

Преимуществом электрополировки является отсутствие на поверхности шлифа деформированного слоя, образующегося при шлифовании или механи-

ческом полировании. Этот метод особенно подходит для полирования шлифов из мягких и легко наклепывающихся сплавов. К недостаткам электрополирования относятся: чувствительность к неоднородности химического состава, преимущественное растворение металла вокруг пустот и неметаллических включений, краевые эффекты и др.

Для выявления структуры отполированную поверхность образца подвергают травлению реактивами, различающимися по своему воздействию на поверхность металла. Под воздействием реактива происходит растворение одних фаз, окисление и окрашивание других. В результате созданной различной отражающей способности фаз, самих зерен и их границ можно увидеть под микроскопом очертания зерен и различных фаз, определить их взаимное расположение; по цвету, форме и размерам определить присутствующие в сплаве фазы, т. е. выявить микроструктуру сплава.

Качество травления проверяют под микроскопом при том же увеличении, при котором предполагается изучение шлифа. Если поверхность шлифа, видимая под микроскопом, очень светлая, нет четкости контура структуры, то шлиф недотравлен; тогда проводят повторное травление. Если поверхность шлифа темная, с широкими темными границами структурных составляющих, то шлиф перетравлен; тогда его необходимо переполлировать с повторным травлением. После окончания травления шлиф промывают проточной водой, спиртом и высушивают прикладыванием фильтровальной бумаги.

Примеры рекомендуемых реактивов для выявления структуры различных металлов и сплавов:

Железоуглеродистые сплавы (сталь, чугун).

1. 1–5 % раствор HNO_3 в этиловом спирте. Реактив выявляет структуру закаленной, отпущенной и отожженной стали. Травление от нескольких секунд до минут.

2. Насыщенный водный раствор пикриновой кислоты с добавкой 1–5 % поверхностно-активных веществ, входящих в состав моющих порошков. Служит для выявления границ зерен аустенита в закаленной стали. Травление при 20 °С от 5 до 30 мин., при 70 °С – 0,5–6 мин.

3. 3 части HCl и 1 часть HNO_3 . Реактив выявляет структуру нержавеющей сталей и сплавов. Перед употреблением реактив необходимо выдержать 20–30 ч.

Медь и ее сплавы.

15 см³ HCl ; 5 гр. FeCl_3 ; 100 см³ воды. Время травления от 30 сек. До 2 мин. Шлиф травят последовательным втиранием, а затем погружают в реактив.

Изучение микроструктуры осуществляют с помощью световых металлографических микроскопов.

Впервые микроскоп для исследования строения металлов был применен в 1831 г. русским инженером **П. П. Аносовым**, изучавшим булатную сталь.

Металлографический микроскоп позволяет рассматривать непрозрачные тела в отраженном свете. В этом его основное отличие от биологического микроскопа.

Изучение микроструктуры целесообразно начинать с рассмотрения микрошлифа в нетравленном виде, т. е. непосредственно после полирования, промывки и высушивания. При исследовании можно обнаружить на светлом поле тёмные или серые точки и линии, которые могут представлять собой неметаллические включения.

В стали, изучают оксиды, сульфиды, шлаки, силикаты, а в чугунах – графитные включения. Неметаллические включения имеют иной коэффициент отражения, чем основной металл.

Неметаллические включения могут попасть в металл во время плавки в результате процессов окисления, раскисления и т. д. Разрыхляя металл, они понижают его прочность и повышают хрупкость. Кроме того, неметаллические включения играют роль концентраторов напряжений.

Для характеристики стали, по степени загрязнения её неметаллическими включениями применяется шкала баллов (рисунок 2).

Выявление микроструктуры металлов основано на неравномерном растворении в реактиве деталей структуры (структурных составляющих).

В чистом металле границы зерен растравливаются сильнее, чем тело зерна. В результате на границах зерен после травления образуются углубления, которые рассеивают («гасят») лучи света, и потому при рассмотрении структуры под микроскопом они наблюдаются в виде темных линий (рисунок 3). Например, микроструктура однофазного сплава – феррита показана на рисунке 4.

В сплавах неоднородные структурные составляющие также обладают неодинаковой растворимостью и потому на поверхности шлифа образуется определенный рельеф разной глубины (рисунок 5, а).

Зёрна перлита, представляющие собой смесь пластинок феррита и цементита, протравливаются сильнее, чем однородные зёрна феррита.

Свет по-разному отражается от тех и других зёрен, зёрна феррита выглядят под микроскопом светлыми, а зёрна перлита тёмными (рисунок 5, б).

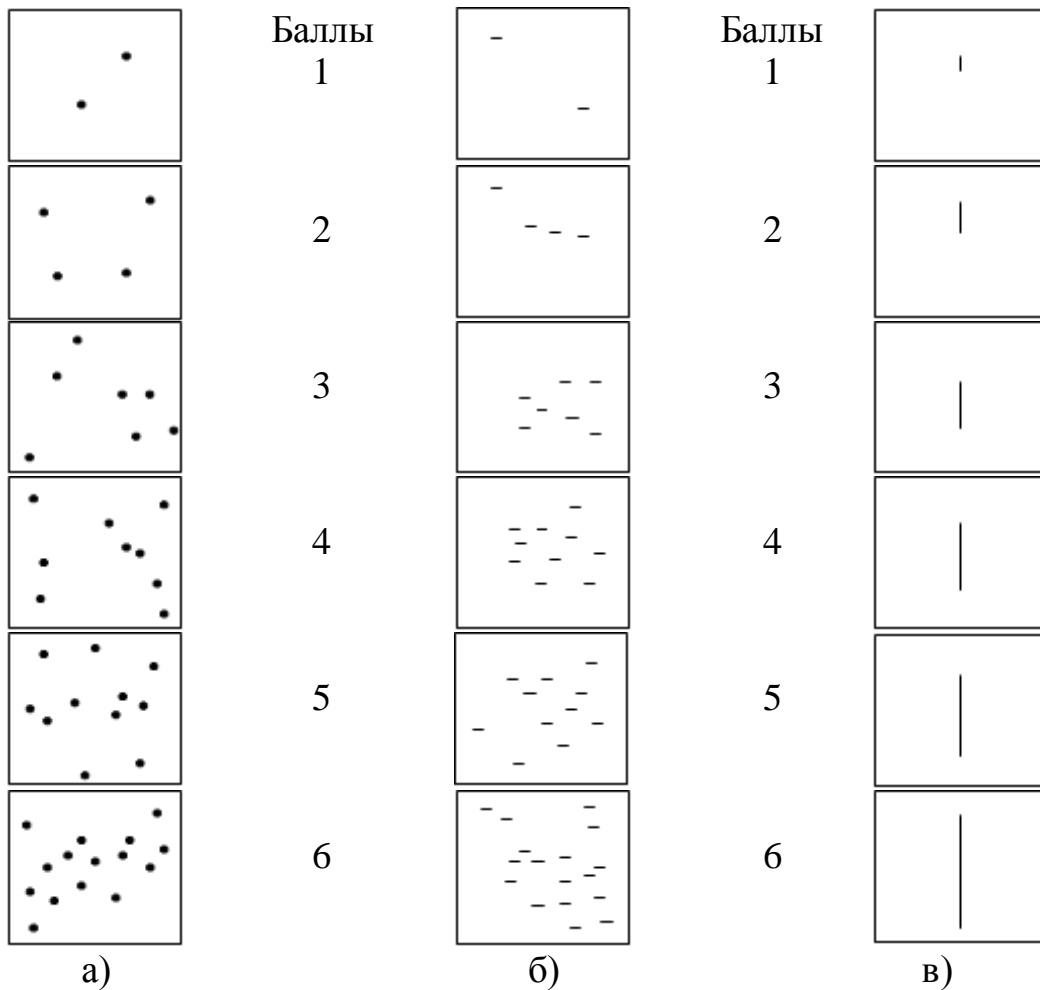


Рисунок 2 – Шкала баллов неметаллических включений в стали, а) оксиды, б) сульфиды, в) силикаты

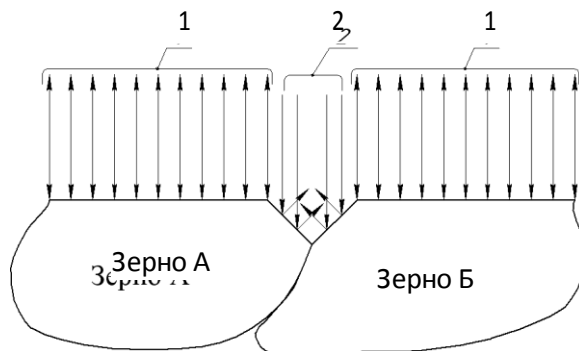


Рисунок 3 – Отражение потока света от поверхности шлифа в чистых металлах: 1 – прямой и отраженный поток света, 2 – рассеянный поток света



Рисунок 4 – Микроструктура технического железа (феррит), x100

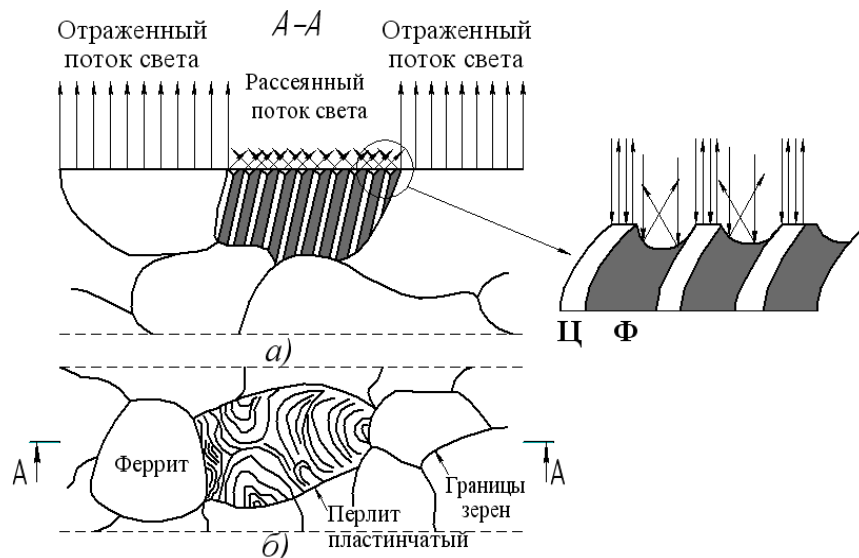


Рисунок 5 – Схема отражения потока света в неоднородном феррито-перлитном сплаве (а) и наблюдаемая микроструктура в нем под микроскопом (б): Ц – пластина цементита в перлите (светлая); Ф – пластина феррита в перлите (темная)

Микроскопический анализ занимает достойное место среди современных методов исследования металлов и сплавов, так как от характера и количества неметаллических включений, а также от структуры зависят многие свойства материалов.

Металлографический микроскоп позволяет рассматривать непрозрачные тела в отраженном свете. В этом его основное отличие от биологического микроскопа.

На рисунке 6 показаны две принципиальные схемы освещения шлифа. В металлографических микроскопах освещение объекта осуществляется через объектив. Лучи света от источника света 1 попадают на призму полного внутреннего отражения 2 (рисунок 6, а) или полупрозрачную плоскопараллельную пластинку 2 (рисунок 6, б). Их назначение направить поток света в объектив 3 и через него – на шлиф 4.

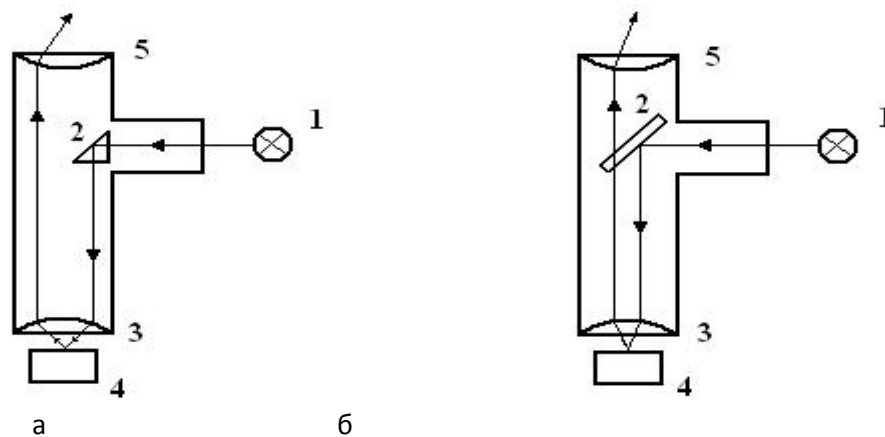


Рисунок 6 – Схема освещения шлифа в металлографических микроскопах

Отраженные от шлифа лучи попадают в объектив 3, далее в окуляр 5 и от него в глаз человека.

Если шлиф металла не травлен, то практически весь световой поток отражается от шлифа и попадает в окуляр микроскопа (рисунок 7, а). На травленном шлифе образуется микрорельеф из-за различной способности к растворению и окислению границ зерен, основы зерна и различных фаз (рисунок 8б). В результате различные участки шлифа по-разному отражают лучи света, что и позволяет наблюдать в микроскоп структуру металлов и сплавов (рисунок 7, в, г).

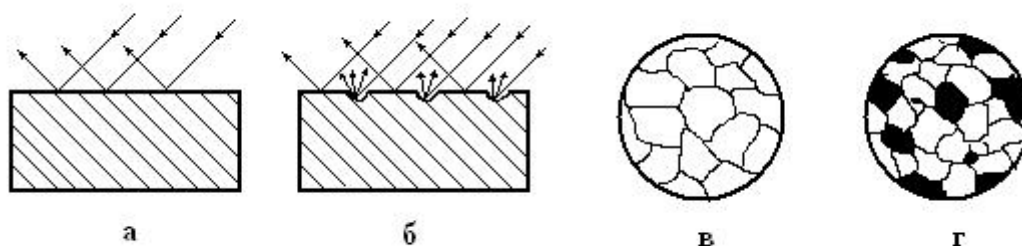


Рисунок 7 – Формирование изображения структуры шлифа в металлографическом микроскопе:

- а – отражение лучей от полированной поверхности;
- б – отражение лучей от травленной поверхности;
- в – вид в микроскопе травленной поверхности однофазного шлифа;
- г – вид в микроскопе травленной поверхности двухфазного шлифа

Основными характеристиками микроскопа являются его разрешающая способность и увеличение. *Разрешающая способность* характеризуется минимальным расстоянием между двумя соседними частицами, при котором они еще видны раздельно. Например, разрешающая способность невооруженного глаза составляет около 0,2 мм. Разрешаемое расстояние μ объектива микроскопа определяется соотношением:

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

где λ – длина волны света ($\lambda = 0,55$ мкм для белого света), A – числовая апертура объектива (выгравирована на оправе объектива).

Если учесть, что числовая апертура у лучших объективов равна 1,4, то минимальное разрешаемое расстояние светового микроскопа равно 0,2 мкм. Окуляр в микроскопе только увеличивает промежуточное изображение объекта, которое дает объектив, и не повышает разрешающую способность микроскопа.

Общее увеличение микроскопа равно произведению увеличения объектива на увеличение окуляра, так как изображение предмета увеличивается в объективе и окуляре. Увеличение современных металлографических микроскопов

может быть от 60 крат до 1500 при визуальном наблюдении и до 2000 крат при фотографировании. Увеличение микроскопа при фотографировании легко определить с помощью объект-микрометра – металлической пластинки с полупрозрачным стеклом в центре. На стекло нанесена шкала длиной 1 мм, разделенная на 100 частей, т. е. цена деления 0,01 мм. Установив объект-микрометр на столик микроскопа и добившись четкого изображения делений на матовом стекле фотографического устройства, определяют увеличение, соотнося расстояние на стекле с истинным расстоянием по объект-микрометру.

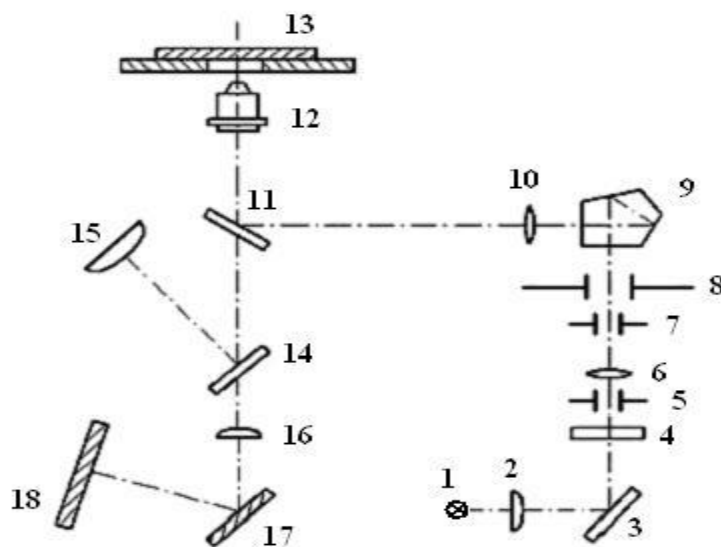


Рисунок 8 – Оптическая схема микроскопа МИМ-7

Большинство металлографических исследований проводят с применением светлполюсного (вертикального) освещения. Для дополнительного повышения контрастности применяют другие методы и виды освещения, например, косое освещение, поляризованное освещение, метод фазового контраста, метод интерференционного контраста. Следует, однако, отметить, что в большей части выпускаемых в стране металлографических микроскопов используется лишь 2–3 дополнительных вида освещения.

Наиболее широко в металлографических лабораториях применяют микроскопы МИМ-7, МИМ-8, ММУ-3, ММР-4. На рисунке 8 приведена оптическая схема микроскопа МИМ-7. Световые лучи от источника света 1 проходят через собирающую линзу (коллектор) 2, отражаются от зеркала 3, проходят через светофильтр 4, апертурную диафрагму 5, линзу 6, фотозатвор 7, полевую диафрагму 8 и, претерпев полное внутреннее преломление в поворотной призме 9, попадают на полупрозрачную плоскопараллельную пластинку 11. Часть светового потока проходит через нее и рассеивается в микроскопе, а часть лучей отражается вверх от пластинки, проходит через объектив 12 и через отверстие в предметном столике попадает на шлиф 13. Отраженные от шлифа лучи проходят через объектив 12, через прозрачную плоскопараллельную пластинку 11 и, отразившись от зеркала 14, через окуляр 15 попадают в глаз человека. В случае фотографирования зеркало 14 выдвигается в сторону вместе с окулярным тубу-

сом, и лучи света проходят через фотоокуляр 16, отражаются от зеркала 17 и попадают на матовое стекло фотокамеры или на фотопластинку в кассете, вставленной вместо матового стекла.

Вопросы для самопроверки

1. На чем основаны физические методы исследования металлов?
2. На чем основан рентгеноструктурный анализ?
3. Какова цель исследования металлов?
4. Что такое разрешающая способность микроскопа?
5. Недостаток механической полировки?
6. Что такое микроструктура металлов?
7. Как приготовить образец металла для микроанализа?
8. Достоинство электролитического полирования?
9. Как выглядит в микроскопе недотравленный шлиф металла?
10. На чем основано электролитическое полирование?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цель работы: получить практические умения и навыки в области определения твердости различными методами

Оборудование и материалы для выполнения работы

Приборы Бринелля, Роквелла, Виккерса, микротвердомер. Образцы различных железоуглеродистых сплавов (сталей и чугунов); образцы из меди, алюминия и сплавов на их основе; образцы из закаленной и отпущенной стали. Наждачные круги и абразивная бумага.

Методические указания по выполнению работы

Прежде чем приступить к измерению твердости образца, необходимо выбрать методику определения твердости (Бринелль, Роквелл). Для этого необходимо знать, в каком состоянии находится данный образец или деталь (в отожженном или закаленном). Если нет данных, то для ориентировки можно попробовать определить твердость обыкновенным напильником. Если напильник скользит по поверхности или лишь незначительно царапает металлическую поверхность, то образец имеет высокую твердость, и тогда следует применять метод определения твердости по Роквеллу. Если же образец хорошо режется напильником (легко снимается часть металла), то он имеет сравнительно низкую твердость, и тогда следует применять метод определения твердости по Бринеллю.

После выбора метода испытания необходимо подготовить образец для испытания. При использовании метода Бринелля образец подготавливают так, чтобы его поверхности (испытуемая и опорная) были параллельны и не имели окалины, ржавчины и других неровностей, влияющих на результат испытания. Это достигается (при необходимости) обработкой резанием, зачисткой или обработкой указанных поверхностей наждачной бумагой, наждачным кругом или напильником без разогрева. Минимальная толщина образца должна быть не менее 10-ти кратной глубины отпечатка.

При определении твердости по Роквеллу поверхности образцов (испытуемая и опорная) зачищаются на мелкой наждачной шкурке или на мелкозернистом шлифовальном круге. Зачистка не должна сопровождаться нагревом образца выше 150 °С. Опорная поверхность образца должна обеспечивать плотное и устойчивое прилегание его к опорному столику.

При определении твердости по методу Виккерса и микротвердости испытуемая поверхность образцов обязательно шлифуется и полируется (иногда для определения микротвердости отдельных зерен шлиф подвергается травлению). Опорную поверхность достаточно зачистить на наждачной бумаге. При любом методе испытания образец не должен сдвигаться, качаться или деформировать-

ся, на нем не должно быть грубых царапин, забоин, следов предыдущих испытаний.

Все результаты испытания твердости по Бринеллю вносятся в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты испытания твердости по Бринеллю

Материал	Условия испытаний			Диаметр отпечатка d , мм			Твердость, HV		Предел прочности σ_B , МПа
	Нагрузка, P , кгс	Диаметр шарика D , мм	Время, сек	1	2	Сред.			

Студенты должны проанализировать данные, приведенные в таблице 1. При этом обратить внимание на то, как отличается твердость черных металлов и сплавов (сталь и чугун) от цветных (медь, латунь, бронза, дуралюмин и т. д.). Кроме того, необходимо обратить внимание на отличие в твердости чистых металлов и их сплавов. Анализ результатов испытания должен приводиться в выводах по данной работе.

Все студенты должны познакомиться с методом определения твердости по Роквеллу и провести испытания твердости данных образцов. Данные внести в таблицы 2, 3.

Таблица 2 – Результаты испытания твердости по Роквеллу

Материал	Инден-тор	Нагрузка, P , кгс	Шкала	Обозначение твердости	Число твердости по Роквеллу				Твердость по Бринеллю, HV , МПа
					1	2	3	Сред.	

Таблица 3 – Результаты испытания твердости по Виккерсу

Материал	Инден-тор	Нагрузка, P , кгс	Длина диагонали отпечатка, мм				Твердость	
			1	2	3	Сред.	по Виккерсу, HV , МПа	по Бринеллю, HV , МПа

Порядок выполнения работы

1. Изучить теоретический материал по теме занятия.

2. Ознакомиться с приборами и методами определения твердости по Бринеллю, по Роквеллу, по Виккерсу и микротвердости.

3. Измерить твердость предложенных образцов металлов и сплавов на приборах Бринелля, Роквелла и Виккерса. Данные внести в таблицы 1–3 соответственно.

4. Определить приблизительное значение предела прочности по данным измерения твердости по Бринеллю.

5. Проанализировать результаты измерений и написать отчет.

Краткие теоретические сведения

При проектировании и производстве машин, механизмов, инструментов те или иные детали должны обладать определенными механическими свойствами. Механические свойства металлов характеризуют сопротивление материала деформации и разрушению под действием внешних нагрузок. Практически все методы определения механических свойств являются разрушающими. Для проведения испытаний необходимы специальные машины, процессы испытания довольно длительны, особенно если учесть весьма продолжительный процесс изготовления специальных образцов.

Механические свойства и физические свойства зависят от многих факторов: от состава материала, вида обработки (пластической деформации, термической обработки). Поэтому в процессе изготовления тех или иных деталей необходимо контролировать свойства, особенно механические. Как отмечено ранее, обычные методы испытания механических свойств не могут быть использованы на промежуточных стадиях изготовления деталей вследствие длительности и дороговизны изготовления образцов, длительности самого процесса испытания. В этом случае пользуются методами определения твердости.

Твердость имеет большое практическое значение, так как она отражает многие рабочие свойства материала, например, сопротивляемость истиранию, режущие свойства, способность обрабатываться шлифованием или резанием, выдерживать местные давления и т. д. Кроме того, по твердости можно судить и о других механических свойствах (например, о прочности на разрыв). Следовательно, между твердостью и другими свойствами материалов существует определенная связь, подтверждаемая практикой.

Широкое распространение испытаний материалов на твердость объясняется тем, что при этом не требуется изготовления специальных образцов; методика испытаний весьма проста и может осуществляться непосредственно на готовой детали без разрушения.

Большинство методов определения твердости основано на принципе вдавливания в испытуемый материал твердых тел (закаленного шарика, алмазного конуса или алмазной пирамиды) и последующего измерения размеров отпечатков. Поэтому часто *твердость определяют, как способность материала сопротивляться внедрению в него другого тела*. Однако такое определение не является общим, так как существуют и другие методы определения твердости,

основанные не на вдавливании, а на царапании, качании маятника, динамическом методе и других принципах.

Наиболее широко практикуются испытания твердости по Бринеллю, по Роквеллу, по Виккерсу и метод определения микротвердости. Во всех перечисленных методах при вдавливании индентора происходит пластическая деформация испытуемого материала под индентором. Чем больше сопротивление материала пластической деформации, тем на меньшую глубину проникает индентор и тем выше твердость.

По Бринеллю определяют твердость относительно мягких материалов: цветных металлов и их сплавов, отожженной стали, чугунов (кроме белого).

По Роквеллу чаще всего определяют твердость очень твердых материалов: закаленных сталей, твердых сплавов, керамики, твердых покрытий, в том числе наплавленных слоев достаточной глубины на сталях и чугунах. Но на приборе Роквелла можно определять твердость и сравнительно мягких материалов.

Метод Виккерса используется для испытания твердости деталей малой толщины или тонких поверхностных слоев, имеющих высокую твердость. Реже этот метод применяется для измерения твердости твердых и мягких материалов.

Методом микротвердости обычно измеряется твердость в пределах отдельных зерен или очень тонких слоев. Два последних метода чаще всего используются в исследовательских работах.

Твердость по методу Бринелля. Определение твердости по Бринеллю основано на вдавливании в испытуемый материал стального шарика и последующего измерения диаметра отпечатка (рисунок 1).

Твердость по Бринеллю (HB) выражается отношением взятой нагрузки P к площади поверхности отпечатка F :

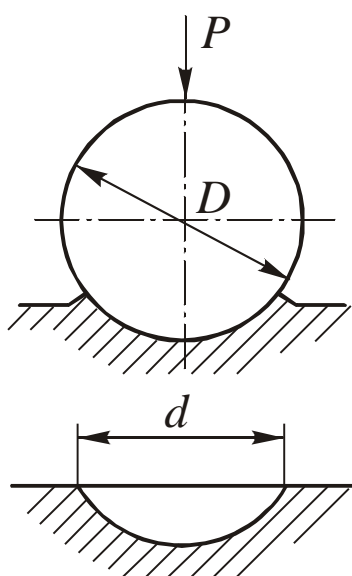


Рисунок 1

$$HB = \frac{P}{F}. \quad (1)$$

Если вычислить поверхность отпечатка, имеющего форму шарового сегмента, то HB определится формулой

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

где P – приложенная нагрузка, кгс; D – диаметр шарика, мм; d – диаметр отпечатка, мм.

Размер шарика выбирается в зависимости от толщины испытуемого образца: обычно пользуются шариками стандартных размеров диаметрами в 10 мм, 5 мм или 2,5 мм.

Нагрузка на шарик выбирается в зависимости от рода материала и должна быть пропорциональна квадрату диаметра шарика. Условные стандартные

нормы, принятые для различных материалов, следующие:

для стали и чугуна

$$P = 30D^2,$$

для меди и медных сплавов

$$P = 10D^2,$$

для баббитов и свинцовистых бронз

$$P = 2,5D^2.$$

Более подробные сведения по выбору нагрузки, времени приложения нагрузки для различных материалов приводятся в соответствующей таблице в лаборатории испытания твердости.

Кроме того, нагрузка считается выбранной правильно, если выдерживается соотношение

$$0,2D < d < 0,6D. \quad (3)$$

Диаметр отпечатка измеряют с помощью лупы Бринелля или микроскопа в двух взаимно перпендикулярных направлениях и определяют, как среднее арифметическое из двух измерений. Лупа имеет шкалу, малое деление которой (или цена деления) равно 0,05 мм. На рисунке 2 показано измерение диаметра отпечатка с помощью лупы.

По результатам измерения диаметра отпечатка на данном материале твердость по Бринеллю определяется с помощью формулы (2) или по таблице определения чисел твердости по Бринеллю (таблица 4).

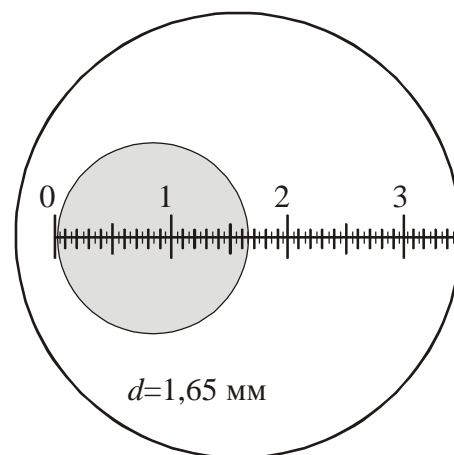


Рисунок 2

Таблица 4 – Определения твердости по Бринеллю

Диаметр отпечатка d_{10} или $2d_5$, или $4d_{2,5}$	Число твердости по Бринеллю при нагрузке P (кгс), равной			Диаметр отпечатка d_{10} или $2d_5$, или $4d_{2,5}$	Число твердости по Бринеллю при нагрузке P (кгс), равной		
	$30 D^2$	$10 D^2$	$2,5 D^2$		$30 D^2$	$10 D^2$	$2,5 D^2$
1	2	3	4	5	6	7	8
2,00	955			4,00	229	76,3	19,1
2,05	910			4,05	223	74,3	18,6
2,10	868			4,10	217	72,4	18,1
2,15				4,20	207	68,8	17,2
2,20	764			4,25	201	67,1	16,8
2,25	735			4,30	197	65,5	16,4
2,30	707			4,35	192	63,8	16,0
2,35	682			4,40	187	62,4	15,6
2,40	659			4,45	183	60,9	15,2
2,45	616			4,50	179	59,5	14,9
2,50	597			4,55	174	58,1	14,5
2,55	579			4,60	170	56,8	14,2
2,60	562			4,65	167	55,5	13,9

1	2	3	4	5	6	7	8
2,65	531			4,70	163	54,3	13,6
2,70	516			4,75	159	53,0	13,3
2,75	489			4,80	156	51,9	13,0
2,80	477			4,85	152	50,7	12,7
2,85	455			4,90	149	49,6	12,4
2,90	444			4,95	146	48,6	12,2
2,95	429			5,00	143	47,5	11,9
3,00	415		34,6	5,05	140	46,5	11,6
3,05	401		33,4	5,10	137	45,5	11,4
3,10	388	129	32,3	5,15	134	44,6	11,2
3,15	375	125	31,3	5,20	131	43,7	10,9
3,20	363	121	30,3	5,25	128	42,8	10,7
3,25	352	117	29,3	5,30	126	41,9	10,5
3,30	341	114	28,4	5,35	123	41,0	10,3
3,35	331	110	27,6	5,40	121	40,2	10,1
3,40	321	107	26,7	5,45	118	39,4	9,86
3,45	311	104	25,9	5,50	116	38,6	9,66
3,50	302	101	25,2	5,55	114	37,9	9,46
3,55	293	97,7	24,5	5,60	111	37,1	9,27
3,60	285	95,0	23,7	5,65	109	36,4	9,10
3,65	277	92,3	23,1	5,70	107	35,7	8,93
3,70	269	89,7	22,4	5,75	105	35,0	8,76
3,75	262	87,2	21,8	5,80	103	34,3	8,59
3,80	255	84,9	21,2	5,85	101	33,7	8,43
3,85	248	82,6	20,7	5,90	99,2	33,1	8,26
3,90	241	80,4	20,1	5,95	97,3	32,4	8,11
3,95	235	78,3	19,6	6,00	95,5	31,8	7,96

Как отмечалось ранее, между механическими свойствами (в частности, пределом прочности σ_B и твердостью по Бринеллю) существует определенная зависимость, которая может быть представлена эмпирической формулой:

$$\sigma_B = C \cdot HB \text{ [МПа]},$$

где C – коэффициент пропорциональности.

Для сталей (при 0,1–1,3% С) $C = 3,3 \dots 3,6$

Для алюминия $C = 4,0$

Для меди $C = 4,8$

Для дуралюмина $C = 3,7$

Для латуни, бронзы $C = 5,3$

Следует отметить, что для хрупких материалов (чугун, силумин) надежной корреляции между твердостью и пределом прочности получить не удастся. В частности, для определения предела прочности серого чугуна пользуются следующей эмпирической формулой:

$$\sigma_{\text{в}} = \frac{10 \cdot (HB - 40)}{6} \text{ [МПа]}.$$

Твердость по методу Роквелла. Определение твердости по Роквеллу основано на вдавливании в исследуемый материал алмазного конуса с углом в вершине 120° (шкалы *A* и *C*) и последующим измерением глубины вдавливания h (рисунок 3) или стального шарика диаметром 1,5875 мм (шкала *B*).

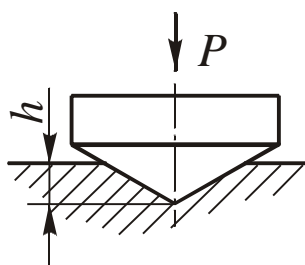


Рисунок 3

Твердость по Роквеллу выражается отвлеченной величиной, зависящей от глубины вдавливания h , и может быть определена по формуле, но в этом нет необходимости, так как твердость определяется по показаниям прибора.

Метод Роквелла позволяет проводить испытания деталей после поверхностного упрочнения и объемной закалки. Определение твердости по этому методу практически не связано с порчей поверхности изделия.

Шкала *C* служит для испытания твердых материалов, имеющих твердость по Бринеллю от 230 до 700 кгс/мм². Алмазный конус вдавливается с усилием 150 кгс. Интервал измерения твердости по шкале *C* – от 22 до 68 единиц, твердость обозначается *HRC*.

Шкала *A* используется при испытании очень твердых материалов или тонких поверхностных слоев (0,5...1,0 мм). Применяют тот же алмазный конус, но сила вдавливания 60 кгс. Значение твердости определяют по шкале *C*, но обозначают *HRA*. Интервал измерения твердости по этой шкале от 70 до 85 единиц.

Шкала *B* предназначена для испытания мягких материалов, имеющих твердость по Бринеллю от 60 до 230 кгс/мм². Стальной шарик диаметром 1,5875 мм вдавливается с усилием в 100 кгс. Твердость измеряется в пределах от 25 до 100 единиц шкалы *B* и обозначается *HRB*.

Таблица 5 – Сопоставление значений твердости по Бриннеллю, Роквеллу и Виккерсу

<i>HV</i>	<i>HB</i>	<i>HRC</i>	<i>HRA</i>	<i>HV</i>	<i>HB</i>	<i>HRC</i>	<i>HRA</i>
240	228	20,3	60,7	510	475	49,8	75,7
245	233	21,3	61,2	520	483	50,5	76,1
250	237	22,2	61,6	530	492	51,1	76,4
255	242	23,1	62,0	540	500	51,7	76,7
260	247	24,0	62,4	550	509	52,3	77,0
265	252	24,8	62,7	560	517	53,0	77,4
270	256	25,6	63,1	570	526	53,6	77,8
275	261	26,4	63,5	580	535	54,1	78,0
280	266	27,1	63,8	590	543	54,7	78,4
285	271	27,8	64,2	600	552	55,2	78,6
290	275	28,5	64,5	610	560	55,7	78,9
295	280	29,2	64,8	620	569	56,3	79,2
300	285	29,8	65,2	630	577	56,8	79,5
310	294	31,0	65,8	640	586	57,3	79,8
320	304	32,2	66,4	650		57,8	80,0
330	313	33,3	67,0	660		58,3	80,3
340	323	34,4	67,6	670		58,8	80,6
350	332	35,5	68,1	680		59,2	80,8
360	342	36,6	68,7	690		59,7	81,1
370	351	37,7	69,2	700		60,1	81,3
380	361	38,8	69,8	720		61,0	81,8
390	370	39,8	70,3	740		61,8	82,2
400	380	40,8	70,8	760		62,5	82,6
410	390	41,8	71,4	780		63,3	83,0
420	399	42,7	71,8	800		64,0	83,4
430	408	43,6	72,3	820		64,7	83,8
440	418	44,5	72,8	840		65,3	84,1
450	423	45,3	73,3	860		65,9	84,4
460	432	46,1	73,6	880		66,4	84,7
470	442	46,9	74,1	900		67,0	85,0
480	450	47,7	74,5	920		67,5	85,3
490	456	48,4	74,9	940		68,0	85,6

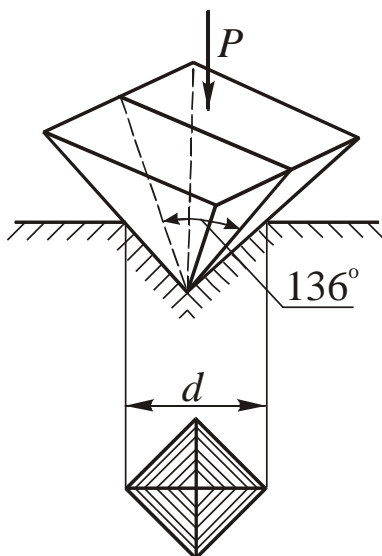


Рисунок 4

Твердость по Виккерсу. Метод заключается во вдавливании алмазного наконечника, имеющего форму правильной четырехгранной пирамиды, в образец (изделие) под действием нагрузки P и измерении диагонали отпечатка d , оставшегося после снятия нагрузки (рисунок 4).

Нагрузка P может меняться от 9,8 Н (1 кгс) до 980 Н (100 кгс). Твердость по Виккерсу

$$HV = 0,189 \frac{P}{d^2} \text{ [МПа]},$$

если P выражена в Н, и

$$HV = 1,854 \frac{P}{d^2} \text{ [кгс/мм}^2\text{]},$$

если P выражена в кгс.

Метод используют в основном для определения твердости деталей малой толщины, тонких покрытий или твердости внешних слоев детали после поверхностного упрочнения (например, после азотирования). При правильном выборе нагрузки для измерения метод может заменять приборы Бринелля и Роквелла.

Чем тоньше материал, покрытие или упрочнённый слой, тем меньше должна быть нагрузка. Число твердости по Виккерсу HV определяют по специальным таблицам по измеренной величине d (диагонали отпечатка в миллиметрах) с учётом приложенной при измерении нагрузки.

Микротвердость. Определение микротвердости (твердости в микроскопически малых объемах) необходимо для тонких покрытий, отдельных структурных составляющих сплавов (рисунок 5). Прибор для определения микротвердости состоит из механизма для вдавливания алмазной пирамиды с небольшой нагрузкой и металлографического микроскопа. В испытываемую поверхность вдавливают алмазную пирамиду под нагрузкой 0,05...5,00 Н. Твердость H определяют по той же формуле, что и твердость по Виккерсу:

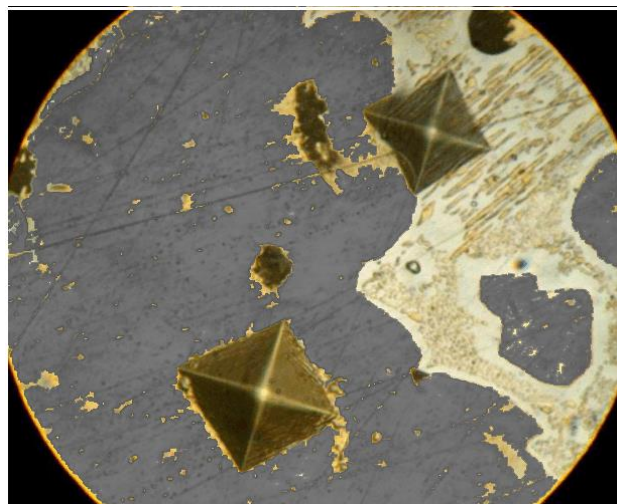


Рисунок 5

$$H = 0,189 \frac{P}{d^2}, \text{ если нагрузка } P \text{ выражена в (Н).}$$

Содержание отчета

В отчете по данной лабораторной работе должны быть приведены.

1. Наименование работы и ее цель.
2. Оборудование и материалы, используемые при выполнении работы.
3. Краткое описание методов определения твердости и область их применения.
4. Значение данного метода испытания для определения свойств металлов и сплавов.
5. Таблицы экспериментальных данных всей подгруппы и выводы по этим данным.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое твердость?
2. Классификация методов измерения твердости.
3. Сущность измерения твердости по Бринеллю.
4. До какого значения твердости при испытании по Бринеллю используются стальные шарики?
5. Какого диаметра шарики используются при испытании на твердость по Бринеллю?
6. Из каких условий выбирается диаметр шарика при испытании на твердость по Бринеллю?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ

Цель работы: получить практические умения и навыки о влиянии пластической деформации на структуру и механические свойства металлов, и влиянии нагрева на свойства деформированного металла.

Оборудование, приборы, материалы

- твердомеры Роквелла, Бринелля;
- муфельные печи;
- металлографические микроскопы МИМ-7 или ММУ-3М;
- наборы предварительно деформированных образцов металлов (меди, алюминия, железа) или стали 10 (стали 15).

Методические указания по выполнению работы

1. Ознакомиться с основными положениями работы.
2. Выполнить в соответствии с заданием экспериментальную часть работы.
3. Проанализировать полученные результаты и на основании теоретического материала сделать необходимые выводы.
4. Выполнить одну из задач (по указанию преподавателя) и пояснить решение.

Задания для выполнения работы

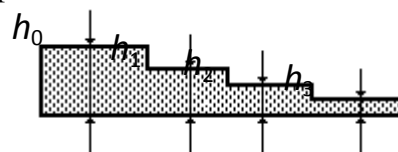
1. Для образцов меди, деформированных на 30 – 40 %, определить температуру рекристаллизации меди по изменению твердости после нагрева на различную температуру (по графической зависимости «твердость – температура»). За центр температурного интервала принять температуру рекристаллизации меди, определенную по формуле А. А. Бочвара. Температурный шаг от центра интервала в сторону уменьшения и увеличения температуры принять 50 °С.

Сравнить температуру рекристаллизации меди, определенную по формуле А. А. Бочвара, и найденную экспериментально, если они отличаются объяснить причину. Температура плавления меди 1083 °С.

2. Провести холодную деформацию образцов технической чистой меди на различную степень деформации и определить изменение твердости деформированных образцов в зависимости от степени деформации.

Степень деформации рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon = (h_0 - h_k) \cdot 100 / h_0, \%$$



где h_0 – толщина образца до деформации, h_k – толщина образца после деформации.

Результаты измерений внести в таблицу 1 и построить графическую зависимость твердости от степени деформации.

Таблица 1 – Результаты испытаний

Исходная толщина h_0 , мм	Конечная толщина h_K , мм	Степень деформации ε , %	Твердость HB	Микроструктура	Примечание
		0			Крупное равноосное зерно, структура феррит
		20			Ориентация отдельных зерен, наиболее благоприятно расположенных относительно направления проката
		60			Все зерна расположены в направлении проката
		80			Зерна деформированы в большей степени, явление наклепа $\uparrow \sigma_B, \sigma_{0,2}, HB$, $\downarrow \delta, \psi, KCU$, макро-структура– волокнистая
		80, с последующим рекристаллизационным отжигом			Мелкое равноосное зерно, наклеп снят, повысилась пластичность, $\downarrow \sigma_B, \sigma_{0,2}, HB$ $\uparrow \delta, \psi, KCU$

3. Провести горячую деформацию образцов технической чистой меди на различную степень деформации и определить изменение твердости горячедеформированных образцов в зависимости от степени деформации. Результаты измерений внести в таблицу 1 и построить графическую зависимость твердости от степени горячей деформации.

4. Холоднодеформированные образцы меди подвергнуть рекристаллизационному отжигу в течение 10 минут и определить изменение твердости отожженных образцов в зависимости от степени деформации. Результаты измерений внести в таблицу 1 и построить графическую зависимость.

Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе должен включать следующее:

– название, цель работы;

- краткие теоретические сведения;
- методику лабораторной работы (задание по лабораторной работе);
- данные испытаний приведены в таблице 1.

Краткие теоретические сведения

1. Пластическая деформация металлов

Важнейшим и наиболее характерным свойством металлов является *пластичность* – способность претерпевать деформацию (изменять форму и размеры) без разрушения. В сочетании с высокой прочностью это свойство делает металлы незаменимыми для современной техники. Деформация, которая исчезает после снятия нагрузки, – это *упругая деформация*. Часть деформации, которая остается после снятия нагрузки, – это *пластическая деформация*. Чем больше остаточная деформация металла до разрушения, тем выше его пластичность.

При упругом деформировании под действием внешней силы изменяется расстояние между атомами, и в кристаллической решетке возникают дополнительные силы притяжения или отталкивания. Снятие нагрузки устраняет причину изменения межатомного расстояния, атомы становятся на прежние места под действием дополнительных сил, существующих между ними, и упругая деформация исчезает.

Значительно более сложно проходит процесс пластической деформации, которая осуществляется при напряжениях, больших предела упругости металла.

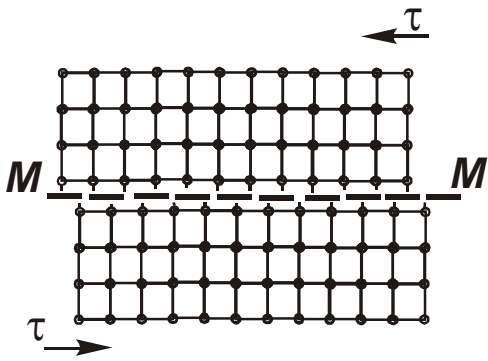


Рисунок 1

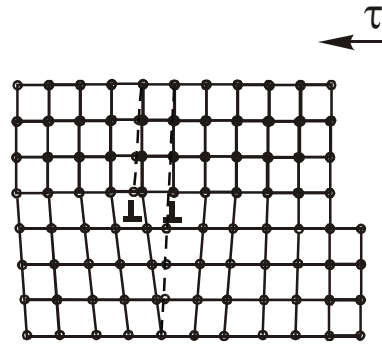
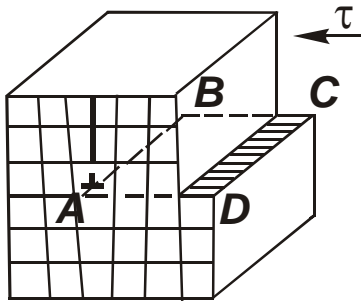
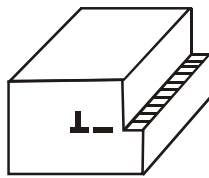


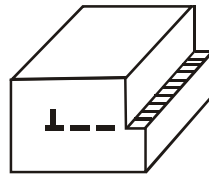
Рисунок 5



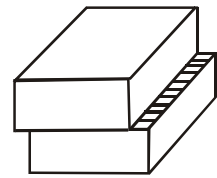
а



б

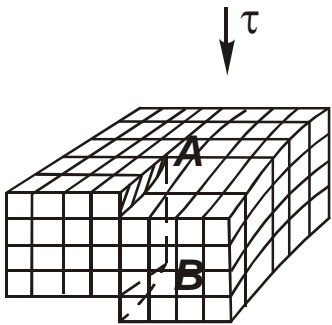


в

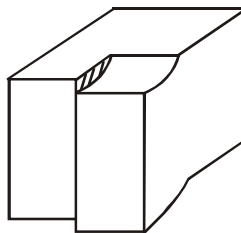


г

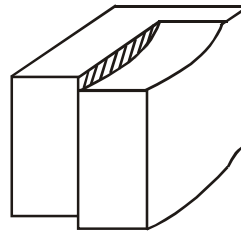
Рисунок 2



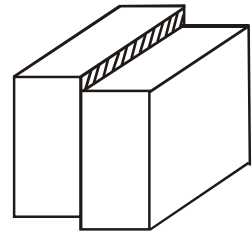
а



б

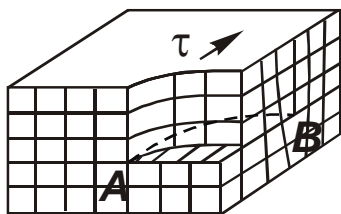


в

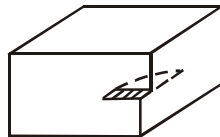


г

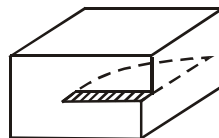
Рисунок 3



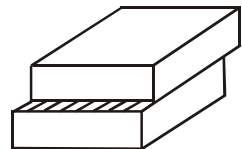
а



б



в



г

Рисунок 4

В конечном итоге пластическая деформация представляет собой сдвиг одной части кристалла относительно другой. Каков же механизм этого процесса? Естественно предположить одновременное смещение всех атомов одного слоя по отношению к атомам соседнего слоя по плоскости сдвига MM (рисунок 1) – так скользят бумажные листы в пачке бумаги при сдвиге ее верхней части. Усилие, которое надо приложить для осуществления такого сдвига, можно подсчитать и таким образом определить теоретическую прочность. Такой расчет был сделан Я. И. Френкелем, и получилось, что для железа прочность должна быть равна 1300 кгс/мм^2 , тогда как в действительности предел прочности железа 15 кгс/мм^2 , т. е. в 100 раз меньше.

Объяснение реального механизма сдвиговых процессов дает теория **дислокаций** – особого рода линейных несовершенств (дефектов) кристаллической решетки. Представления о дислокациях были введены в металлофизику для того, чтобы объяснить несоответствие между наблюдаемой и теоретической прочностью кристаллов и описать механизм скольжения атомных слоёв при пластической деформации кристаллов. Если на первых этапах развития этой теории представления о дислокациях были предположительными, то затем были получены прямые доказательства их существования, а в настоящее время имеются многочисленные данные наблюдения дислокаций.

Наиболее простой и наглядный способ образования дислокаций в кристалле – сдвиг (рисунок 2, а). Если сдвиг произошел только в части плоскости скольжения и охватывает площадку $ABCD$, то граница AB между участком, где скольжение уже произошло, и ненарушенным участком в плоскости скольжения и будет дислокацией. Атомная плоскость, перпендикулярная к плоскости скольжения и проходящая через AB , является как бы лишней и ее называют **экстраплоскостью**, а дислокацию AB – **краевой дислокацией**, обозначаемой знаком \perp .

Возможны и другие виды дислокаций, например, **винтовая** (рисунок 3, а) или **смешанная** (рисунок 4, а). Винтовая дислокация получила свое название из-за того, что кристалл при этом можно считать состоящим из одной атомной плоскости, закрученной по винтовой поверхности вокруг дислокации AB (рисунок 3, а).

Нетрудно увидеть, что движение дислокаций через кристалл вызывает пластическую (необратимую) деформацию кристалла (рисунок 2–4, б, в, г). Перемещение дислокаций происходит по схеме, изображенной на рисунке 5.

Из схемы видно, что для **перемещения** дислокации на одно межатомное расстояние каждый атом экстраплоскости и плоскости в нижней части кристалла **смещается** на величину значительно меньше межатомного расстояния. При поочередном (эстафетном) смещении атомов дислокация скользит на большие расстояния, через весь кристалл, вызывая его пластическую деформацию.

При сдвиге одной части идеального кристалла относительно другой необходимо разорвать **одновременно сразу все** межатомные связи между граничными атомами по обе стороны от плоскости скольжения (рисунок 1), а в реальном металле при **перемещении дислокации** по плоскости скольжения раз-

рываются **одновременно** межатомные связи **только между двумя соседними цепочками атомов** (рисунок 5). Именно этим объясняется более низкие значения сдвигающего напряжения и прочности у реальных металлов.

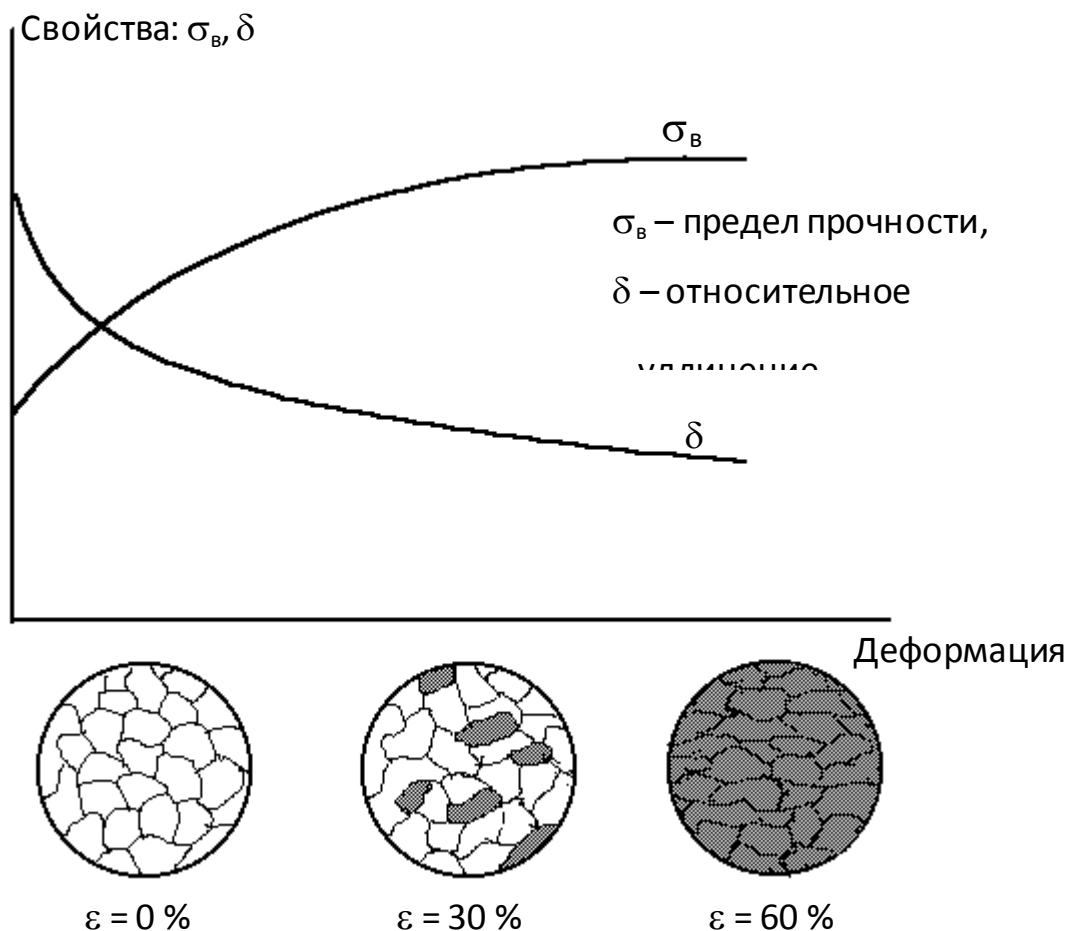


Рисунок 6 – Изменение структуры и свойств деформированного металла в зависимости от степени деформации

Интересно, что и в живой природе используется дислокационный принцип движения, например, змеи и гусеницы обычно ползают за счет образования складки («положительной дислокации») около хвоста и продвижения этой складки в сторону головы.

2. Наклеп и рекристаллизация металлов

Наиболее впечатляющим свойством металлов при пластической деформации является деформационное упрочнение, или способность металлов становиться прочнее при деформации. Из дислокационной теории следует, что для упрочнения металлов необходимо каким-либо образом затруднить движение дислокаций.

Существует несколько способов упрочнения или закрепления дислокаций, одним из них является упрочнение кристалла пластической деформацией. Ранее рассмотренный простейший способ введения дислокаций в кристалл при сдвиге показывает, что рост пластической деформации увеличивает количество дислокаций в кристалле. Чем сильнее воздействие на металл, тем больше в нем

образуется дислокаций. На начальной стадии деформация происходит за счет скольжения относительно небольшого количества дислокаций. В процессе деформирования количество движущихся в кристалле дислокаций постоянно увеличивается, что затрудняет их скольжение. Возникают скопления дислокаций, которые уже неспособны перемещаться по кристаллу. Такие закрепленные дислокации затрудняют движение вновь возникающих дислокаций, т. е. упрочнение металла создается самими дислокациями. В этом случае говорят об упрочнении пластической деформацией или просто о **наклепе** металла.

Пластическая деформация оказывает существенное влияние на механические свойства металла и его структуру (рисунок 7).

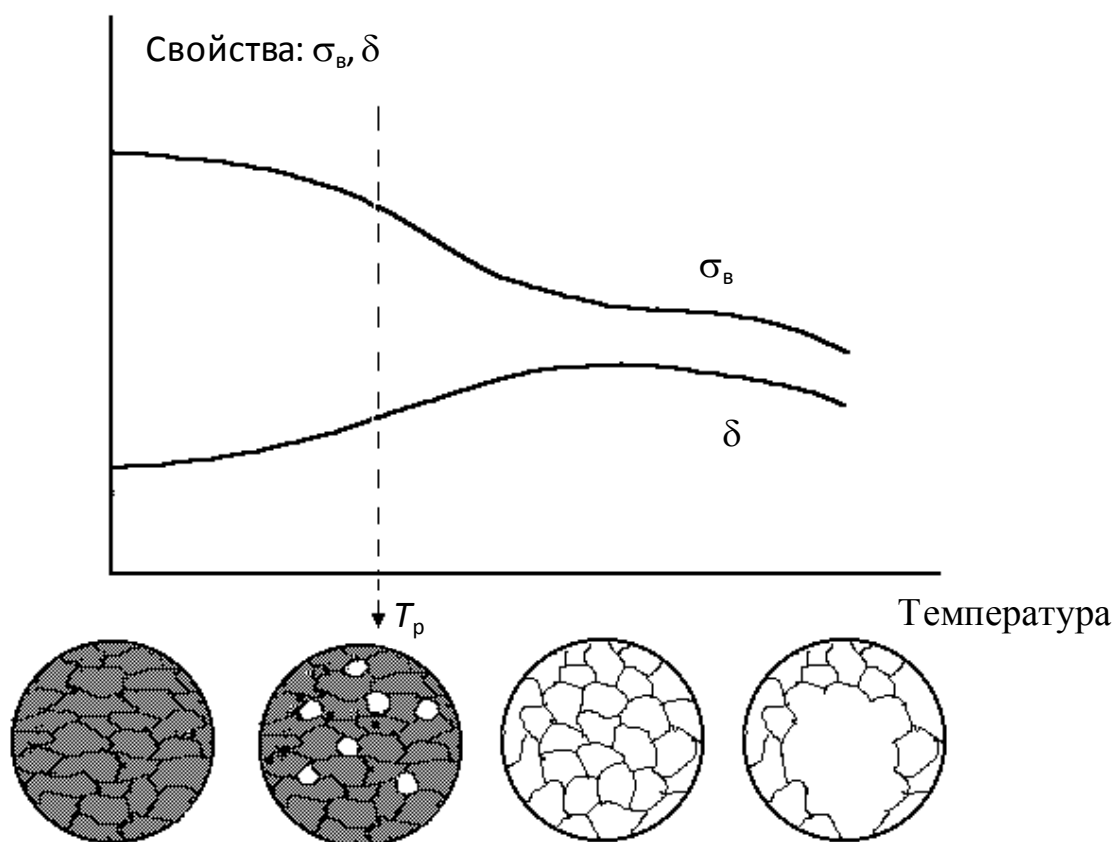


Рисунок 7 – Изменение структуры и свойств деформированного металла при нагреве

На рисунке 6 показано, как под действием приложенной нагрузки зерна, из которых состоят все технические металлы, начинают деформироваться и вытягиваться; объем зерен и их количество при этом не изменяется. Внутри каждого зерна, особенно по его границам, сосредотачивается большое количество дислокаций, плотность которых возрастает от $10^6 - 10^7 \text{ см}^{-2}$ (для недеформированного металла) и до $10^{10} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (для деформированного). Кристаллическая решетка зерен становится искаженной (несовершенной), это состояние является структурно неустойчивым. С увеличением степени деформации прочность металла увеличивается, а пластичность уменьшается, что может привести к возникновению трещин и разрушению (при большой степени деформации).

Для снятия наклепа деформированный металл нагревают, в результате сначала происходят процессы *возврата* и *полигонизации*, приводящие к перераспределению и уменьшению концентрации структурных несовершенств (точечных и линейных дефектов) в кристаллической решетке. При дальнейшем повышении температуры начинается основной процесс, возвращающий наклепанный металл в устойчивое состояние – **рекристаллизация**. Это полная или частичная замена деформированных зерен данной фазы новыми, более совершенными зернами той же фазы (рисунок 7). Новые зерна, зарождающиеся при рекристаллизации, отличаются меньшей плотностью дефектов (дислокаций) и растут за счет деформированных зерен. Рекристаллизация – диффузионный процесс, протекающий в течение какого-то времени (чем выше температура, тем быстрее).

Наименьшую температуру, при которой начинается процесс рекристаллизации и происходит разупрочнение, называют **температурой рекристаллизации**. Между температурой рекристаллизации (T_p) и температурой плавления ($T_{пл}$) металлов существует простая зависимость, определенная металлостроителем А. А. Бочваром:

$$T_p = \alpha \cdot T_{пл} \text{ (К).}$$

Ниже приведена температура рекристаллизации металлов и сплавов:

$$T_p = (0,1 \div 0,2) \cdot T_{пл} \text{ – для чистых металлов,}$$

$$T_p = 0,4 \cdot T_{пл} \text{ – для технически чистых металлов,}$$

$$T_p = (0,5 \div 0,6) \cdot T_{пл} \text{ – для сплавов (твердых растворов).}$$

Температуру начала рекристаллизации определяют металлографическим и рентгеноструктурными методами, а также по изменению свойств. Если T_p определяют по изменению твердости, то за T_p принимают температуру, при которой прирост твердости, созданный деформацией, уменьшается вдвое (рисунок 8).

Твердость НВ

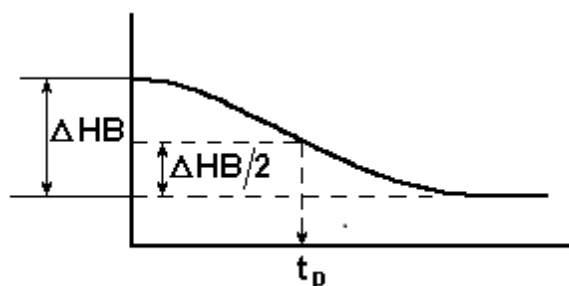


Рисунок 8. Определение температуры рекристаллизации по изменению твердости при нагреве

Определение температуры рекристаллизации необходимо для назначения режимов **рекристаллизационного отжига** – термической обработки для снятия наклепа. Температура такого отжига должна быть выше температуры рекристаллизации для данного сплава.

Величина зерен после рекристаллизации (рекристаллизационного отжига) напрямую зависит от степени деформации металла при наклепе (рисунок 9).

Существует небольшая степень деформации (до 10 %), называемая **критической**, при которой размер образующегося при рекристаллизации зерна в несколько десятков раз превышает исходное, недеформированное зерно. Это явление очень часто встречается в деталях машин, в которых одновременно присутствует набор деформаций от 0 до больших степеней, и его следует учитывать, так как на участках с крупнозернистой структурой сильно снижается ударная вязкость. Хотя в некоторых других случаях, например, повышение жаропрочности, получение требуемых электромагнитных свойств, увеличение размера зерна является положительным.

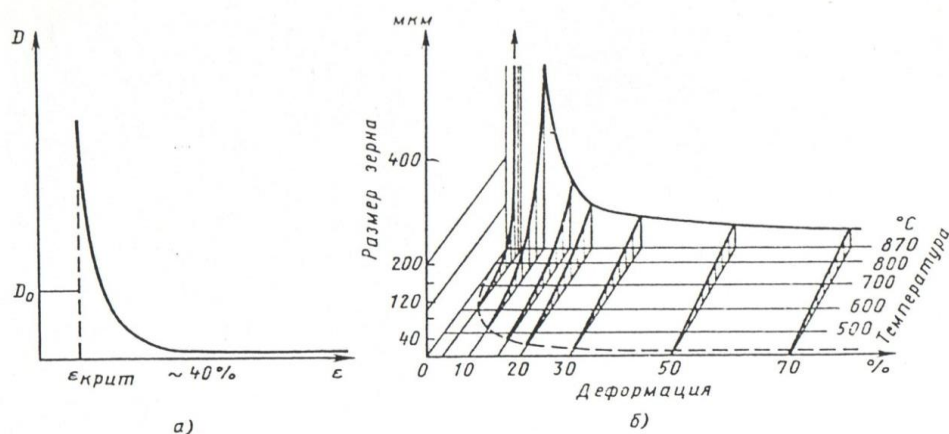


Рисунок 9 – Зависимость размера зерна рекристаллизованного металла от деформации (а) и диаграмма рекристаллизации технически чистого железа (б):

D_0 – размер зерна; ϵ крит. – критическая степень деформации.

1. Оборудование и материалы, используемые в работе.
2. Основные положения по деформации, наклепу и рекристаллизации металлов (кратко).
3. Описание экспериментальной части работы и полученные результаты с необходимым графическим материалом, анализом, выводами.
4. Обоснованное решение указанной преподавателем задачи.

Вопросы для самопроверки

1. Чем характеризуется упругая деформация?
2. В чем различие между упругой и пластической деформациями?
3. Каким путем осуществляется пластическая деформация?
4. Какие напряжения вызывают пластическую деформацию?
5. Как влияет степень деформации на свойства металлов и сплавов?
6. Как изменяется плотность дислокаций при пластической деформации?
7. Как влияет плотность дислокаций на прочность металла?
8. Как изменяется структура металла при холодной деформации и как это

влияет на свойства деформированного металла?

9. В чем сущность наклепа, и какое он имеет практическое значение?

10. Как изменяются свойства деформированного металла при нагреве?

11. В чем сущность процесса возврата?

12. Что такое полигонизация?

13. В чем сущность процессов первичной и собирательной рекристаллизации?

14) Как влияет состав сплава и степень пластической деформации на температуру рекристаллизации?

15. От чего зависит величина зерна рекристаллизованного металла?

16. Что такое критическая степень деформации?

17. В чем различие между холодной и горячей пластическими деформациями?

18. Для какой цели применяется рекристаллизационный отжиг?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЗЕРНА В СТАЛИ

Цель работы: получить практические умения и навыки в освоении методов определения величины зерна и установлении зависимости свойств стали от величины зерна.

Оборудование, приборы, материалы

- металлографические микроскопы МИМ-7;
- объект – микрометр, окуляр микрометр;
- набор микрошлифов с различной величиной зерна стали;
- шкала для определения величины зерна (увеличение $\times 100$).

Методические указания по выполнению работы

1. Определение величины зерна методом сравнения.

а) Микрошлифы стали рассмотреть под микроскопом при увеличении $\times 100$.

б) Зарисовать микроструктуры шлифов.

в) Сравнить зерна со стандартной шкалой величины зерна стали (рисунок 1).

Размер зерна оценивается номером (баллом) соответствующего эталонного изображения зерен.

Зерна с номерами 1–5 считаются крупными, а с более высокими номерами – мелкими. Стандартная шкала построена на основе соотношения:

$n = 8 \cdot 2^{\text{№}}$, где n – количество зерен на 1 мм^2 площади микрошлифа;

№ – номер зерна.

г) Вычислить n для каждого номера зерна и по формулам рассчитать $F_{\text{ср}}$ и $d_{\text{ср}}$, принимая форму зерен за шаровидную:

$$F_{\text{ср}} = 1/n_{\text{ср}}; \quad d_{\text{ср}} = 2\sqrt{\pi \cdot n_{\text{ср}}}.$$

д) При наличии одновременно зерен двух номеров величину зерна обозначают двумя номерами, указывая (ориентировочно), какую площадь в процентах занимают те и другие зерна, например, № 5 – 25 %, № 6 – 75 %. Если один из размеров занимает площадь менее 10 %, то такие зерна обозначают одним номером.

2. Определение величины зерна по среднему условному диаметру зерна.

а) Определить цену деления окуляр – микрометра.

В отверстие визуального тубуса вставить окуляр-микрометр. Подобрать объектив, чтобы увеличение микроскопа было $\times 100$.

На предметный столик поместить объект-микрометр. Наблюдая в окуляр, вращением макрометрического и микроскопического винтов привести на фокус шкалу объект – микрометра; перемещением оправы главной линзы окуляра по-

лучить резкое изображение шкалы окуляр – микрометра.

Вращением окуляра совместить шкалу окуляра-микрометра со шкалой объект – микрометра, установив параллельно штрихи обеих шкал (рисунок 2).

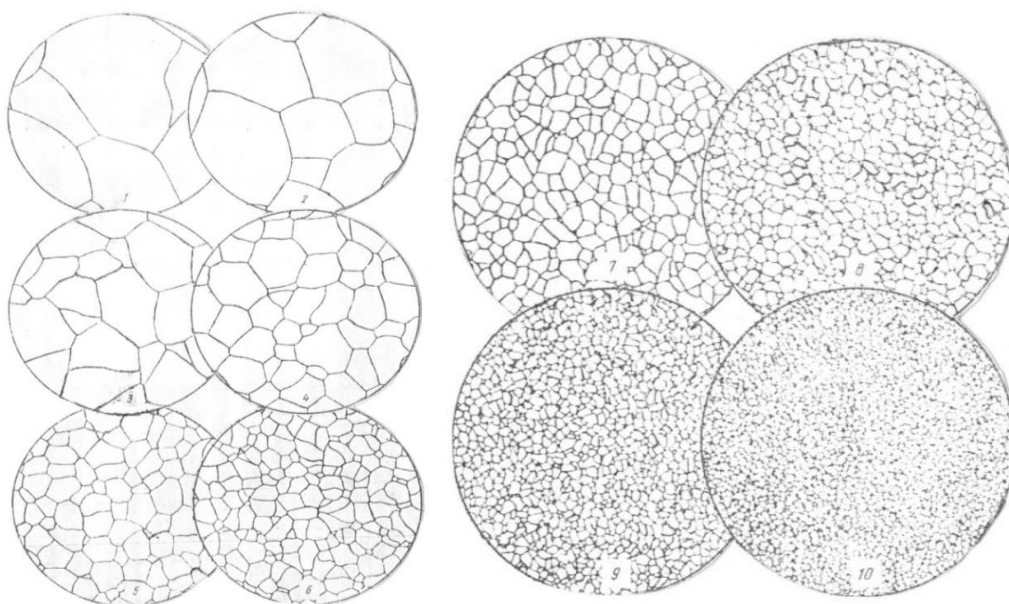


Рисунок 1 – Шкала определения величины зерна, увеличение x 100

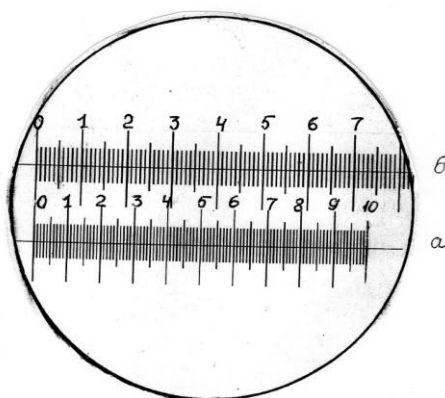


Рисунок 2 – Совмещение в поле зрения микроскопа шкал
(а) объект – микрометра и (б) окуляр – микрометра

Подсчитать, какое число целых делений окуляр – микрометра совпадает с определенным числом делений шкалы объект – микрометра.

Определить цену деления шкалы окуляр – микрометра.

$$C_{\text{ОК}} = \frac{C_{\text{ОБ}} \cdot N_{\text{ОБ}}}{N_{\text{ОК}}}, \text{ мм}$$

где $C_{\text{ОБ}}$ – цена деления шкалы объект – микрометра, равная 0,01 мм; $N_{\text{ОБ}}$ – число совмещенных делений объект – микрометра; $N_{\text{ОК}}$ – число совмещенных де-

лений окуляр – микрометра.

б) Рассмотреть микрошлиф в микроскоп, подсчитать, сколько зерен приходится на определенное число делений окуляр – микрометра (шкалу окуляр – микрометра располагают при этом горизонтально).

в) Подсчитать размер зерна в горизонтальном направлении

$$l_{гор} = \frac{N_{ок} \cdot Ц_{ок}}{K}, \text{ мм}$$

где $N_{ок}$ – число делений шкалы окуляр-микрометра; $Ц_{ок}$ – цена деления шкалы окуляр – микрометра; K – количество зерен, приходящихся на N делений шкалы окуляр-микрометра.

г) Вращением окуляра переместить шкалу в вертикальное положение и подсчитать, сколько зерен приходится на определенное число делений шкалы окуляр – микрометра.

Подсчитать размер зерна в вертикальном направлении.

$$l_{верт} = \frac{N_{ок} \cdot Ц_{ок}}{K}, \text{ мм}$$

д) Определить средний размер зерна

$$l_{cp} = \frac{l_{гор} + l_{верт}}{2}, \text{ мм}$$

е) Определить площадь зерна F , считая, что полученный средний размер зерна l_{cp} равен среднему диаметру зерна d_{cp}

$$F = \frac{\pi \cdot d_{cp}^2}{4}, \text{ мм}^2$$

ж) По полученной площади в мм^2 , определить номер зерна пользуясь данными таблица 1.

Таблица 1 - Геометрические параметры зерен разных размеров по ГОСТ 5639-82

Номер зерна	Средняя площадь сечения зерна F , мм^2	Среднее число зерен на площади 1 мм^2	Среднее число зерен N_v , в 1 мм^3	Средний диаметр зерна d_{cp} , мм	Средний условный диаметр зерна d_L , мм
1	2	3	4	5	6
-3	1	1	1	1,0	0,875
-2	0,5	2	2,8	0,707	0,650
-1	0,25	4	8	0,5	0,444
1	2	3	4	5	6
0	0,125	8	22,6	0,353	0,313
1	0,0625	16	64	0,250	0,222
2	0,0612	32	181	0,177	0,157
3	0,0156	64	512	0,125	0,111
4	0,00781	128	1448	0,088	0,0783
5	0,00390	256	4096	0,062	0,0553
6	0,00195	512	11585	0,044	0,0391

1	2	3	4	5	6
7	0,00098	1 024	32768	0,031	0,0267
8	0,00049	2 048	92682	0,022	0,0196
9	0,000244	4 096	262144	0,015	0,0138
10	0,000122	8 192	741485	0,011	0,0099
11	0,000061	16 384	2097152	0,0079	0,0069
12	0,000031	32 768	5931008	0,0056	0,0049
13	0,000015	65 536	6777216	0,0039	0,0032
14	0,000008	131 072	47449064	0,0027	0,0027

Задание

- определить величину зерна визуально (по предлагаемой шкале);
- рассмотреть предоставленные микрошлифы с различной величиной зерна при увеличении микроскопа $\times 100$.

Краткие теоретические сведения

Методы количественной металлографии необходимы для характеристики многих важных особенностей структуры: размера включений или зерен отдельных фаз, присутствующих в сплаве, и особенно размера зерна основной фазы; количества включений разных фаз сплава.

Металлы, в том числе сталь, как тела поликристаллические, состоят из зерен. Размеры зерна стали определяются характером и технологией ее производства (условиями плавки, температурой и скоростью разливки, охлаждением в форме и т. д.), а также, различными видами последующих обработок: горячая деформация (прокат) и термообработка.

Одной из важнейших структурных и технологических характеристик углеродистых и легированных сталей, претерпевающих при нагревании превращение в аустенит, является размер зерна аустенита. Различают начальное, наследственное (или природное) и действительное зерно аустенита.

Зерно аустенита, образовавшееся по завершении фазовой перекристаллизации доэвтектоидных сталей в точке A_{c3} , а эвтектоидных и аэвтектоидных сталей в точке A_{c1} , называется начальным зерном аустенита (d_n , рисунок 1). Так как кристаллы аустенита зарождаются преимущественно на межфазных поверхностях феррита и цементита и на границах исходных зерен ($d_{исх}$, рисунок 1), то чем дисперснее феррито-цементитная смесь и мельче исходные зерна феррита и перлита, тем мельче начальное зерно аустенита. Обычно его диаметр не превышает $10 - 20 \mu\text{м}$ и дополнительно уменьшается при увеличении скорости нагрева.

Дальнейшее нагревание сталей выше критических точек A_{c3} и A_{c1} и (в меньшей мере) увеличение времени выдержки при этих температурах приводит к росту начальных мелких зерен аустенита вследствие собирательной рекристаллизации. Для характеристики скорости их роста вводится понятие наследственного зерна аустенита. Стали, в которых зерно аустенита начинает быстро расти уже при незначительном превышении критических точек, назы-

ваются наследственно крупнозернистыми (НКЗ) – углеродистые стали (рисунок 3, линия 1). Стали, в которых зерна аустенита остаются мелкими до высоких температур (950–1000 °С), значительно превышающих критические точки, называются наследственно мелкозернистыми (НМЗ) – легированные стали (рисунок 3, линия 2).

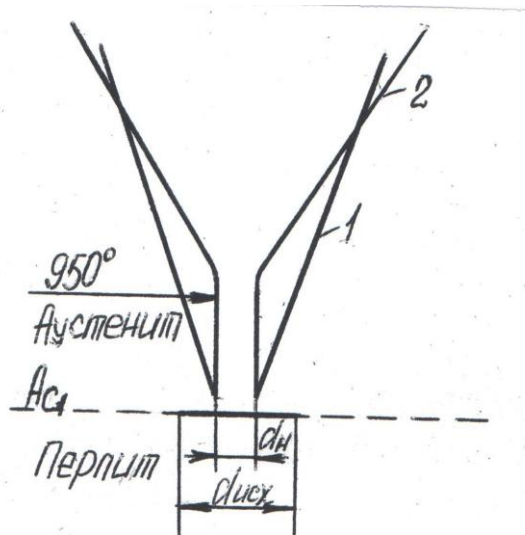


Рисунок 3 – Увеличение размера зерна аустенита стали У8 при нагревании от точки A_{c1} : 1 – наследственно крупнозернистая сталь; 2 – наследственно мелкозернистая сталь; $d_{исх}$ – диаметр исходного зерна перлита; $d_н$ – диаметр начального зерна аустенита.

Скорость роста зерен аустенита зависит от химического состава и технологической предыстории (наследственности) стали. Так, стали раскисленные Mn (кипящие) являются НКЗ. Дополнительное раскисление алюминием (спокойные стали) делает их НМЗ, так как образующиеся дисперсные оксиды и нитриды алюминия, располагаясь по границам зерен аустенита, препятствуют их росту (перемещению границ) вплоть до высоких температур. Однако, начиная с температур 1000–1050 °С, эти химические соединения коагулируют или растворяются в γ – твердом растворе аустенита и перестают оказывать свое сдерживающее влияние: зерна аустенита в НМЗ стали могут даже стать крупнее, чем в НКЗ стали. Аналогичен механизм тормозящего влияния (барьерная функция) на рост зерен аустенита тех легирующих элементов (Nb, Ti, Zr, V и в меньшей степени W, Mo, Cr), которые образуют стабильные при высоких температурах карбиды, нитриды, карбонитриды.

В литой стали зерна аустенита менее склонны к укрупнению при нагреве, чем в горячедеформированной, так как в последней карбиды, карбонитриды, нитриды, оксиды в процессе горячей пластической деформации перераспределяются с границ зерен и частично коагулируют, и растворяются.

Экспериментально установлено, что Mn, Si, В и Р увеличивают скорость роста аустенитных зерен.

Наследственное зерно в значительной степени определяет температурные режимы горячей обработки. Так как НМЗ стали устойчивы к перегреву, то они

могут нагреваться при термической обработке в более широком диапазоне температур и обрабатываться давлением при более высоких температурах, чем в НКЗ стали.

Фактическое зерно аустенита, образовавшееся при данных температурно-временных условиях обработки стали, обеспечивающее величину зерна в готовых изделиях, называется действительным зерном. Именно оно оказывает влияние на свойства стали. Так, стали с крупным действительным зерном аустенита прокаливаются на большую глубину; более склонны к короблению и образованию трещин от внутренних напряжений при термической обработке, литье, сварке; при их ускоренном охлаждении может возникнуть видманштеттова структура с низким уровнем ударной вязкости.

Мелкозернистые стали имеют более высокую прочность, пластичность, ударную вязкость, более низкую критическую температуру хрупкости и меньшую чувствительность к концентраторам напряжений. Большинство деталей машин работает в сложных условиях, воспринимая одновременно нагрузки на изгиб, кручение, растяжение и другие знакопеременные нагрузки. Для таких деталей необходимо применять мелкозернистую сталь.

Протяжки из мелкозернистой стали менее склонны к поводке и короблению при закалке, чем протяжки из крупнозернистой стали. Для изготовления же крупных сверл (диаметром 20 мм и выше) применяют крупнозернистую углеродистую сталь, так как в сверлах требуется сквозная прокаливаемость; повышается обрабатываемость режущим инструментом.

Штампующесть стали также зависит от величины зерна (лучшие результаты дает 6–8 баллов). При крупном зерне получается шероховатая поверхность, что способствует изнашиванию штампа, при мелком – возникает пружинящий эффект, так как повышается вязкость стали.

При крупном зерне повышается жаропрочность, общая коррозионная стойкость, магнитная проницаемость. Динамная и трансформаторная стали имеют наилучшие магнитные свойства при крупнозернистом строении, так как в мелкозернистой стали увеличиваются потери на гистерезис.

Приведенные примеры говорят о значении величины зерна в технологии производства, обработке и эксплуатации стали.

Для выявления границ зерен стали используют чаще всего методы окисления (для углеродистых и легированных сталей – конструкционных и инструментальных) или цементации (для низкоуглеродистых сталей). Стали нагревают и выдерживают при температуре 930 °С в окисленной или науглероживающей среде. Размер зерна аустенита определяют после охлаждения металлографическим анализом по сетке окислов или сетке вторичного цементита, которые образуются по границам бывших зерен аустенита.

Используют также методы сетки перлита, травления.

Оформление отчета

- кратко законспектировать теоретическую часть;
- зарисовать микроструктуры набора шлифов сталей;

- определить величину зерен на микрошлифах методом сравнения;
- определить величину зерен, микрошлифов стали по среднему условному диаметру зерна d_{CP} ;
- расчетные данные записать в таблице 2.

Таблица 2 – Определение величины зерна стали

Номер шлифа	$l_{ГОР}$, мм	$l_{ВЕРТ}$, мм	l_{CP} , мм	F_{CP} , мм ²	Номер зерна

Вопросы для самопроверки

1. Факторы, влияющие на величину зерна.
2. Какая сталь называется наследственно мелкозернистой (НМЗ)? Ее особенности.
3. Какая сталь называется наследственно крупнозернистой (НКЗ)? Ее особенности.
4. Что такое действительное зерно?
5. Как влияет величина зерна на технологические и физические свойства стали?
6. Влияние величины зерна на механические свойства стали.
7. Какими методами можно выявить границы зерен?
8. Приведите методику определения величины зерна.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

МИКРОАНАЛИЗ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ

Цель работы: получить навыки в определении микроструктуры углеродистых сталей, чугунов и графитизированных чугунов

Методические указания по выполнению работы

1. С помощью металлографического микроскопа исследовать структуру углеродистых сталей с различным содержанием углерода, чугунов и графитизированных чугунов.

Задание

- зарисовать микроструктуры доэвтектоидных, эвтектоидных и заэвтектоидных сталей, доэвтектического, эвтектического, заэвтектического белого чугуна и графитизированных чугунов;
- определить влияние процента углерода на механические свойства стали.

Материалы и оборудование для выполнения работы

1. Металлографические микроскопы.
2. Коллекция шлифов сталей.
3. Альбом фотографий микроструктур углеродистых сталей.
4. Тренажер «Диграмма Fe – Fe₃C».

Порядок выполнения работы

1. Изучить содержание основных положений работы.
2. Разобраться с помощью тренажера со стальной частью диаграммы Fe – Fe₃C.
3. Получить навыки определения под микроскопом элементов структуры стали: феррита, цементита, перлита, для чего:
 - а) рассмотреть фотографии микроструктур в альбоме;
 - б) рассмотреть под микроскопом подобранные шлифы для изучения структурных составляющих и зарисовать схемы рассмотренных структур.
4. Изучить микроструктуру трех-четырёх образцов, относящихся к различным классам стали (доэвтектоидные, эвтектоидные, заэвтектоидные), определить к какому из названных классов относится каждый образец. Зарисовать схему микроструктуры рассмотренных образцов и обозначить на рисунках структурные составляющие.
5. В образце доэвтектоидной стали определить содержание углерода в процентах.
6. Определить форму графита в графитизированных чугунах.

Компоненты сплавов железа с углеродом

Железо – металл сероватого цвета. Температура плавления 1539 °С. Железо имеет две полиморфные модификации: α, γ и δ. Модификация α существу-

ет при температурах ниже 911 °С. Кристаллическая решетка α -железа – объемно-центрированный куб (ОЦК). Плотность α – железа 7,68 Мг/м³. Вторая модификация – γ -железо (Fe γ) – существует при температуре 911–1392 °С. Кристаллическая решетка – гранецентрированная кубическая (ГЦК). В интервале 1392–1539 °С существует δ -железо с кристаллической решеткой объемно-центрированного куба (ОЦК).

Углерод – принадлежит к II группе периодической системы Менделеева. Атомный номер 6, атомная масса 12.

Углерод встречается в природе в виде двух основных модификаций: графита и алмаза. Графит имеет гексагональную слоистую кристаллическую решетку, плотностью 2,25 г/см³, температура плавления 3500 °С. Графит мягкий материал, обладающий низкой прочностью $\sigma_B=20$ МПа (при 20 °С), а при 2500 °С графит прочнее всех тугоплавких металлов. Графит электропроводен, химически стоек.

Фазы и структурные составляющие сплавов

Феррит (Ф) – твердый раствор внедрения углерода и других примесей в α -железе с ОЦК решеткой. Атом углерода располагается в решетке феррита в центре грани куба, где помещается сфера радиусом 0,031 нм, а также в дефектах кристаллической решетки. Предельная растворимость углерода в α -феррите 0,02 % при температуре 727 °С и менее 0,006 % при комнатной температуре, растворимость в δ -феррите – 0,1 %. Под микроскопом феррит выявляется в виде однородных полиэдрических (многогранных) зерен. Твердость и прочность феррита невысоки ($\sigma_B=250$ МПа, НВ =800 МПа, $\delta=50$ %).

Аустенит (А) – твердый раствор внедрения углерода и других примесей в γ -железе. Предельная растворимость углерода в γ -железе – 2,0 % при температуре 1147 °С и 0,8 % при 727 °С. Полиэдрическая структура с более высокой твердостью НВ=1700–2000 МПа, более прочен и менее пластичен, чем феррит.

Цементит (Ц) – химическое соединение железа с углеродом – карбид железа Fe₃C, содержащий 6,67 % С. Цементит имеет сложную ромбическую решетку с плотной упаковкой атомов. Температура плавления цементита точно не определена (около 1260 °С). К характерным особенностям цементита относятся высокая твердость (8000 МПа) и очень малая пластичность (δ около 0 %).

Перлит (П) – эвтектоид, т. е. механическая смесь феррита и цементита, полученная при охлаждении аустенита, содержащего 0,8 % С. Перлит бывает пластинчатым (НВ = 2000–2200 МПа) и зернистым (НВ = 1600–1800 МПа).

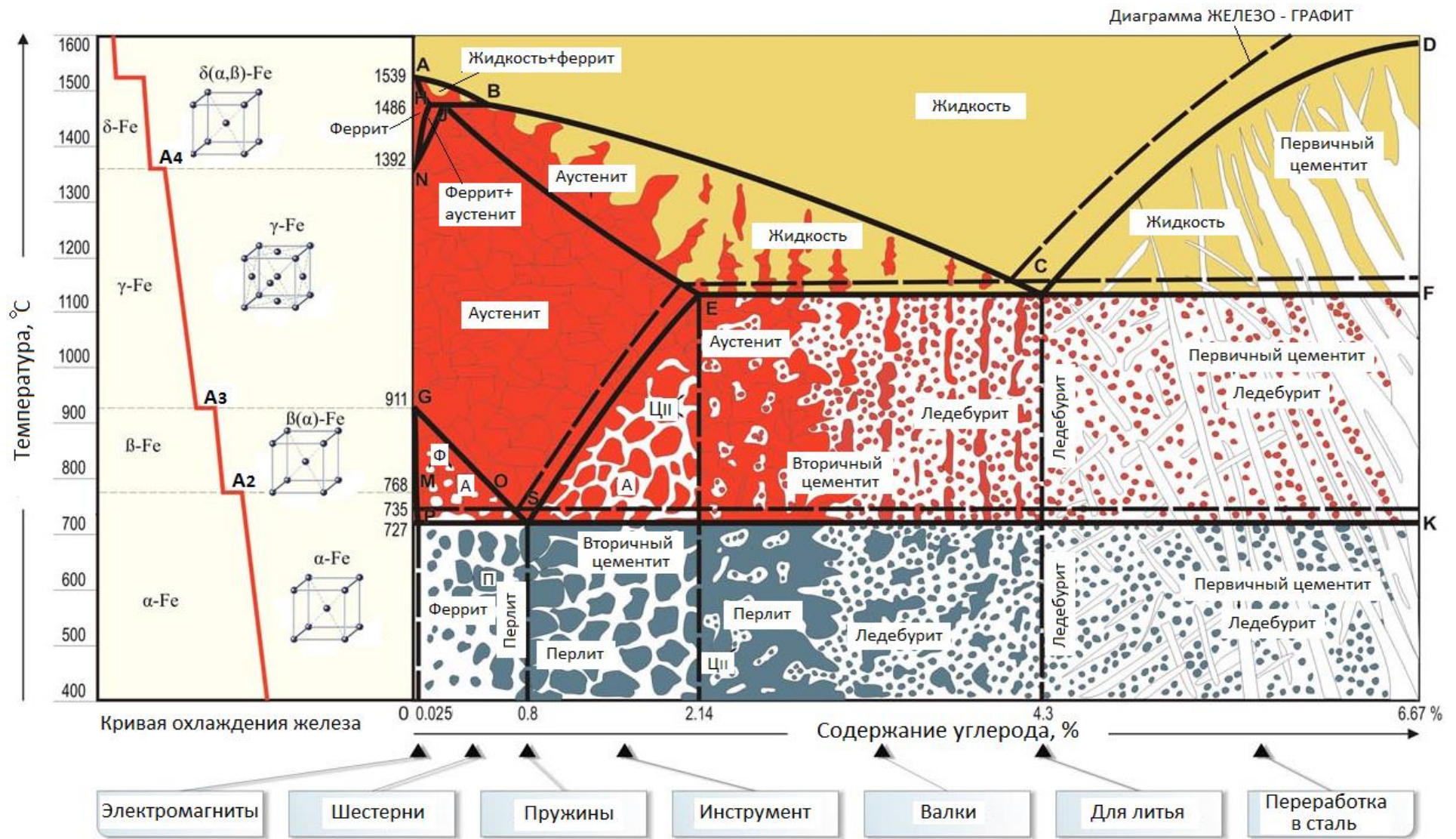


Рисунок 1 – Диаграмма состояния сплавов системы «железо–цементит»

Ледебурит (Л) – эвтектика, т. е. смесь аустенита и цементита, полученная при охлаждении жидкого расплава при температуре 1147 °С, содержащая 4,3 % С. При температуре 727 °С ледебурит состоит из смеси перлита и цементита. Ледебурит имеет высокую твердость 550 НВ.

Диаграмма состояния системы железо-углерод

Наличие двух высокоуглеродистых фаз (графита и цементита) приводит к появлению двух диаграмм состояния: метастабильной – железо-цементит и стабильной – железо-графит. Свободная энергия цементита всегда больше, чем свободная энергия графита.

Диаграмма состояния железо-цементит приведена на рисунке 1.

Линии диаграммы: ABCBD (линия ликвидус – место точек начала кристаллизации) и ANJESF (линия солидус – место точек конца кристаллизации) характеризуют начало и конец первичной кристаллизации, происходящей при затвердевании жидкой фазы. Линии ES и PQ показывают предельную растворимость углерода соответственно в аустените и феррите. При понижении температуры растворимость уменьшается, и избыток углерода выделяется в виде цементита.

Цементит, выделяющийся из жидкого сплава, принято называть первичным, из аустенита – вторичным, из феррита – третичным.

Три горизонтальные линии HJB, ECF и PSK указывают на протекание трех превращений при постоянной температуре. При 1499 °С (горизонталь HJB) происходит перитектическая реакция $L_B + \Phi \rightarrow A_J$. В результате реакции образуется аустенит.

При 1147 °С (горизонталь ECF) протекает эвтектическая реакция $L_C \rightarrow A_E + \Psi$ (жидкость, состав которой соответствует точке С, превращается в эвтектическую смесь аустенита, состав которого соответствует точке Е, и цементита, называемую ледебуритом).

При 727 °С (горизонталь PSK) протекает эвтектоидная реакция $A_S \rightarrow \Phi_P + \Psi$ (в отличие от эвтектики, образующейся из жидкости, эвтектоид возникает из твердых фаз). Продукт превращения – эвтектоидная смесь феррита и цементита, называемая перлитом. Сплавы железа с углеродом, содержащие до 0,02 % С, называют техническим железом.

Сплавы железа с углеродом при содержании углерода от 0,02 до 2,0 % носят название сталей (от 0,02 до 0,8 % – доэвтектоидные, 0,8 % – эвтектоидные, от 0,8 до 2,0 % – заэвтектоидные).

Сплавы железа с углеродом, содержащие от 2,0 до 6,67 % С, называются чугунами (от 2,0 до 4,3 % С – доэвтектические, 4,3 % – эвтектические, от 4,3 до 6,67 % С – заэвтектические).

Углеродистые стали

Стали – сплавы железа с углеродом с содержанием углерода до 2,0 %.

Влияние углерода на свойства сталей.

Углерод – второй основной элемент, оказывающий определяющее влияние на свойства и структуру стали. Увеличение содержания углерода в стали до 0,8 % приводит к повышению прочностных свойств, твердости и снижению пластичности.

Свойства сталей в равновесном состоянии при различном содержании углерода показаны на рисунке 2.

Углерод, снижая ударную вязкость КСУ, заметно повышает верхний порог хладноломкости T_{50} . Углерод изменяет и технологические свойства стали. При его увеличении снижается способность стали деформироваться в горячем и особенно холодном состоянии, затрудняется свариваемость.

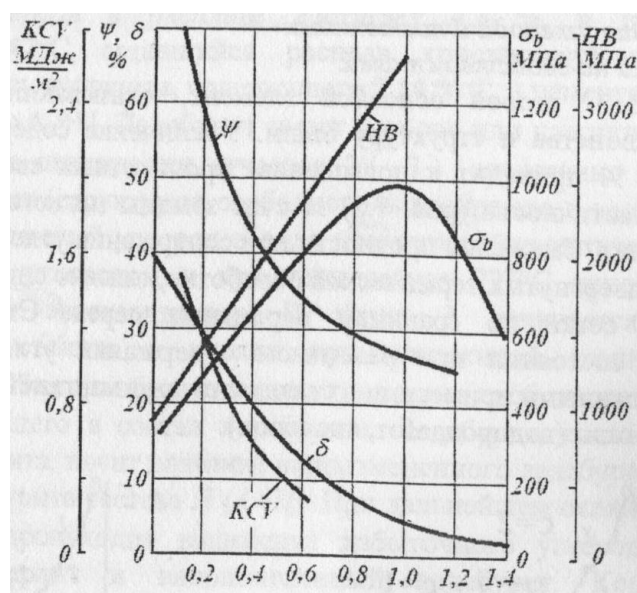


Рисунок 2 – Влияние углерода на механические свойства сталей:

σ_B – временное сопротивление разрыву; НВ – твердость по Бринеллю; КСУ – ударная вязкость (характеристика надежности); δ – относительное удлинение; ψ – относительное сужение

Влияние постоянных и вредных примесей

Постоянными примесями в сталях считаются марганец, кремний, которые вводятся при раскислении сталей.

Марганец вводится в сталь для раскисления (удаления кислорода) и устранения вредного влияния сернистых соединений железа. Марганец повышает прочность горячекатаной стали. Содержание марганца в стали 0,3–0,8 %.

Кремний (полезная примесь) раскисляет сталь и сохраняется в ней до 0,4 %, оказывая упрочняющее действие на феррит.

Фосфор – вредная примесь, содержащаяся в рудах железа и топливе. Растворяясь в феррите, фосфор вызывает хладоломкость стали, т. е. хрупкость при низких температурах.

Сера – вредная примесь, попадающая в металл из руды и топлива и вызывающая красноломкость – хрупкость при 800 °С и выше, что препятствует горячей обработке давлением.

Водород, азот, кислород могут растворяться в металле или образовывать неметаллические включения (нитриды, оксиды). И в том, и в другом случае стали охрупчиваются.

Классификация углеродистых сталей:

– по химическому составу и структуре:

а) техническое железо (содержит углерода до 0,02 %), структура – феррит (рисунок 3);

б) доэвтектоидные стали (0,02 до 0,8 % C), структура: феррит + перлит (рисунок 4);

в) эвтектоидные (0,8 % C), структура – перлит (рисунок 5);

г) заэвтектоидные стали ($C > 0,8 \%$), структура: перлит + цементит вторичный (рисунок 6)



Рисунок 3 – Микроструктура технического железа

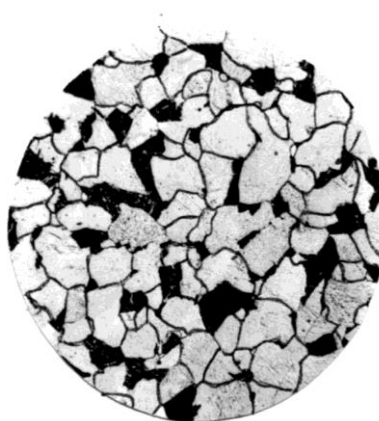


Рисунок 4 – Микроструктура доэвтектоидной стали: феррит (светлый) и перлит



Рисунок 5 – Микроструктура эвтектоидной стали: перлит пластинчатый (а) и перлит зернистый (б)

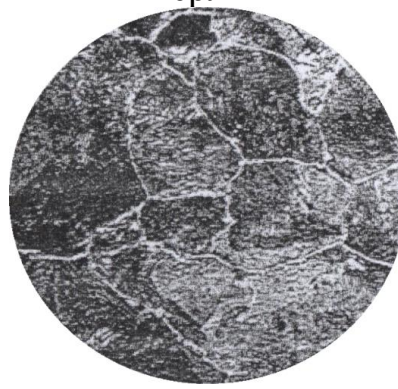


Рисунок 6 – Микроструктура заэвтектоидной стали: перлит и сетка цементита (светлая)

– по содержанию углерода:

- а) низкоуглеродистые ($C \leq 0,25 \%$);
- б) среднеуглеродистые ($0,3-0,55 \%$ C);
- в) высокоуглеродистые ($C \geq 0,6 \%$)

– по качеству:

- а) стали обыкновенного качества (S до 0,055 %, P до 0,045 %);
- б) качественные (S \leq 0,04 %, P \leq 0,035 %);
- в) высококачественные (S до 0,025 %, P до 0,025 %)

– по степени раскисления и характеру затвердевания:

По степени раскисления и характеру затвердевания стали классифицируются на спокойные, полуспокойные и кипящие (соответственно в конце марки стали ставится индекс сп, пс и кп). Раскисление — процесс удаления из жидкого металла кислорода, проводимый для предотвращения хрупкого разрушения стали при горячей деформации. **Спокойные стали** раскисляют марганцем, кремнием и алюминием. Они содержат мало кислорода, затвердевают спокойно, без газовыделения и образуют сосредоточенную усадочную раковину. **Кипящие стали** раскисляют только марганцем. Перед разливкой они содержат повышенное количество кислорода, который при затвердевании жидкого металла частично взаимодействует с углеродом с образованием угарного газа CO. Выделение CO создает впечатление кипения стали. Кипящие стали более дешевые, низкоуглеродистые, практически без кремния, но с повышенным количеством газообразных примесей. **Полуспокойные стали** по степени раскисленности занимают промежуточное положение между спокойными и кипящими.

По назначению:

- а) конструкционные, используемые для изготовления деталей машин;
- б) инструментальные, используемые для изготовления инструмента;
- а) углеродистые конструкционные стали.

Широкое применение углеродистых сталей объясняется их относительной дешевизной и удовлетворительными механическими свойствами. Эти стали выпускают обыкновенного качества и качественные.

1) Углеродистые стали обыкновенного качества

Это наиболее дешевые стали, изготавливаемые в виде проката (прутки, листы, швеллеры, трубы и др.) и поковок. Углеродистые стали обыкновенного качества предназначены для изготовления различных металлоконструкций, а также слабонагруженных деталей машин и приборов. Стали маркируются сочетанием букв Ст, цифрой (от 0 до 6), показывающей номер марки, и индексами, указывающими степень раскисленности стали (сп, пс, кп).

2) Углеродистые качественные стали

Эти стали характеризуются более низким содержанием вредных примесей и неметаллических включений. Они поставляются в виде проката, поковок с гарантированным химическим составом и механическими свойствами. Стали маркируются словом «сталь» и двухзначными числами 05, 08, 10, 15, 20 ...60, обозначающими среднее содержание углерода в сотых долях процента. Спокойные углеродистые качественные стали маркируются без индекса, полуспо-

койные и кипящие с добавлением соответственно «пс» и «кп». Например, сталь 20 кп.

Низкоуглеродистые стали типа 05, 08, 10 – малопрочные, высокопластичные, применяются для холодной штамповки различных изделий. Стали 10, 20, 25 – пластичны, хорошо штампуются и свариваются, применяются для изготовления крепежных деталей, втулок, осей, кулачков и др. Низкоуглеродистые стали могут насыщаться с поверхности углеродом (цементация).

Среднеуглеродистые стали 30, 35, 45, 50 имеют повышенную прочность, но меньшую вязкость и пластичность. Применяют эти стали для изготовления небольших валов, шатунов, зубчатых колес, якорей и др. Изделия после механической обработки подвергают закалке и высокому отпуску (термическому улучшению).

Стали 55, 60 применяют для изготовления рессорно-пружинных изделий. Подвергаются закалке и среднему отпуску с последующим упрочнением поверхностной пластической деформацией (наклепу).

б) Инструментальные углеродистые стали

Инструментальные углеродистые стали содержат более 0,7 % С и отличаются высокой твердостью и прочностью. Эти стали делятся на качественные и высококачественные. Марки качественной стали по ГОСТ 1435-90 следующие: У7, У8, У9, У10, У11, У12, У13; высококачественной: У7А, У8А, У13 А. Цифры в марке показывают среднее содержание углерода в десятых долях процента.

Классификация чугунов

Чугун – это железоуглеродистый сплав с содержанием углерода от 2,14 до 6 %. Кроме этих элементов, в чугуне содержится еще ряд примесей (кремний, марганец, сера, фосфор и др.). С целью улучшения свойств в чугуны могут вводиться легирующие элементы, такие как хром, никель, медь и др. Общая классификация и краткая характеристика чугунов приведены на рисунке 7.

Чугун, по сравнению со сталью, имеет как преимущества, так и недостатки. Положительными свойствами этого материала являются: хорошие литейные свойства (более низкая, чем у стали, температура плавления, меньшая усадка, хорошая жидкотекучесть), хорошая обрабатываемость резанием (кроме одной разновидности – белого чугуна), достаточно высокая работоспособность в условиях трения, способность гасить вибрации, небольшая стоимость.

Недостатком чугуна являются его низкие пластические свойства и ударная вязкость, что препятствует использованию чугуна для изготовления деталей, работающих при значительных динамических, ударных нагрузках, и делает невозможным в большинстве случаев использование обработки давлением (ковки, штамповки, прокатки и т. д.) для изготовления чугунных изделий.

По структуре различают чугуны, в которых углерод находится в виде химического соединения с железом Fe_3C – цементита, и чугуны, в которых углерод, в основном, находится в свободном состоянии, в виде графита.

Первая разновидность называется **белым чугуном**. Структура белых чугунов описывается чугуновой частью диаграммы железо-углерод (рисунок 7).

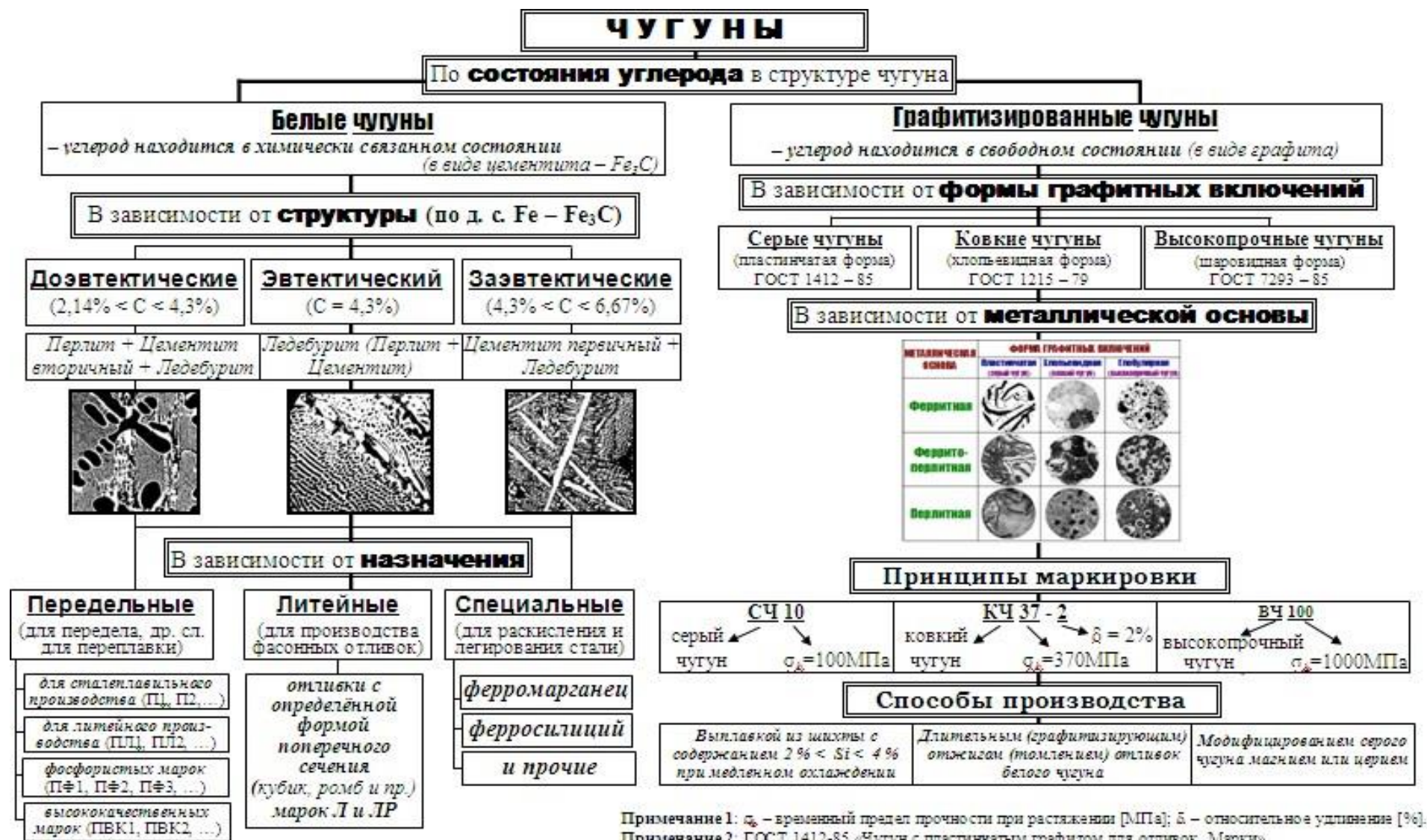


Рисунок 7 – Общая классификация и краткая характеристика чугунов

Согласно диаграмме, существует три разновидности белых чугунов: *доэвтектический* со структурой перлит, ледебурит и вторичный цементит, *эвтектический* со структурой ледебурит и *заэвтектический* со структурой ледебурит и первичный цементит (рисунок 8).

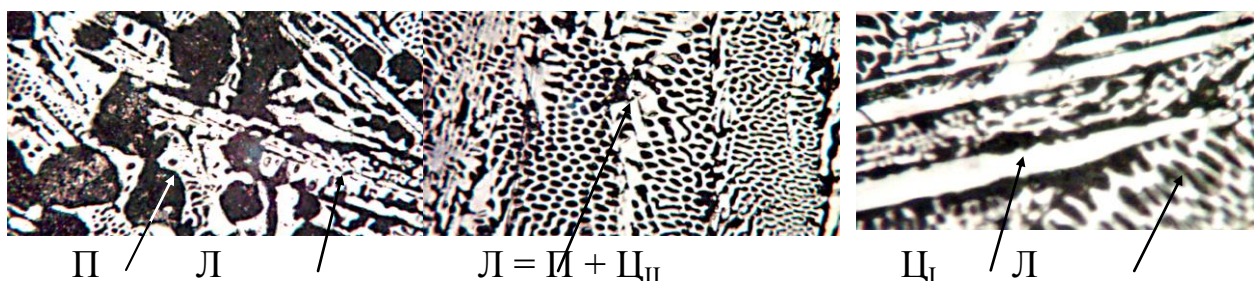


Рисунок 8 – Микроструктура белых чугунов

Получают белый чугун при ускоренном охлаждении в процессе отливки деталей, заготовок. Способствует также получению этой разновидности чугуна повышенное содержание в нем хрома, марганца. Структура белого чугуна определяет его механические свойства: это твердый хрупкий материал, имеющий предел прочности при растяжении $\sigma_b = 100\text{--}400$ МПа ($10\text{--}40$ кг/мм²), твердость НВ 300 – 700 и относительное удлинение $\delta = 0,1\text{--}0,2$ %. Вследствие низкой пластичности, белый чугун применяется очень редко, в основном, для изделий, работающих в условиях абразивного и гидроабразивного износа, когда его повышенная хрупкость не играет решающей роли.

В ряде случаев изготавливают детали с так называемой отбеленной поверхностью. Их поверхностный слой представляет собой белый чугун и имеет повышенную твердость и износостойкость, а сердцевина имеет структуру другой разновидности чугуна (с наличием графита), что обеспечивает необходимый комплекс механических свойств. *Примерами таких изделий с отбеленной поверхностью являются валки для холодной прокатки металла, шары для шаровых мельниц.*

Чугуны, в которых углерод находится в свободном виде, классифицируют по форме графитовых включений:

1. **Серый чугун.** В нем содержится графит в виде пластинчатых включений.
2. **Ковкий чугун** с хлопьевидными включениями графита.
3. **Высокопрочный чугун,** в котором графит имеет шаровидную форму.

Металлическая основа этих чугунов может быть *перлитной*, *ферритной* или *феррито-перлитной*. Зависимость структуры и механических свойств рассматриваемых чугунов показана на рисунке 9.

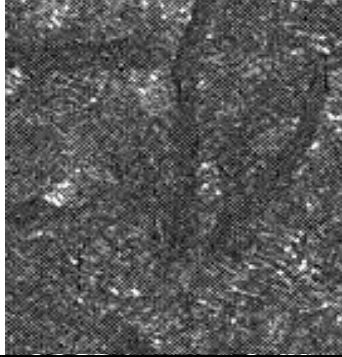

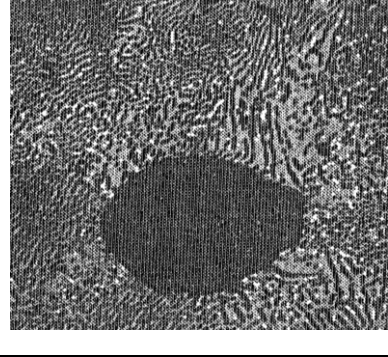

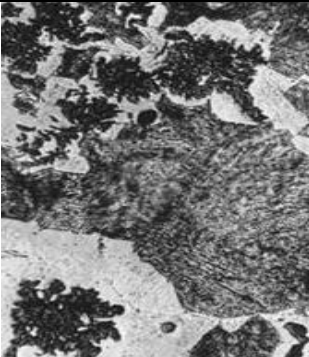
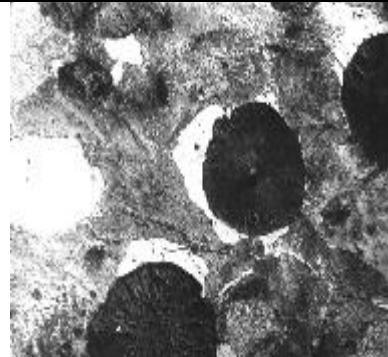

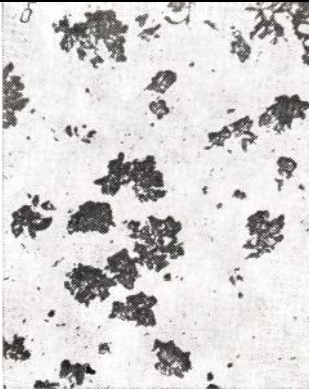
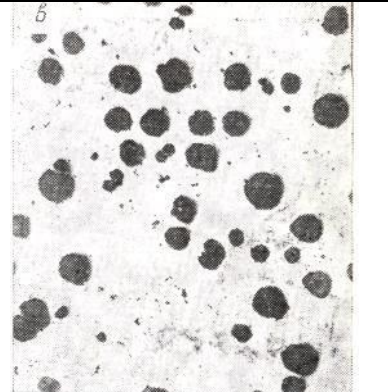
Структура металлической основы (твердость)	Тип чугуна и форма графита		
	Серый с пластинчатым графитом	Ковкий с хлопьевидным	Высокопрочный с шаровидным графитом
Перлит (250НВ)			
Перлит и феррит (200НВ)			
Феррит (150НВ)			
δ , %	0,2–0,5	5–10	10–15

Рисунок 9 – Зависимость структуры и механических свойств графитизированных чугунов

Поскольку графитовые включения отрицательно сказываются на механических свойствах металла, особенно на пластичности, то чем менее разветвленную форму они имеют, тем меньше их отрицательное влияние. Самая неудачная, с точки зрения механических свойств, форма графита – пластинчатая (пластичность при этом самая низкая), а наиболее благоприятная – шаровидная форма включений, обеспечивающая максимальную пластичность (рисунок 9). Это связано с тем, что графитовые включения играют роль трещин, пустот в чугуне и являются концентраторами напряжений. Чем более компактную форму имеют эти включения, тем более «мягкий» получается концентратор напряжений и тем меньше снижение механических свойств металла за счет графита.

Серый чугун получают при медленном охлаждении металла при литье изделий, а также при повышенном содержании кремния, углерода. Обозначается он буквами СЧ, после которых ставится цифра, показывающая предел прочности при растяжении σ_b в кг/мм² (ГОСТ 1412-85). Например, СЧ12 ($\sigma_b = 12$ кг/мм²). Применяется серый чугун для изготовления слабонагруженных деталей, работающих в легких условиях. Например, корпуса редукторов, насосов, электродвигателей, различные крышки, отопительные батареи и т. п.

Ковкий чугун получают из белого чугуна путем специального отжига. Это длительная термическая обработка, при которой белый чугун медленно нагревается до температур 950–1000 °С и после определенной выдержки медленно охлаждается. При таком отжиге происходит графитизация цементита белого чугуна с образованием хлопьевидных включений графита. На рисунке 10 приведен график отжига белого чугуна на ковкий.

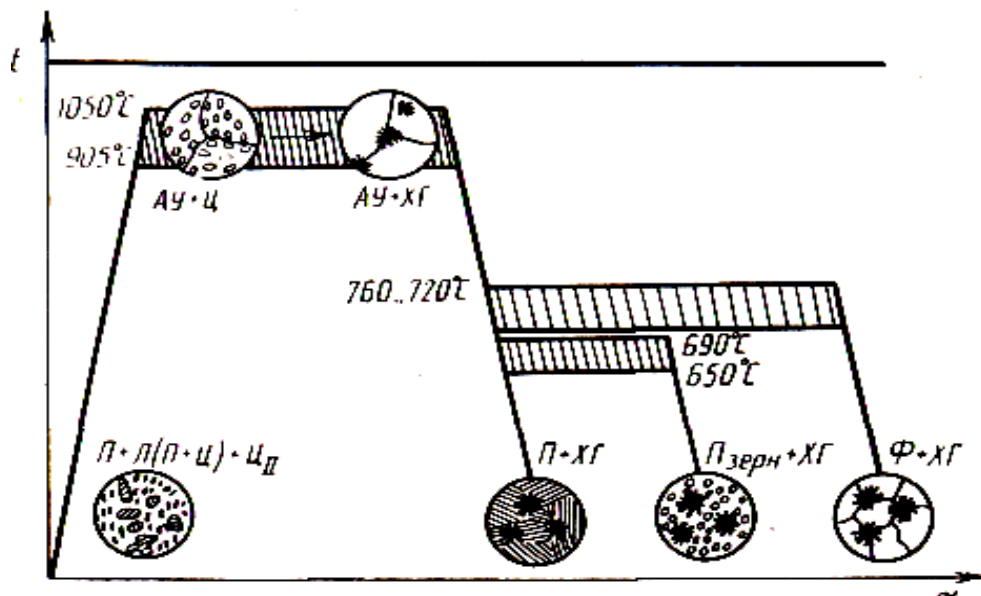


Рисунок 10 – График отжига белого чугуна на ковкий

Обозначается ковкий чугун буквами КЧ, после которых следуют цифры, показывающие предел прочности при растяжении σ_b в кг/мм² – первая цифра, и относительное удлинение δ в % – вторая цифра (ГОСТ 1215 в редакции 1992 г.). Например, КЧ30-6 ($\sigma_b = 30$ кг/мм², $\delta = 6$ %). Применяется этот чугун для изготовления деталей, работающих в более тяжелых условиях по сравнению с деталями из серого чугуна – при повышенных нагрузках, при знакопеременных и небольших ударных нагрузках. Например, картеры редукторов, коробок передач автомобилей, кронштейны рессор, различные крюки, фланцы и т.п.

Высокопрочный чугун получают путем модифицирования его при выплавке магнием или церием в количестве 0,05 %. Модификаторы способствуют формированию шаровидных включений графита. Обозначаются высокопрочные чугуны буквами ВЧ и цифрой, показывающей предел прочности при растяжении σ_b (ГОСТ 7293-85). Например, ВЧ 40 ($\delta_b = 40$ кг/мм²). Применяется высокопрочный

чугун для изготовления ответственных деталей, работающих в довольно сложных условиях при повышенном нагружении. Например, коленчатые и распределительные валы легковых автомобилей, прокатные валки, корпуса турбин, детали кузнечно-прессового оборудования и др.

Представляет интерес использование чугунов для деталей, работающих в специфических условиях (агрессивные среды, высокие температуры и др.). Для этого в чугуны вводят легирующие элементы, способствующие повышению необходимых свойств. Такие чугуны называют *легируемыми* или чугунами специального назначения. Они дешевле легированных сталей и вследствие лучших литейных свойств оказываются предпочтительнее для получения отливок.

Таблица 1 – Марки и механические свойства чугунов

Марка чугуна	σ_B , МПа (кг/мм ²)	δ , %	НВ
СЧ10	100 (10)	–	190
СЧ15	150 (15)	–	210
СЧ20	200 (20)	–	230
СЧ35	350 (35)	–	275
КЧ 30-6	300 (30)	6	100-163
КЧ 35-10	350 (35)	10	100-163
КЧ 45-7	450 (45)	7	150-207
КЧ 60-3	600 (60)	3	200-269
ВЧ 35	350 (35)	22	140-170
ВЧ 40	400 (40)	15	140-202
ВЧ 50	500 (50)	7	153-245
ВЧ 70	700 (70)	2	228-302

Вопросы для самопроверки

1. Общая характеристика диаграммы Fe – Fe₃C.
2. Назовите области диаграммы (однофазные и двухфазные).
3. Назовите фазы в диаграмме и охарактеризуйте каждую из них.
4. В каких состояниях может находиться углерод в железоуглеродистых сплавах?
5. Влияние углерода на механические свойства сталей.
6. Классификации сталей: по % углерода, степени раскисления.
7. Классификации сталей: по качеству (содержанию вредных примесей), по назначению.
8. Структура, свойства, маркировка и применение конструкционных углеродистых сталей.
9. Структура, свойства, маркировка и применение углеродистых инструментальных сталей.
10. Назвать примеры использования углеродистых сталей с различным % углерода в машиностроении.
11. Что понимается под равновесным состоянием сплавов?
12. Покажите на диаграмме состояния железо-углерод область чугунов.

13. Фазы и фазовые превращения в чугунах.
14. Какое содержание углерода у доэвтектических, эвтектических и заэвтек-
тических чугунов?
15. Температура плавления железа и чугуна.
16. Дать определения цементита, феррита, перлита, ледебурита.
17. В какой форме содержится углерод в белых, серых и высокопрочных чу-
гунах?
18. Маркировка чугунов.
19. График отжига белого чугуна на ковкий.
20. Какими способами делают изделия из чугуна?
21. Фазы и фазовые превращения в чугунах.
22. Пути повышения износостойкости изделий из чугунов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Цель работы: получить практические умения и навыки в области назначения режимов термической обработки для различных марок сталей.

Оборудование, приборы и материалы

Для выполнения работы необходимо иметь:

- муфельную электрическую печь для закалки;
- муфельную электрическую печь для отпуска;
- баки с различными закалочными средами;
- твердомер типа Роквелл;
- образцы из углеродистой стали, напильник, шлифовальную бумагу, щипцы.

Методические указания и задания по выполнению работы

Работа выполняется бригадой в 5–6 человек, каждой бригаде преподаватель дает определенное задание.

Задание 1. Установить зависимость твердости от скорости охлаждения, для чего произвести закалку одной марки стали в различных охлаждающих средах: воде, минеральном масле, на воздухе.

Задание 2. Установить зависимость влияния углерода, для чего произвести закалку различных марок стали в одной и той же среде.

Задание 3. Установить влияние температуры отпуска на изменение твердости закаленной стали (по указанию преподавателя), произвести отпуск закаленной стали на 200, 450 и 600 °С.

Методические указания:

1. При выполнении любого задания подготовить образцы для определения твердости и для закалки.
2. Определить твердость образцов на приборе Роквелла.
3. Определить критическую температуру нагрева под закалку по диаграмме железо-углерод (рисунок 2) и результаты режима термической обработки записать в таблицу 1.
4. Произвести закалку образцов по заданию.
5. Определить твердость образцов после закалки, предварительно зачистив их напильником и наждачной бумагой.
6. Результаты испытаний твердости записать в таблицу 2.

Таблица 1 – Результаты назначения температуры закалки и отпуска

№ п/п	Марка стали	Диаметр или толщина образца	Температура нагрева, 0С		Время выдержки, с		Охлаждающая среда
			под закалку	под отпуск	для закалки	для отпуска	

Таблица 2 – Результаты измерения твердости стали после закалки и отпуска

№ п/п	Мар- ка стали	Твердость образцов НВ, кгс/мм ²						
		в исходном состоянии	после закалки			после отпуска		
			на воздухе	в мас- ле	в воде 200С	низкого	среднего	высо- кого

7. Оформить табличные результаты.
8. Зарисовать микроструктуры закалочных структур.

Оформление отчета

1. Описание назначения и цели работы.
2. Основные теоретические сведения о закалке и отпуске углеродистых сталей.
3. Сводная таблица результатов закалки и отпуска.
4. Графики режима закалки и отпуска и зависимости твердости от различных параметров закалки и отпуска.
5. Вывод о влиянии содержания углерода на твердость отожженной и закаленной стали.
6. Теоретические сведения, необходимые для ответа на контрольные вопросы.

Основы термической обработки

Термическая обработка – это технологический процесс, состоящий из нагрева стали до определенной температуры, выдержка при этой температуре в течение определенного времени и охлаждения при заданной скорости с целью изменения его структуры и свойств.

Температура нагрева и скорость охлаждения определяются видами термической обработки, основными из которых являются **отжиг, нормализация, закалка и отпуск**. Иногда применяют обработку холодом (рисунок 1), пластическую деформацию.

На стадии изготовления деталей машиностроительных конструкций необходимо, чтобы металл был пластичным, нетвердым, имел хорошую обрабатываемость резанием. Для данных целей проводят нормализацию стали.

В готовых изделиях всегда желательно иметь материал максимально прочным, вязким, с необходимой твердостью.

Такие изменения в свойствах материала позволяет сделать термообработка. Любой процесс термообработки может быть описан графиком в координатах температура – время и включает нагрев, выдержку и охлаждение. При термообработке протекают фазовые превращения, которые определяют вид термической обработки.

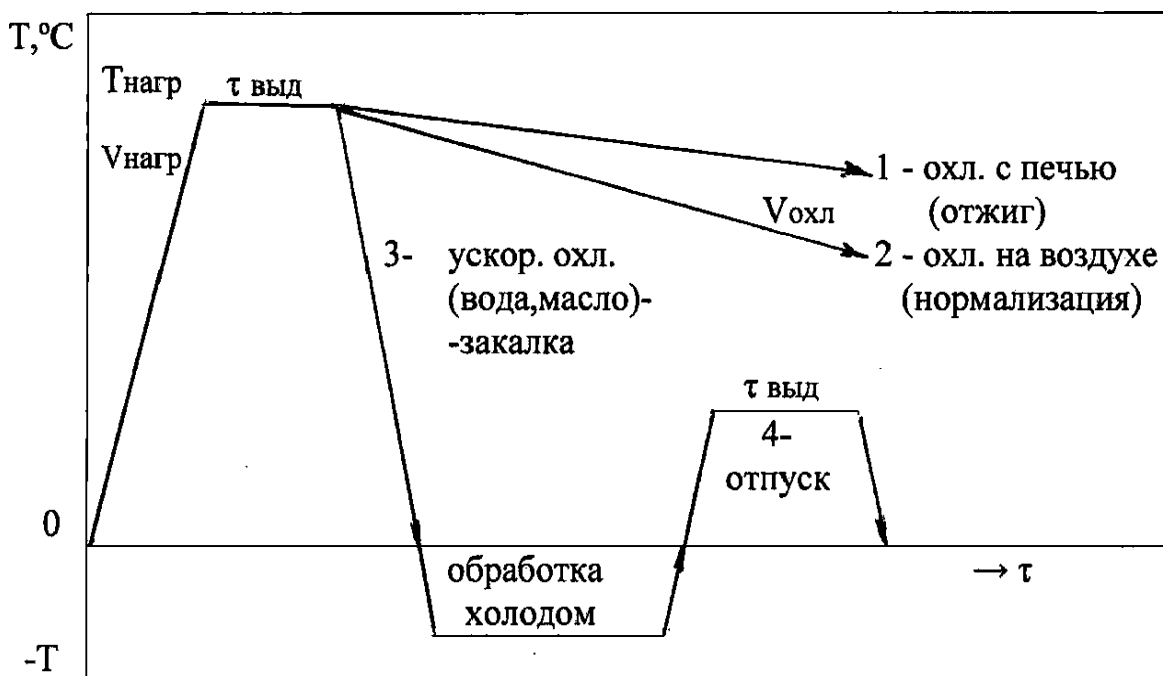


Рисунок 1 – Элементы режима термической обработки и ее виды

Температура нагрева стали зависит от положения ее критических точек и выбирается по диаграмме состояния Fe – Fe₃C в зависимости от вида термической обработки. Критические точки (температуры фазовых превращений) определяют: линия PSK – точку A₁, GS – точку A₃ и SE – точку A_{cm}. Нижняя критическая точка A₁ соответствует превращению А → П при 727 °С. Верхняя критическая точка A₃ соответствует началу выделения феррита из аустенита (при охлаждении) или концу растворения феррита в аустените (при нагреве). Температура линии SE, соответствующая началу выделения вторичного цементита из аустенита, обозначается A_{cm}.

Выдержка при температуре термообработки необходима для завершения фазовых превращений, происходящих в металле, выравнивания температуры по всему объему детали. Продолжительность выдержки зависит от химического состава стали и для нелегированных сплавов определяется из расчета 60 с. на один миллиметр сечения. Скорость охлаждения зависит, главным образом, от химического состава стали, а также от твердости, которую необходимо получить.

Самыми распространенными видами термообработки сталей являются закалка и отпуск. Производятся с целью упрочнения готовых изделий.

Отжиг сталей

Отжиг – это вид термической обработки, который заключается в нагреве, обеспечивающем полную (полный отжиг) или частичную (неполный отжиг) перекристаллизацию (образование аустенита), выдержке и последующем медленном охлаждении, как правило, вместе с печью. Целью отжига является снижение твердости и повышение пластичности для улучшения обрабатываемости резанием или давлением. Для доэвтектоидных конструкционных сталей применяют пол-

ный отжиг, при котором температура нагрева на 30...50 °С выше линии полного аустенитного превращения (линия GS, критическая температура A_3 (рисунок 2)).

Заэвтектоидные инструментальные стали подвергают неполному отжигу, при этом температура нагрева на 30...50 °С выше линии эвтектоидного превращения (линия SK, критическая температура A_1 , рисунок 2). Такой режим отжига предотвращает образование цементитной сетки, охрупчивающей сталь.

Структура после отжига в наибольшей степени соответствует диаграмме железо – углерод: в доэвтектоидных сталях – феррит и перлит, в эвтектоидных – перлит, в заэвтектоидных – перлит и цементит.

Для улучшения обрабатываемости инструментальной стали применяют также отжиг на зернистый перлит. При этом сталь подвергают «маятниковому» нагреву в области температуры эвтектоидного превращения, с амплитудой 50 °С и кратностью 2–3 раза. Такой режим нагрева способствует превращению пластинчатого перлита в зернистый, более пластичный перлит.

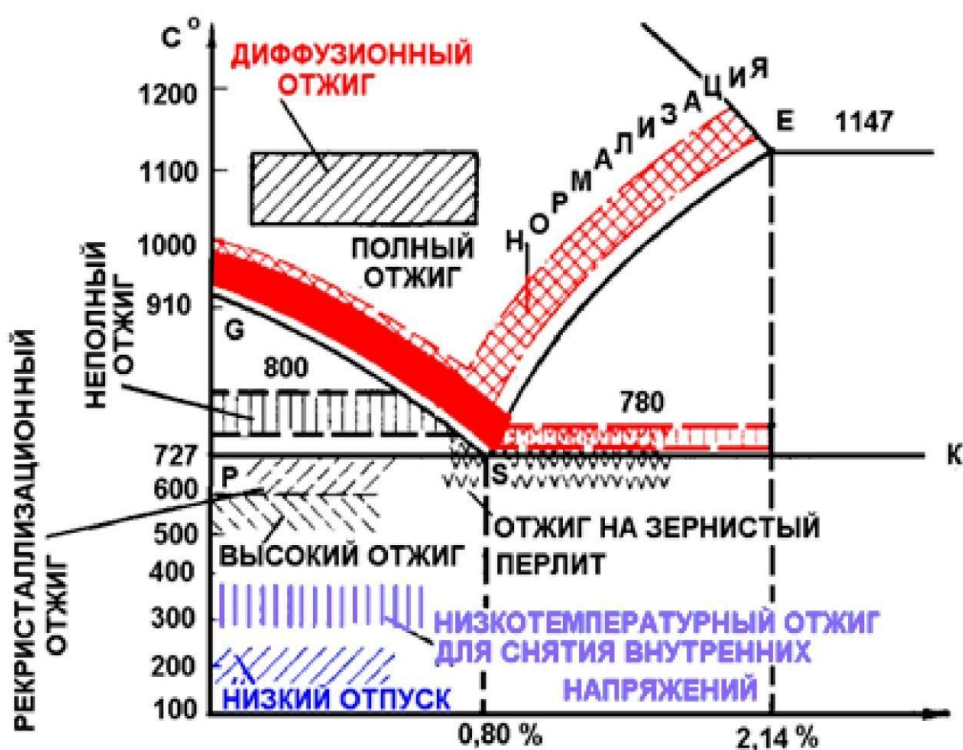


Рисунок 2 – Выбор температуры нагрева при термических обработках стали

Нормализация

Нормализация – это вид термической обработки, который заключается в нагреве до температуры, обеспечивающей полную аустенитизацию, выдержке и охлаждении на воздухе.

Цель нормализации доэвтектоидных сталей заключается в некотором повышении твердости за счет получения по сравнению с отжигом более мелкозернистой и дисперсной структуры. Нормализацию заэвтектоидных сталей проводят с целью устранения охрупчивающей цементитной сетки и подготовки структуры для последующей термообработки – закалки.

При нормализации для всех сталей независимо от содержания углерода температура нагрева должна быть на 30...50 °С выше линии полного аустенитного превращения, т. е. линии GSE на диаграмме состояния Fe-C.

Структура стали после нормализации в целом соответствует диаграмме состояния Fe-C, но, благодаря более ускоренному охлаждению по сравнению с отжигом, она характеризуется меньшим размером зерен феррита и большей дисперсностью перлита.

Закалка сталей

Закалкой называется фиксация при комнатной температуре высокотемпературного состояния сплава. Основная цель закалки – получение высокой твердости, прочности и износостойкости. Для достижения этой цели стали нагревают до температур на 30–50 °С выше линии GSK (рисунок 3), выдерживают определенное время при этой температуре и затем быстро охлаждают.

Процессы, происходящие в сплаве на различных стадиях закалки, можно рассмотреть на примере эвтектоидной стали. В исходном отожженном состоянии эта сталь имеет структуру перлита (эвтектоидная смесь феррита и цементита). При достижении температуры A_1 , (727 °С) произойдет полиморфное превращение, т. е. перестройка кристаллической решетки феррита (ОЦК) в решетку аустенита (ГЦК), вследствие чего растворимость углерода резко возрастает. В процессе выдержки весь цементит растворится в аустените, и концентрация углерода в нем достигнет содержания углерода в стали, т. е. 0,8 %. Следующий этап – охлаждение стали из аустенитной области до комнатной температуры – является определяющим при закалке. При охлаждении стали ниже температуры A_1 происходит обратное полиморфное превращение, т. е. решетка аустенита (ГЦК) перестраивается в решетку феррита (ОЦК) и при этом растворимость углерода уменьшается в 40 раз (с 0,8 до 0,02). Если охлаждение происходит медленно, то "лишний" углерод успевает выйти из решетки феррита и образовать цементит. В результате формируется структура феррито-цементитной смеси. Если же охлаждение производится быстро, то после полиморфного превращения углерод остается вследствие подавления диффузионных процессов в решетке ОЦК. Образуется пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе, который называется мартенситом.

Перенасыщенность мартенсита углеродом создает в его решетке большие внутренние напряжения, которые приводят к искажению ее формы и превращению из кубической в тетрагональную. Уровень внутренних напряжений оценивается степенью тетрагональности, т. е. отношением длины ребра с параллелепипеда к ребру a .

Чем выше степень тетрагональности решетки мартенсита, тем выше его твердость. Степень тетрагональности, в свою очередь, будет зависеть от содержания углерода в стали.

Получить структуру мартенсита (или закалить сталь) можно только в том случае, если обеспечить скорость охлаждения больше или равную критической ($V_{кр}$) (рисунок 3), чтобы не успели пройти процессы распада аустенита в верхнем районе температур.

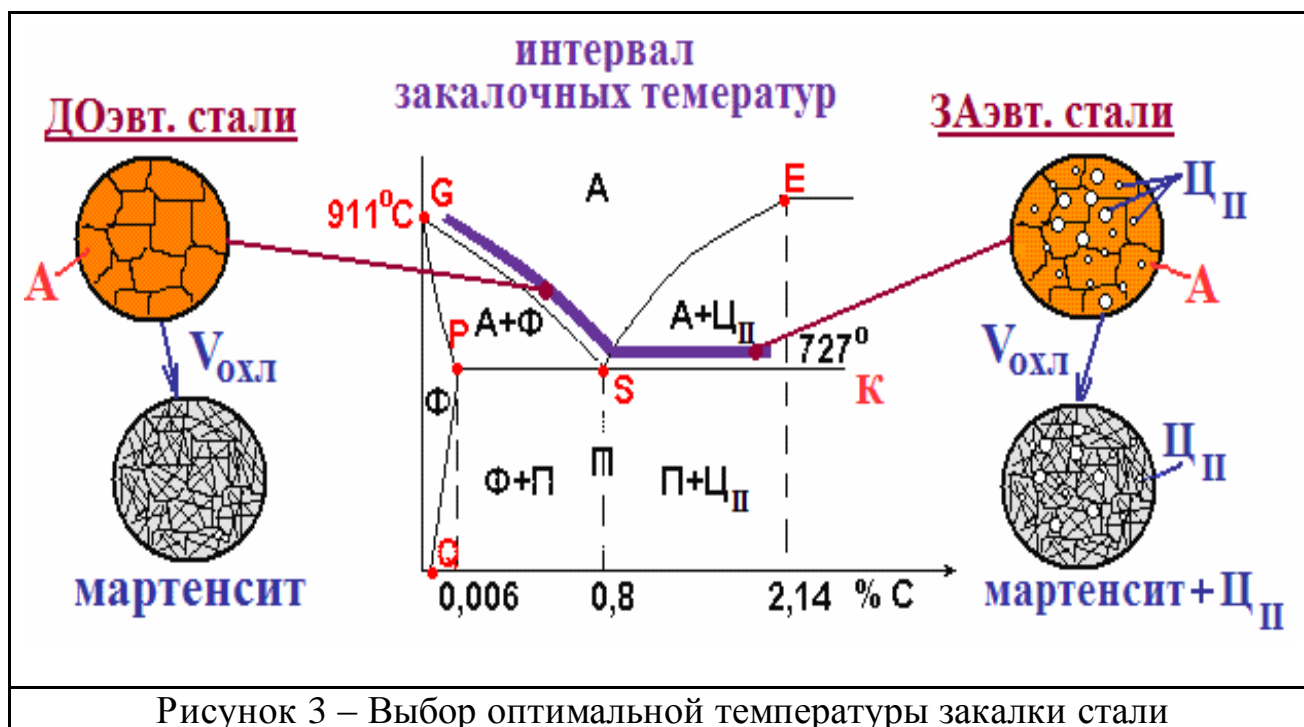


Рисунок 3 – Выбор оптимальной температуры закалки стали

Критическая скорость закалки или минимальная скорость охлаждения ($V_{кр}$) – это скорость, при которой аустенит переходит в мартенсит. Если же скорости охлаждения будут меньше $V_{кр}$, то при распаде аустенита получим феррито-цементитные смеси различной дисперсности *троостит, сорбит и перлит*.

Перлит (грубо дисперсионная смесь феррита и цементита) может быть получен при очень медленных скоростях охлаждения (на рисунке 5 это скорость V_1). Такие скорости охлаждения характерны для отжига (охлаждение вместе с печью).

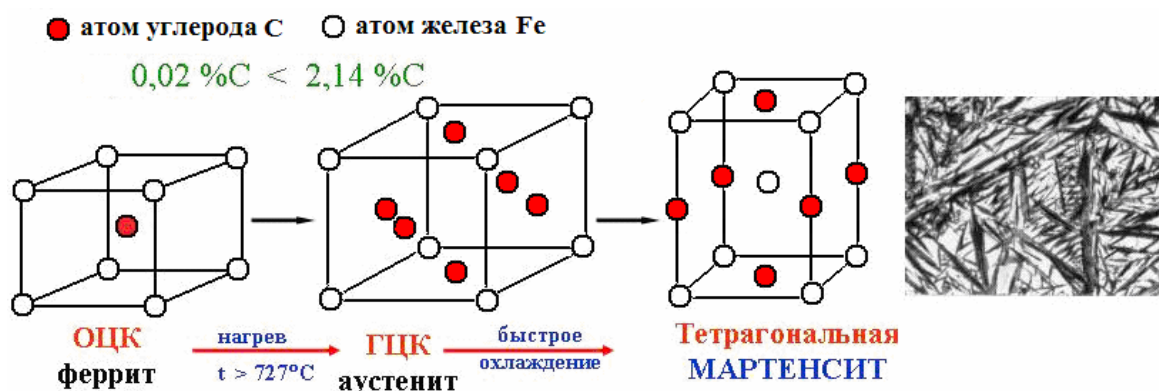


Рисунок 4 – Изменение кристаллической решетки от феррита до мартенсита

При охлаждении углеродистых сталей на воздухе (вид термообработки – нормализация) со скоростью V_2 получаем структуру сорбит.

Аустенит (от имени англ. металлурга У. Роберса-Остена) – фаза железо-углеродистых сплавов, твердый раствор внедрения углерода и легирующих компонентов в γ -железе. Кристаллическая решетка – гранецентрированный куб. В уг-

леродистых сталях и чугунах аустенит устойчив при температуре выше 727 °С (рисунок 5, а)

Перлит (от фр. *perle* – жемчуг) – структурная составляющая сплава, представляющая смесь феррита и цементита. Перлит образуется в процессе распада аустенита (при охлаждении). Перлитные конструкционные стали обладают достаточно высокой прочностью и пластичностью (рисунок 5, б)

Мартенсит (от имени американского металлурга А. Мартенса) – микроструктура закаленной стали, представляющий собой пересыщенный **твердый раствор углерода в αFe** . Мартенситной структуре соответствует наиболее высокая твердость стали (рисунок 5, в).

Бейнит (от имени американского металлурга Э. Бейна) – структура стали, образующаяся в результате т.н. промежуточного превращения аустенита. Бейнит состоит из **смеси частиц пересыщенного углеродом феррита и карбида железа**. В сталях с бейнитной структурой обычно имеется остаточный аустенит (рисунок 5, г).

Сорбит (от имени англ. ученого Г. К. Сорби) – структурная составляющая стали, представляющая собой **смесь феррита и цементита**, образующаяся из аустенита в результате превращения при охлаждении. Отличается от перлита более тонкой (дисперсной) структурой, что обеспечивает более высокую прочность стали (рисунок 5, д).

Троостит (от имени фр. ученого Л. Ж. Труста) – структурная составляющая стали, представляющая собой дисперсную **смесь феррита и цементита**, отличается от перлита и сорбита более тонкой (дисперсной) структурой. Образуется при распаде аустенита в температурном интервале 500–400 °С (троостит закалки) или при отпуске закаленной стали при температурных режимах 350–400 °С (троостит отпуска). Стали со структурой троостита обладают повышенной твердостью и прочностью, умеренной пластичностью и вязкостью (рисунок 5, е).

Свойства сорбита и троостита занимают промежуточное положение между свойствами перлита (П) и мартенсита (М).

Практической целью закалки является получение максимальной прочности и твердости стали. Достигается эта цель при следующих режимах: нагрев стали на 30–50 °С выше линии GSK, выдержка при этой температуре и охлаждение со скоростью выше $V_{кр}$.

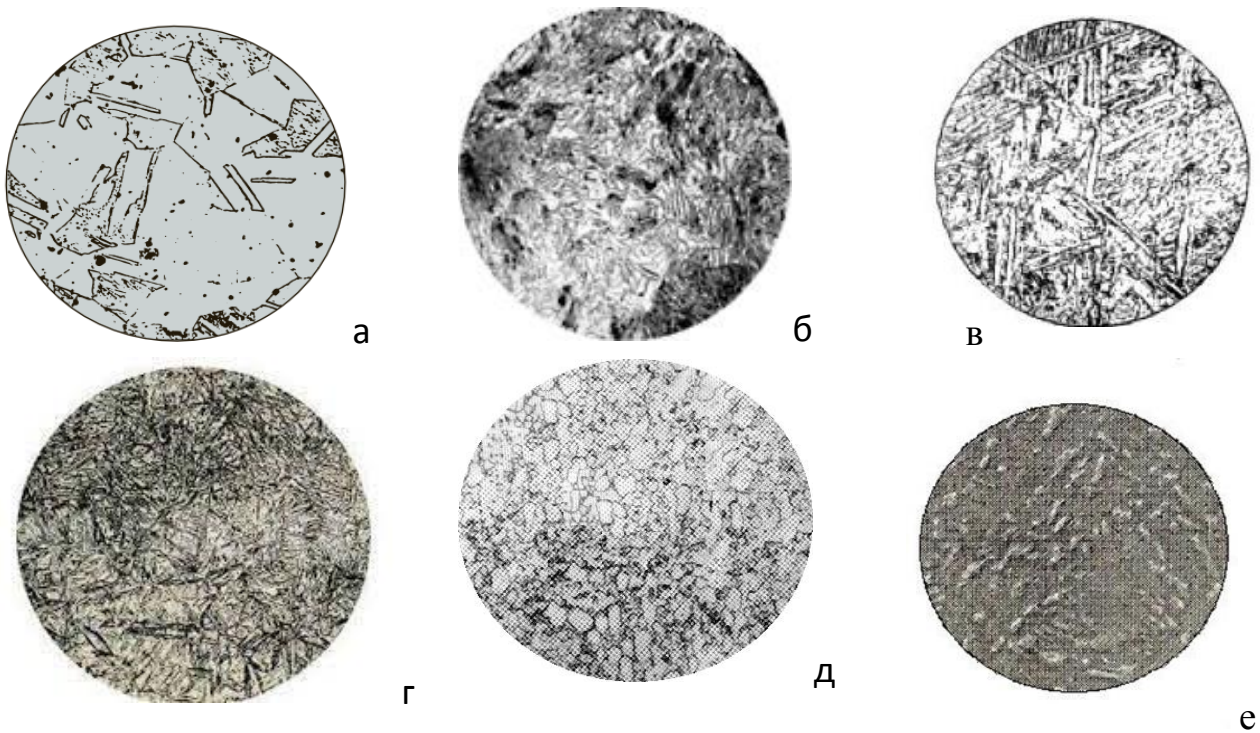


Рисунок 5 – Микроструктура стали при различных режимах термической обработки:
 а – аустенит; б – перлит (пластинчатый), в – мартенсит; г – бейнит;
 д – сорбит; е – троостит

По температуре нагрева различают полную и неполную закалку. Полная закалка осуществляется из аустенитной области. После охлаждения с критической скоростью закалки у всех углеродистых сталей образуется структура мартенсита. Полной закалке подвергают изделия из доэвтектоидных сталей, при этом исключается образование мягких ферритных включений.

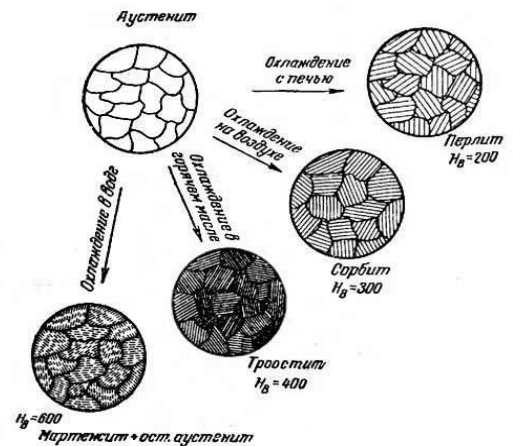
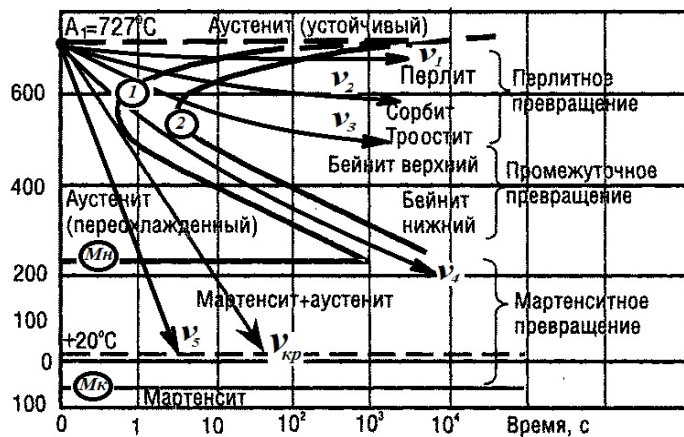


Рисунок 6 – Диаграмма изотермического превращения аустенита эвтектоидной стали У8 (а); б) – схема образования структур в стали У8 при различных скоростях охлаждения

Неполная закалка – закалка из промежуточных, двухфазных областей ($A + \Phi$), ($A + \text{Ц}_{II}$). В результате охлаждения с критической скоростью в доэвтектоидных сталях образуется структура $\Phi + M$, а в заэвтектоидных – $M + \text{Ц}_{II}$.

Неполной закалке подвергают инструмент из заэвтектоидной стали, поскольку наличие включений вторичного цементита увеличивает твердость закаленного инструмента, т.к. цементит по твердости превосходит мартенсит.

Отпуск сталей

К важнейшим механическим свойствам сталей наряду с твердостью относятся и пластичность, которая после закалки очень мала. Структура резко неравновесная, возникают большие закалочные напряжения. Чтобы снять закалочные напряжения и получить оптимальное сочетание свойств для различных групп деталей, обычно после закалки проводят отпуск стали.

Отпуском стали является термообработка, состоящая из нагрева закаленной стали до температуры ниже линии PSK (критическая точка A_1), выдержки при этой температуре и дальнейшего произвольного охлаждения. Этот процесс связан с изменением строения и свойств закаленной стали (рисунок 7). При отпуске происходит распад мартенсита, переход к более устойчивому состоянию. При этом повышается пластичность, вязкость, снижается твердость и уменьшаются остаточные напряжения в стали. Механизм протекающих превращений при отпуске сталей – диффузионный, он определяется температурой и продолжительностью нагрева.

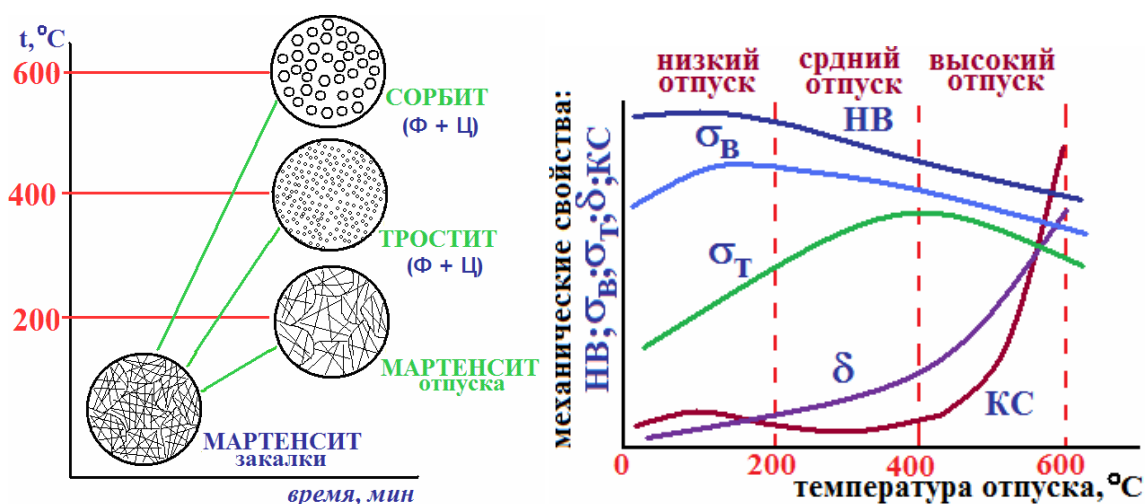


Рисунок 7 – Влияние температуры отпуска изменение структуры и механические свойства закаленной стали (обозначения: НВ – твердость по Бринеллю; σ_B – предел прочности; σ_T – предел текучести; δ – относительное удлинение; КС – ударная вязкость)

Первое превращение, протекающее в интервале 150–200 °С, соответствует выделению из мартенсита тонких пластин ϵ , – карбида Fe_2C . Выделение углерода из решетки приводит к уменьшению степени ее тетрагональности. Полученный при этом мартенсит, имеющий степень тетрагональности, близкую к 1, называется отпущенным.

При нагреве закаленной стали выше 300 °С происходит полное выделение углерода из раствора и снятие внутренних напряжений. Сталь состоит из мелкодисперсной смеси феррита и цементита (троостит отпуска).

При нагреве до температуры выше 480 °С идет процесс коагуляции (укрупнения) карбидных частиц и максимальное снятие остаточных напряжений. Формируется структура сорбита отпуска.

В зависимости от температуры нагрева различают низкий, средний и высокий отпуск. Низкий отпуск проводят в интервале температур 150–250 °С для инструментов – изделий, которым необходимы высокая твердость и износостойкость. Получаемая структура $M_{отп}$ (мартенсит) или $M_{отп} + Ц_{II}$ (мартенсит отпуска + цементит вторичный).

Средний отпуск (350–500 °С) применяется для рессор, пружин, штампов и другого ударного инструмента, т. е. для тех изделий, где требуется достаточная твердость и высокая упругость. Получаемая структура – $T_{отп}$ (троостит отпуска).

Высокий отпуск (500–650 °С) полностью устраняет внутренние напряжения. Достигается наилучший комплекс механических свойств: повышенная прочность, вязкость и пластичность. Применяется для изделий из конструкционных сталей, подверженных воздействию высоких напряжений (валы, шатуны). Структура – $S_{отп}$ (сорбит отпуска).

Термообработку, заключающуюся в закалке на мартенсит и последующем высоком отпуске, называют улучшением.

Контрольные вопросы

1. Что такое закалка? Способы закалки доэвтектоидной и заэвтектоидной стали.
2. Цель закалки?
3. Какие структуры можно получить, проведя закалку?
4. Что такое мартенсит?
5. Какую кристаллическую решетку имеет мартенсит в стали после закалки?
6. Что такое критическая скорость закалки?
7. Как выбирается температура нагрева под закалку для доэвтекоидных и заэвтектоидных сталей?
8. Что такое полная и неполная закалка?
9. Почему для доэвтектоидных сталей применяется полная, а для заэвтектоидных – неполная закалка?
10. Как влияет содержание углерода в доэвтектоидной стали на температуру нагрева под закалку?
11. Какое состояние сплава должно предшествовать операции отпуска?
12. Какие фазовые превращения протекают при отпуске закаленных сплавов?
13. При каких температурах проводится низкий, средний и высокий отпуск?
14. Какая структура образуется после низкого, среднего и высокого отпуска?
15. Для каких изделий проводится низкий, средний и высокий отпуск?
16. Как влияет температура отпуска на механические свойства стали?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЕЙ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСБЕННОСТИ И МИКРОСТРУКТУРА

Цель работы: получить практические умения и навыки основных этапов назначения и проведения различных видов химико-термической обработки

Оборудование, приборы и материалы

1. Малые камерные печи типа СНОЛ-1,6.2,5.1/9; СНОЛ-1,6.2,5.1/10М.
2. Металлографический микроскоп МИМ-7.
3. Твердомер Роквелла (модель ТК-2М).
4. Набор макро-микрошлифов углеродистых и легированных сталей после цементации, нитроцементации, азотирования, борирования.
5. Атласы (альбомы) с фотографиями микроструктур сталей.

Методические указания по выполнению работы

1. Подготовить, уложить в малый контейнер с твердым карбюризатором (древесный уголь стандартный или в смесь древесного угля, соды кальцинированной) образцы для металлографического исследования и провололочные или ленточные контрольные образцы-свидетели из сталей 10, 15, Ст.3.
2. Провести загрузку контейнера в печь и цементацию при 920–950 °С в течение 1,5–2,0 ч с последующим охлаждением контрольных образцов в масле или воде, а охлаждение остальных образцов на воздухе, в контейнере.
3. Провести дополнительную закалку нормализованных на воздухе образцов от температуры 780–800 °С в масле или воде, измерить твердость закаленных и отпущенных образцов по поверхности и сердцевине.
4. Ознакомиться с микроструктурой цементованной углеродистой стали при различных условиях термообработки, зарисовать структуру диффузионного слоя и сердцевины. Ознакомиться со структурой диффузионных слоев на легированных и высоколегированных сталях при цементации, азотировании, нитроцементации.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен включать следующее:

1. Название, цель работы.
2. Краткие теоретические сведения
3. Методику лабораторной работы (задание по работе).
4. Состав твердого карбюризатора, режим цементации, термообработки.
5. Микроструктуру (схематическую) стали после цементации (до и после термообработки), азотирования с указанием структурных составляющих.
6. Результаты замеров твердости различных зон образцов стали после ХТО.

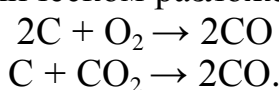
Химико-термическая обработка стали

Химико-термическая обработка – это процесс термической обработки изделий в активных средах с целью изменения химического состава, структуры и

свойств поверхностных слоев металла. Ее проводят для повышения твердости, износостойкости и коррозионной стойкости изделий. К наиболее распространенным процессам химико-термической обработки относятся: цементация, азотирование, нитроцементация, борирование, диффузионная металлизация.

Цементация. Под цементацией понимают процесс насыщения углеродом изделий из низкоуглеродистых сталей (до 0,25 %), в результате чего изделия становятся двухслойными – поверхность науглероживается до 0,8–1,2 % С, а сердцевина остается не науглероженной. Изделие после цементации подвергают отжигу или нормализации для измельчения зерна с последующей закалкой и низким отпуском, при этом сердцевина не принимает закалку и остается пластичной и может работать в условиях динамических нагрузок, а поверхность становится твердой (закалка на мартенсит). Толщина слоя чаще всего составляет 0,5–2,0 мм. Цементацию проводят с использованием как твердого, так и газообразного карбюризаторов. В настоящее время в практике используется довольно большое количество разнообразных твердых карбюризаторов. Наиболее простыми являются смеси на основе древесного угля (80–90 %) и карбонатов натрия, кальция и бария (10–20 %).

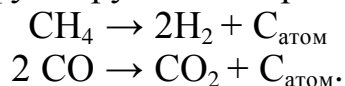
При цементации в твердом карбюризаторе детали загружаются в специальные ящики и засыпаются карбюризатором. После частичной или полной герметизации ящики устанавливают в печь, нагревают до 900–950 °С и выдерживают в течение 8–10 ч. В процессе нагревания в ящике возрастает концентрация СО, образующегося за счет взаимодействия угля с кислородом воздуха, и углекислым газом, выделяющимся при термическом разложении карбонатов



Оксид углерода, соприкасаясь с поверхностью изделия, распадается с выделением атомарного углерода $2\text{CO} = \text{CO}_2 + \text{C}_{\text{атом}}$, который диффундирует в поверхностные слои стали, изменяя их свойства.

Газовую цементацию применяют при массовом производстве изделий, ее проводят в герметичных камерах. В качестве цементирующих газов используют оксид углерода и углеводороды: метан, пропан.

При 900–950 °С газообразные продукты разлагаются с выделением атомарного углерода, который диффундирует в поверхностный слой



Атомарный углерод, взаимодействуя с нагретой до аустенитного состояния стали, диффундирует в глубь поверхностного слоя и растворяется в γ – железе. Так как γ – железо обладает способностью растворять значительное количество углерода (до 2,0 %), цементация проводится при температуре выше A_{C3} (920–950 °С). Массовая доля углерода в поверхностном слое определяется пределом растворимости углерода в аустените (т. е. линией SE диаграммы Fe – Fe₃C) (рисунок 1, а). При температуре цементации диффузионный слой состоит только из аустенита, а после медленного охлаждения – из продуктов его распада: феррита и цементита. Концентрация углерода при этом обычно не достигает предела насыщения (C_{max}) при данной температуре.

Цементованный слой имеет переменную концентрацию углерода по глубине, убывающую от поверхности к сердцевине детали (рисунок 1, б). В связи с этим после медленного охлаждения в структуре цементованного слоя можно различить (от поверхности к сердцевине) три зоны: (1) заэвтектоидную, состоящую из перлита и вторичного цементита, последний образует сетку по бывшему зерну аустенита; (2) эвтектоидную, состоящую из пластинчатого перлита; (3) доэвтектоидную, состоящую из перлита и феррита (рисунок 1, в). Ближе к сердцевине изделия содержание углерода снижается, а, следовательно, в структуре стали уменьшается количество перлита и увеличивается количество феррита.

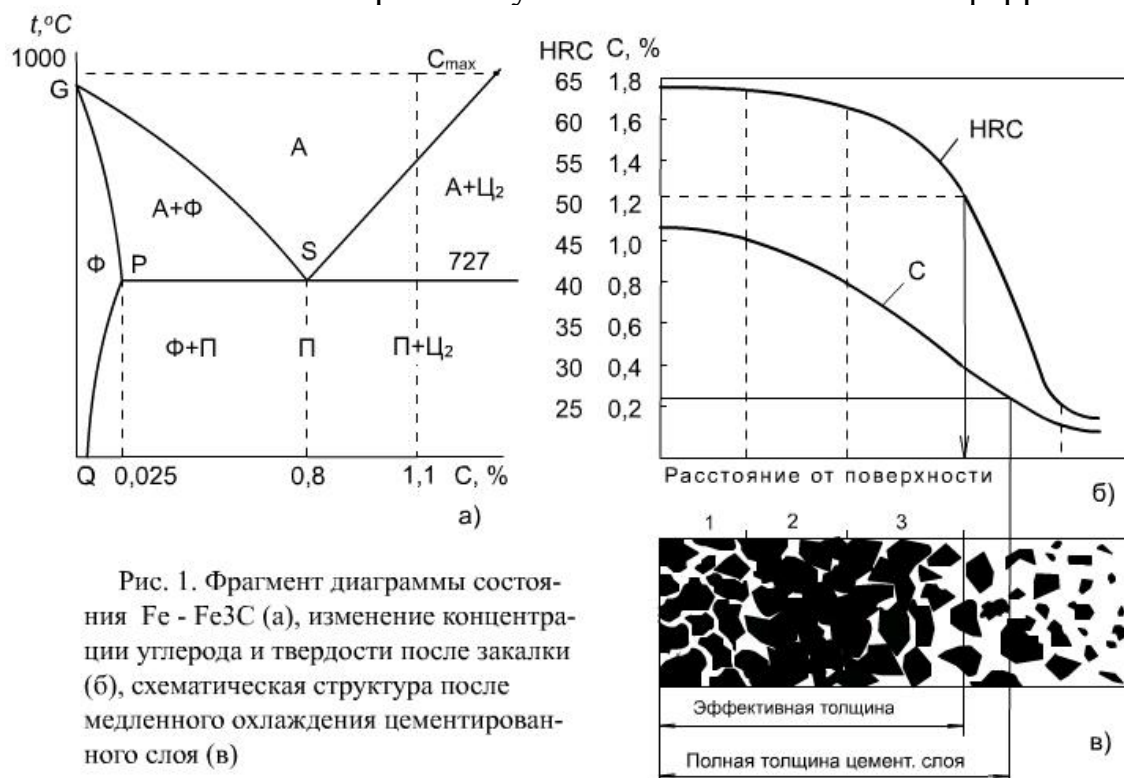


Рис. 1. Фрагмент диаграммы состояния Fe - Fe₃C (а), изменение концентрации углерода и твердости после закалки (б), схематическая структура после медленного охлаждения цементированного слоя (в)

Поверхностный слой имеет лучшие свойства при содержании углерода в пределах 0,9–1,1 %. При более высоком содержании углерода он становится излишне хрупким, при меньшем содержании высокая твердость после закалки не достигается.

Наиболее распространенной термической обработкой цементированных деталей является закалка от 800–850 °С с последующим отпуском при 150–200 °С.

При газовой цементации деталей широкое распространение получила непосредственная закалка из цементационной печи с предварительным подстуживанием до 800–840 °С.

На рисунке 2 показано изменение микроструктуры по сечению цементованного слоя при насыщении его поверхностной зоны углеродом свыше 0,8 %.

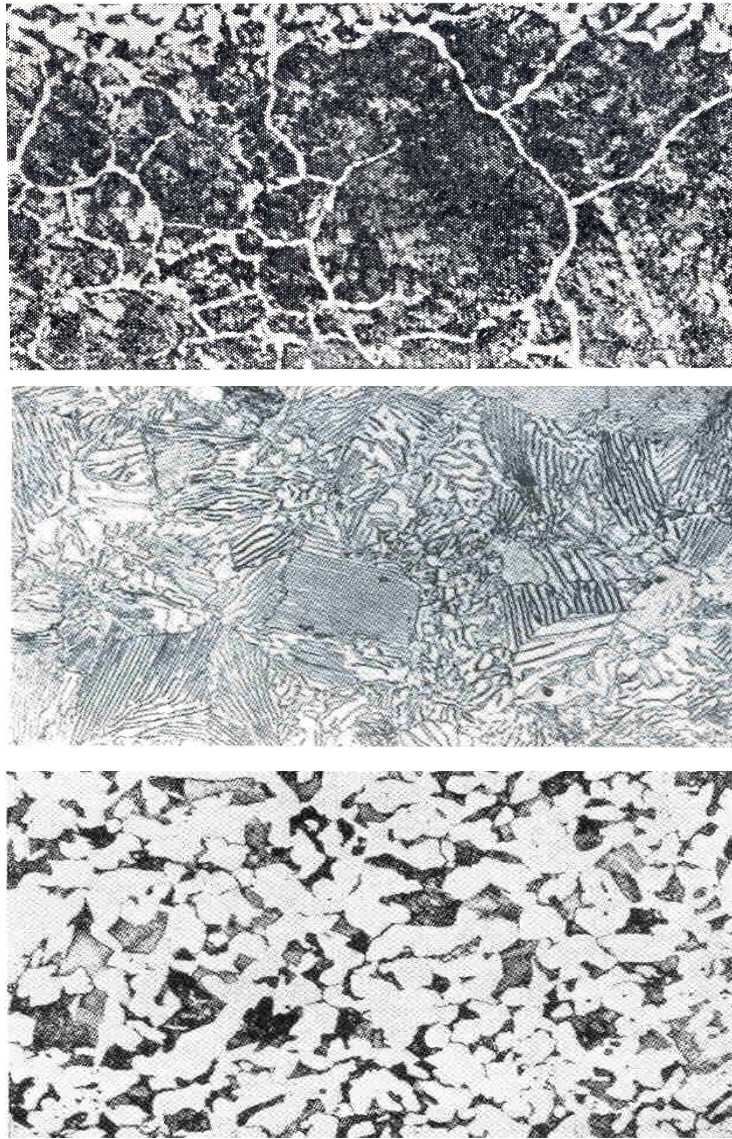


Рисунок 2 – Структура цементованного слоя углеродистой стали 15, x 100, травление ниталем:
а – заэвтектоидная (П+Ц_{II}); б – эвтектоидная (П); в – доэвтектоидная (Ф+П)

Для получения в поверхностном слое высокой твердости (57... 63HRC) изделия после цементации подвергают закалке с низкотемпературным отпуском. На рисунке 3 показана микроструктура цементованного слоя после термической обработки.

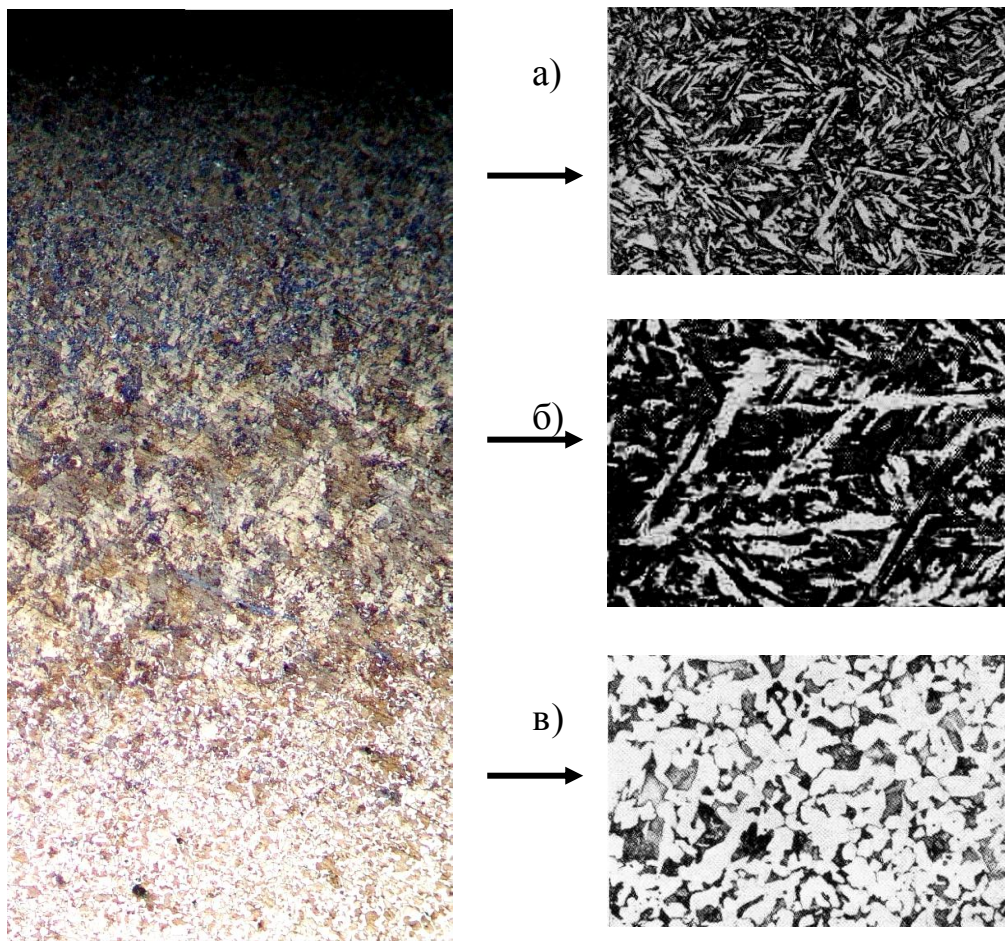


Рисунок 3 – Структура цементованного слоя после термообработки, х50, травление ниталем:

- а – мелкоигльчатый мартенсит ($M + A_{ост}$), х500;
- б – крупноигльчатый мартенсит или троостомартенсит ($M + Tr$), х500;
- в – основная структура ($\Pi + \Phi$), х500

В результате термической обработки поверхностный слой приобретает структуру мелкоигльчатого мартенсита (рисунок 3, а) с небольшими изолированными участками остаточного аустенита. При содержании углерода свыше 0,8 % микроструктура содержит еще карбиды (цементит). Карбиды (цементит) в форме сетки по границам зерен резко увеличивают хрупкость. Недопустимы в значительном количестве и изолированные включения карбидов, так как они также снижают вязкость цементованной стали, особенно в углах и торцах деталей.

Под мелкоигльчатым мартенситом располагается зона троостомартенсита (рисунок 3, б), плавно переходящая в основную структуру, состоящую из феррита и перлита (рисунок 3, в). Для улучшения вязкости сердцевины деталей рекомендуется применять стали с мелким наследственным зерном (6...8 баллов).

Подобная микроструктура дает возможность судить о глубине цементирования, т. е. от поверхности простирается зона науглероженного металла. За эффективную толщину цементированного слоя принимают расстояние от +П (рису-

нок 3, в), где структура соответствует стали, содержащей 0,4...0,45 % С, что соответствует твердости 50HRC.

Глубина цементации – наиболее важная характеристика производственного процесса. Она определяется по излому, микроструктуре или путем химического анализа стружки, послойно снимаемой с упрочненной поверхности детали.

В тяжело нагруженных деталях, работающих в сложных условиях весьма важное значение, имеет и твердость сердцевины, для обеспечения наилучшей работоспособности и надежности. Твердость сердцевины таких деталей должна выдерживаться в пределах 29...43 HRC (такую твердость в сердцевине получают в легированных сталях) и иметь микроструктуру из низкоуглеродистого мартенсита или нижнего бейнита.

В заключение приведена характеристика некоторых реально применяемых марок цементуемых сталей:

– при средних нагрузках – стали 20, 15Х, 20Х, 15ХР, 18ХГН, 20ХФ (среднепрочные с пределом прочности порядка 700 МПа; ударная вязкость свыше 60 Дж/см²);

– при повышенных нагрузках – стали 12Х2Н4А, 20ХН3А, 20Х2Н4А (с прочностью ~ 950...1150 МПа);

– при больших статических и ударных нагрузках – стали 18ХН4МА, 18Х2Н4ВА (высокий комплекс механических свойств: предел прочности 1000...1200 МПа, ударная вязкость больше 60 Дж/см²).

Азотирование (нитрирование) – диффузионное насыщение поверхности деталей азотом при температуре 500...520 °С.

Азотирование осуществляют для повышения твердости, износостойкости и коррозионной стойкости изделий. Оно заключается в насыщении поверхностных слоев стали азотом при температуре 500–600 °С, в результате чего на поверхности стали образуется твердый раствор азота в железе, а также нитриды железа и легирующих элементов. Азотированию подвергаются изделия из углеродистых, но чаще легированных сталей с низким содержанием Cr, Al, Mo, W, V. Процесс проводят в течение 25–90 ч в герметичных камерах в присутствии аммиака. При нагревании аммиак разлагается с выделением азота, который и диффундирует в сталь. Толщина азотированного слоя составляет 0,3–0,6 мм, твердость 1000–1200 HV.

Детали, подлежащие азотированию с указанными ранее целями, изготавливают обязательно из сталей, легированных: Cr-Ni, Cr-Mo, Cr-Ni-W, Cr-Ni-Mo, Cr-Mo-Al и др. Легирующие элементы повышают твердость азотированного слоя (особенно алюминий). До азотирования детали еще в заготовках подвергают термическому улучшению: закалке и высокотемпературному отпуску на сорбит.

Азотирование проводят в специализированных печах в потоке аммиака NH₃. После азотирования термическая обработка не требуется, так как высокая твердость поверхностного слоя обеспечивается непосредственно в процессе азотирования и последующего медленного охлаждения. Твердость азотированного слоя в зависимости от марки стали колеблется в пределах 1000... 1300 HV (твердость поверхностного слоя после цементации 706... 830 HV). Глубина слоя – 0,25...0,45 мм (в отдельных случаях до 0,8 мм). Микроструктура азотированного

слоя (рисунок 4), если азотирование проводилось при температуре ниже $591\text{ }^{\circ}\text{C}$, состоит из ϵ , γ' и α фаз.

В процессе азотирования и последующем медленном охлаждении образуются еще зародыши нитридов, полностью когерентные с окружающей α -фазой.

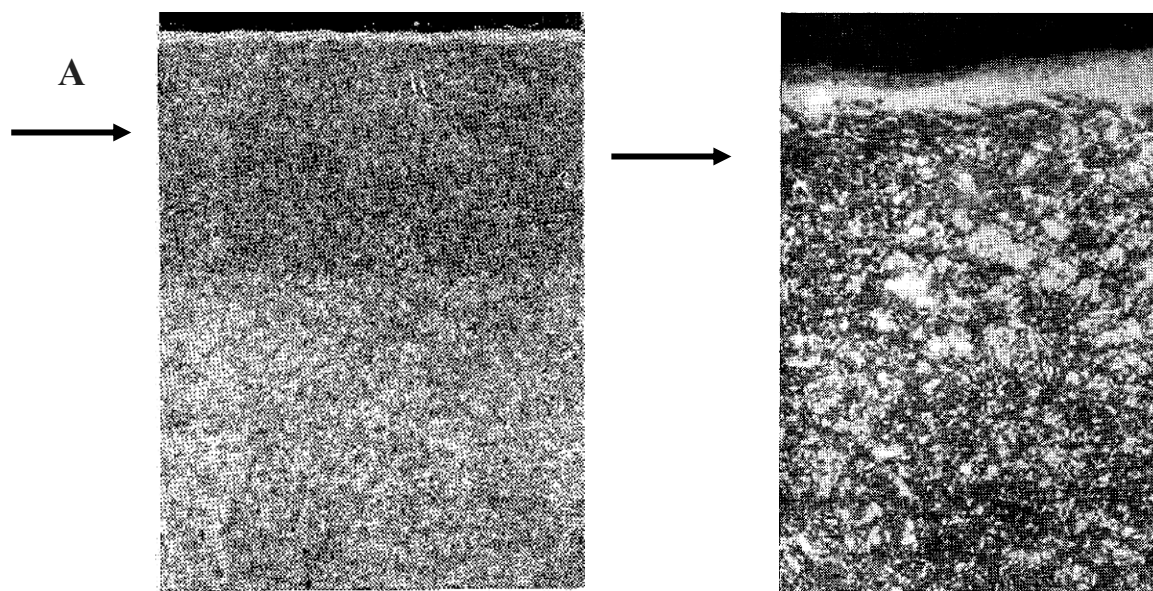


Рисунок 4 – Структура азотированного слоя (по стрелке А) с нитридной корочкой, $\times 100$ (а) и $\times 250$ (б)

Однако ϵ -фаза обладает чрезвычайно высокой (большой) хрупкостью. Поэтому в процессе азотирования стремятся не допускать образования ϵ -фазы.

Азотирование следует использовать для деталей, испытывающих высокие циклические нагрузки при умеренных контактных напряжениях и работающих в условиях трения скольжения (или абразивного износа), а также в случаях, когда требуется низкая склонность к задирам.

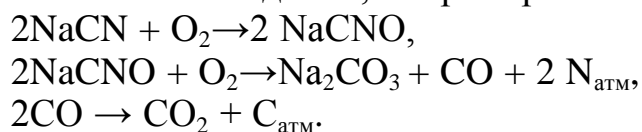
Положительное влияние азотирования тем сильнее, чем меньше размеры поперечного сечения деталей и больше в ней концентраторов напряжений. Контактная усталостная прочность у азотированных сталей ниже, чем цементованных, но выше, чем у сталей после закалки ТВЧ. Толщина азотированного слоя деталей, работающих с контактными нагрузками, должна быть не менее $0,45\text{...}0,5$ мм. Износостойкость азотированного слоя в $1,5\text{...}4$ раза выше износостойкости закаленных высокоуглеродистых сталей, а также цементованного слоя.

При азотировании практически отсутствуют объемные изменения и коробление деталей.

Недостатки азотирования – высокая хрупкость и малая толщина слоя, необходимо изготавливать детали из легированных сталей, длительность процесса наибольшая.

Цианирование и нитроцементация. Цианированием (нитроцементацией) называют совместное насыщение стали углеродом и азотом для повышения твердости и износостойкости поверхностного слоя. Цианирование проводят путем нагрева изделий в расплавах цианидов (NaCN , KCN , $\text{Ca}(\text{CN})_2$) и нейтральных со-

лей (NaCl, BaCl₂, Na₂CO₃ др.). Цианиды в процессе цианирования окисляются кислородом воздуха с выделением азота и углерода, диффундирующими в поверхностные слои изделий, например:



Различают три вида цианирования: низкотемпературное (540–560 °С), среднетемпературное (820–860 °С), высокотемпературное (920–960 °С). С ростом температуры возрастает количество углерода, диффундирующего в сталь. Так, цианированный слой, полученный при 840–860 °С, содержит углерода 0,6–0,7 %, азота 0,8–1,2 %, при температуре 930–960 °С – 0,8–1,2 % углерода и 0,2–0,3 % азота.

Время цианирования определяет толщину цианированного слоя и изменяется в широких пределах – от 0,5 до 6 ч.

Цианирование имеет некоторые преимущества перед цементацией: более короткое время для получения слоя заданной толщины, меньше деформация и коробление деталей сложной формы, более высокое сопротивление коррозии.

Недостатком цианирования является высокая стоимость и ядовитость цианистых солей.

Нитроцементация проводится в газовых смесях, твердых смесях и пастах.

Наиболее распространена газовая нитроцементация. Она проводится в газовой смеси, состоящей из науглероживающего газа (СО, триэтиламин) и аммиака. Температура нитроцементации зависит от ее вида: низкотемпературная 550–560 °С, высокотемпературная 850–930 °С. Структура нитроцементированного слоя состоит из мелкокристаллического мартенсита, мелких равномерно распределенных карбонитридов и 25–30 % остаточного аустенита. Высокое содержание аустенита обеспечивает хорошую прирабатываемость (например, шестерен). Твердость слоя после термической обработки составляет HRC 58–62. Нитроцементации подвергают сложные детали, склонные к короблению.

Борирование. Диффузионное насыщение поверхности металла соединениями бора в виде боридов железа Fe₂B и FeB применяют для повышения износостойкости и красностойкости деталей, в том числе работающих при повышенных и пониженных температурах, знакопеременных и ударных нагрузках или в агрессивных и абразивных средах. Борированию можно подвергать любые марки стали, его проводят в смеси борсодержащих порошков, паст, газов или в расплаве солей. Насыщающие смеси (расплавы, порошки и пасты) состоят из боронесущих соединений (карбида бора, бора аморфного, буры, боридов магния, борного ангидрида, тетрафторбората калия и т. д.), активаторов (фтористый натрий, хлористый натрий, фтористый аммоний и т. д.), восстановителей (окись алюминия, фтористый алюминий и т. д.) в различных композиционных сочетаниях. Как правило, насыщающие смеси можно использовать многократно (15–20 раз) без существенного корректирования их состава или с небольшой добавкой активаторов. Процесс ведется при температуре 900–930 °С, продолжительность борирования 3–4 ч. Толщина борированного слоя 0,1–0,2 мм, микротвердость 1200–1800 кгс/мм².

Диффузионная металлизация – это поверхностное насыщение стали алюминием (алитирование), хромом (термохромирование), кремнием (термосилицирование). Повышает жаростойкость, коррозионную стойкость, износостойкость и твердость изделий. Так, алитированная сталь приобретает высокую окислительную стойкость (до 850–900 °С), термохромированная сталь имеет высокую коррозионную стойкость в азотной кислоте, пресной и морской воде, окислительную стойкость ее до 800 °С, кроме того, хром повышает твердость и износостойкость стали. При силицировании сталь приобретает высокую коррозионную стойкость в морской воде, в азотной, серной и соляной кислотах и несколько повышенную устойчивость против износа.

Поверхностное насыщение стали металлами и кремнием проводят при температуре 900–1050 °С в течение 6–12 ч в соответствующих порошкообразных смесях (обычно ферросплавы и 0,5–5 % NH_4Cl), погружением в расплавленный металл (алюминий) или насыщением из газовой среды. При газовом методе чаще применяются летучие хлористые соединения металлов AlCl_3 , CrCl_3 , SiCl_4), образующиеся при воздействии хлористого водорода (или хлора) на металлы или их сплавы с железом при высоких температурах. Хлориды взаимодействуют с железом, и выделяющийся в атомарном состоянии металл диффундирует в железо.

Вопросы для самопроверки

1. Понятия химико-термической обработки, основные условия для проведения ХТО.
2. Характер процессов, протекающих при химико-термической обработке, влияние температуры, времени выдержки на свойства и структуру диффузионных слоев.
3. Какой процесс называют цементацией и какие конструкционные стали (указать содержание углерода) следует использовать для данного процесса?
4. Из каких соображений устанавливается величина концентрации углерода в насыщенном слое? Какова при этом микроструктура цементированного слоя после окончательной термической обработки?
5. В каких пределах может изменяться глубина слоя цементации?
6. Какой термической обработке подвергают цементированные детали, и с какой целью?
7. Каким образом можно улучшить вязкость сердцевинных деталей?
8. Назовите рекомендуемые соотношения твердости поверхностного слоя и сердцевинных в случае применения легированных сталей.
9. Какой процесс называют азотированием? Какие стали рекомендуется применять?
10. Назовите микроструктуру, уровень твердости и глубину азотированного слоя?
11. Какой термической обработке подвергают детали, назначаемые на азотирование?
12. За счет чего улучшается работоспособность деталей после цементации и азотирования?
13. Когда целесообразно применять цементацию и азотирование?
14. При какой обработке себестоимость упрочнения деталей ниже?
15. Какие достоинства и недостатки характерны для цементации и азотирования?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9 МИКРОАНАЛИЗ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Цель работы: получить практические умения и навыки и умения в области распознавания легированных сталей по микроструктуре.

Оборудование, приборы и материалы

1. Металлографические микроскопы МИМ-7 или ММУ-ЗМ.
2. Наборы микрошлифов различных марок конструкционных легированных сталей.
3. Альбомы с фотографиями микроструктур легированных сталей.

Методические указания по выполнению работы

1. К выполнению лабораторной работы допускаются студенты, хорошо усвоившие теоретическую часть, так как изучение структуры и фазового состава легированных сталей намного сложнее, чем углеродистых сталей.

2. Для каждого микрошлифа (вида сплава) необходимо:
 - записать марку сплава, определить, к какой группе по назначению относится сплав;
 - зарисовать структуру сплава, указав структурные составляющие;
 - указать вид термической обработки;
 - выписать химический состав сплава, конечные свойства (по ГОСТу);
 - указать области применения сплава и требования, предъявляемые к нему.

Содержание отчета

Отчет по лабораторным работам должен включать следующее:

1. Название, цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Рисунки микроструктур различных марок легированных сталей и сплавов (с разносом структурных составляющих). Указать увеличение микроскопа.
4. Для каждого микрошлифа (справа от рисунка) дать название, марку стали, структуру (указав вид термической обработки), класс стали по структуре, химический состав, свойства и области применения.
5. Рисунки выполнить карандашом.
6. Дать выводы о влиянии легирующих элементов на свойства изучаемых сталей.

Краткие теоретические сведения

Современная техника предъявляет весьма разнообразные требования к материалам. Одни изделия должны обладать высокой прочностью, как при низких, так и при высоких температурах, другие – устойчивы против коррозии, третьи – высокой термостойкостью и т. д. Большое число такого рода задач решается на основе применения легированных сталей. Применение легированных сталей взамен менее прочных углеродистых позволяет значительно снизить металлоемкость конструкций.

Легированными называют стали, содержащие в своем составе, кроме железа и углерода, специально введенные элементы и в таком количестве, которое способно изменить их строение, а следовательно, и свойства. Наиболее распространенными легирующими элементами являются:

Cr, Ni, Mn (>1,5%), Si (>0,5%), W, V, Mo, Ti, Al, Nb, Cu и др.

Легирующие элементы изменяют свойства фаз, из которых состоит структура стали. При взаимодействии легирующих элементов с железом образуются:

- легированные твердые растворы (феррит легированный, аустенит легированный, мартенсит легированный);
- интерметаллические соединения при высоком содержании легирующих элементов в стали: фазы Лавеса (MoFe_2 , NbFe_2) и др., сигма фаза FeCr , когда $\text{Cr} > 20\%$.

Атомы легирующих элементов, не образующие карбидов (никель, кремний, медь, кобальт), полностью растворяются в феррите или при температурах выше критических – в аустените, при этом изменяются свойства феррита и аустенита.

Карбидообразующие элементы – элементы, обладающие большим, чем железо сродством к углероду. По возрастанию сродства к углероду и устойчивости карбидов элементы располагаются в следующем порядке:

Fe– Mn– Cr– Mo–W–Nb–V– Zr–Ti.

Атомы карбидообразующих элементов растворяются в карбиде железа (цементите) при содержании хрома до 2 %, молибдена до 1 %, вольфрама до 0,2 % т. д., образуя легированный цементит. При большом количестве карбидообразующих элементов образуются специальные карбиды – первичные WC , TiC и другие или вторичные Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3 . Последние при нагреве выше критических точек растворяются в аустените. Устойчивые карбиды титана, циркония, ванадия, молибдена, вольфрама (первичные) сохраняются в структуре при нагреве до высоких температур, закрепляя дислокации.

В процессе закалки стали происходит превращение аустенита в мартенсит, что способствует сохранению высоколегированных твердых растворов, соответственно количество карбидов в сталях после закалки становится меньше, чем в отожженном состоянии.

По характеру влияния на критические температуры полиморфного превращения железа (A_3 и A_4) легирующие элементы можно разбить на две группы. К первой группе относят такие элементы как Ni, Mn, Cu, Pt, N и другие, имеющие кристаллическую решетку ГЦК. Они расширяют область аустенита (γ – область), а некоторые из них (например, Ni или Mn) при содержании в сталях в достаточном количестве могут снизить температуру превращения до оси концентрации (рисунок 1). В этом случае сплавы даже при медленном охлаждении могут иметь структуру аустенита легированного.

Другая группа элементов: хром, кремний, вольфрам, молибден, ванадий и другие, имеющих кристаллическую решетку ОЦК, ограничивают область существования γ – раствора (рисунок 2). При содержании таких элементов более 13 % сплавы теряют способность к переходу в аустенитное состояние и при всех температурах имеют строение α – твердого раствора: структура-феррит легированный.

Ферритные и аустенитные стали при нагревании не имеют вторичных превращений.

Легированный феррит и легированный аустенит прочнее соответствующих структур в углеродистых сталях.

Все легирующие элементы (кроме кобальта) уменьшают критическую скорость закалки $V_{кр}$, и поэтому легированные стали принимают закалку (т. е. приобретают структуру мартенсита) при меньших скоростях охлаждения (например, при охлаждении в масле или даже на воздухе).

Легирующие элементы способствуют измельчению зерна структуры, что значительно повышает прочностные характеристики сплавов и обеспечивают большую глубину прокаливаемости деталей, изготовленных из легированных сталей.

Легированным сталям присущи и определенные пороки; так называемое явление отпускной хрупкости; дендритная ликвация (устраняется диффузионным отжигом); образование флокенов.

Маркировка легированных сталей (каждый легирующий элемент обозначается буквой русского алфавита обозначения химических элементов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Обозначение легирующих элементов в марках легированных сталей

А – азот (N)	К – кобальт (Co)	Т – титан (Ti)
Б – ниобий (Nb)	М – молибден (Mo)	Ф – ванадий (V)
В – вольфрам (W)	Н – никель (Ni)	Х – хром (Cr)
Г – марганец (Mn)	Р – бор (B)	Ц – цирконий (Zr)
Д – медь (Cu)	С – кремний (Si)	Ю – алюминий (Al)

Первые цифры в обозначениях показывают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Цифры, идущие после буквы, указывают на примерное содержание данного легирующего элемента в целых процентах (при содержании элемента менее или около 1 % цифра отсутствует).

Например: сталь 12Х18Н10Т содержит в среднем 0,12 % С, 18 % Cr, 10 % Ni, 1 % Ti.

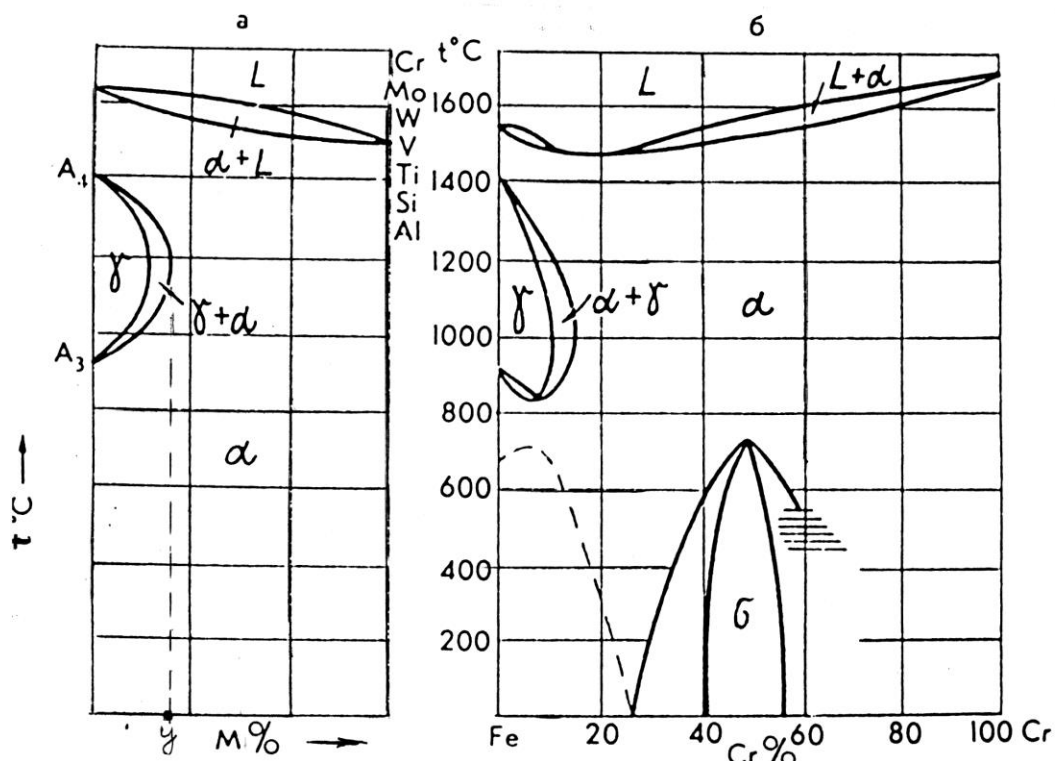


Рисунок 1 – Типовая диаграмма равновесия Fe – ЛЭ с замкнутой γ – областью диаграмма Fe – Ni (а), диаграмма Fe – Cr (б)

Буква в начале марки:

Е – магнитотвердая, ЕХЗ (углерода примерно 1 %, 3 % Cr);

Р – быстрорежущая, Р18 цифра показывает содержание вольфрама (18 % W);

Ш – шарикоподшипниковая, ШХ15 (~1,0 %С и 1,5 %Cr).

Буква А в конце марки показывает, что сталь высококачественная (15ХНЗА).

Классификация сталей по структуре в равновесном (стабильном) состоянии отличается некоторой условностью. Существует два вида классификации:

– по структуре после отжига;

– по структуре после нормализации (нагрева до температуры 900 °С и охлаждения на воздухе).

Необходимо отметить, что граница между доэвтектоидными, заэвтектоидными, ледебуритными легированными сталями проходит при меньшем содержании углерода, чем у углеродистых сталей, так как большинство легирующих элементов смещают точки S и E диаграммы состояния Fe – Fe₃C к меньшим концентрациям углерода. Так, например, при содержании в стали 0,6 % С и 5 % Cr она является заэвтектоидной, а сталь с тем же содержанием хрома и 1,5 % С – ледебуритной.

Легирующие элементы V, Ti, Nb сдвигают точки S и E вправо к большим концентрациям углерода.

Доэвтектоидные, заэвтектоидные и эвтектоидные стали независимо от структуры (дисперсности) эвтектоида обычно объединяют в один

класс – перлитные стали.

Таким образом, основываясь на фазовом равновесии, по структуре после отжига легированные стали делят на классы: перлитный, аустенитный, ферритный, ледебуритный (карбидный).

Классификация сталей по структуре после нормализации более условна, хотя удобна с практической точки зрения. По этой классификации стали делят на пять классов: перлитный, мартенситный, аустенитный, ферритный, ледебуритный. По структуре сталей можно судить и о их свойствах. Например, стали перлитного класса обладают небольшой твердостью и высокой пластичностью, а стали мартенситного класса весьма твердые и хрупкие. Примерный состав и класс некоторых сталей приведен в таблице 2.

1. Перлитный класс. К нему относят низколегированные стали с суммой легирующих элементов не более 5 % (например, 40Х, 30ХГСА, 30ХНЗА, 15ХСНД и др.), поэтому эти стали сравнительно недорогие. Стали перлитного класса в литом состоянии имеют крупнозернистую феррито-перлитную структуру (сорбитную, трооститную, бейнитную). Поэтому заготовки сначала подвергают отжигу (иногда нормализации) для уменьшения зерна и степени ликвации – образуется дисперсная феррито-карбидная структура.

2. Низкоуглеродистые стали.

Стали 09Г2С, 14Г2, 15Г2СФ и другие в виде листов сортового, фасонного проката применяют в машиностроении для сварных конструкций, в строительстве.

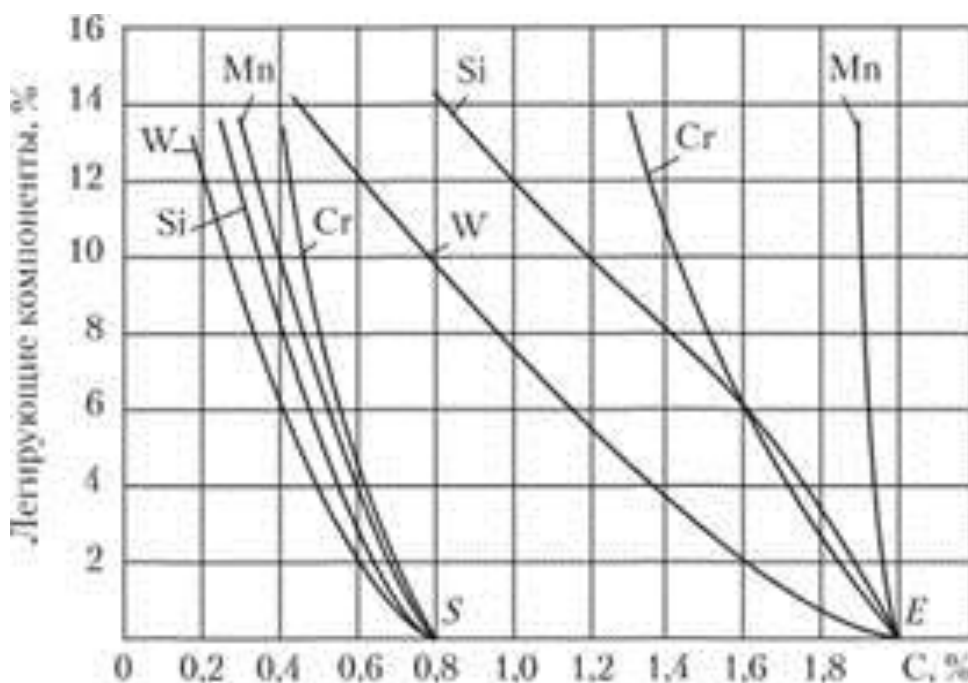


Рисунок 2 – Влияние легирующих элементов на точки S и E

Введение меди и никеля увеличивает коррозионную стойкость сталей в атмосферных условиях (стали 15ХСНД, 10ХНДП), понижает порог хладноломкости

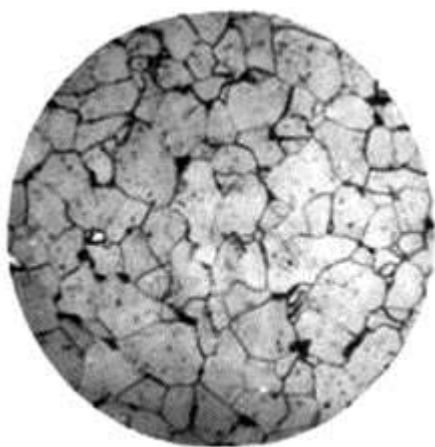
T₅₀. При взаимодействии ванадия с азотом (сталь 16Г2АФ) образуется карбонитрид ванадия, позволяющий получить сталь с очень мелким зерном (балл 10–12) – дисперсное упрочнение и низким порогом хладноломкости.

3. Судостроительные стали.

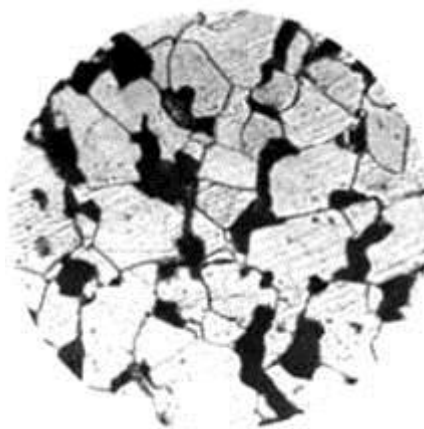
В данную категорию входят не только сплавы для корпусов надводных судов, но и для подводных кораблей и устройств, работающих на больших глубинах; морские плавучие буровые установки, стационарные морские платформы и др.

В судостроении широко применяются литейные стали для изготовления гребных винтов, рулей и других марок 08ГДНФЛ и 08Г2ДНФЛ.

Для высоконагруженных соединительных элементов опорных колон морских буровых установок, деталей механизма поворота плавучих кранов и других применяют высокопрочные хладостойкие сваривающиеся стали марок АБ – 1Л и АБ – 3Л.



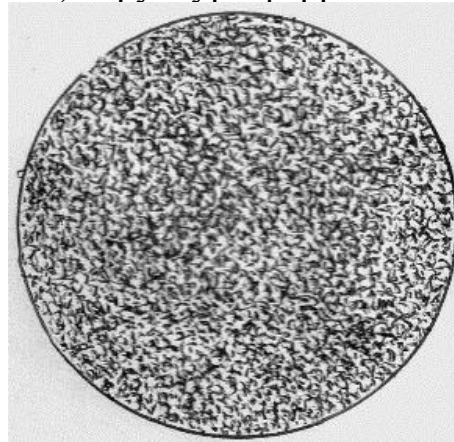
09Г2С – корпусная сталь (после отжига) структура феррит + перлит



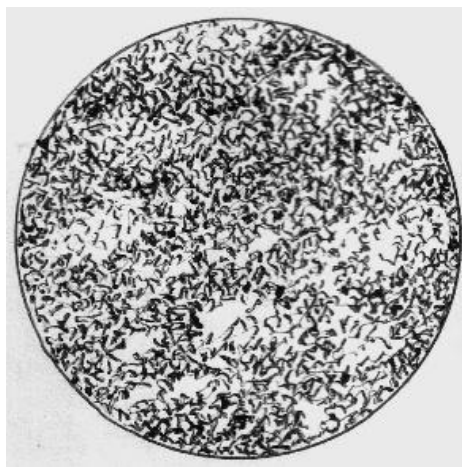
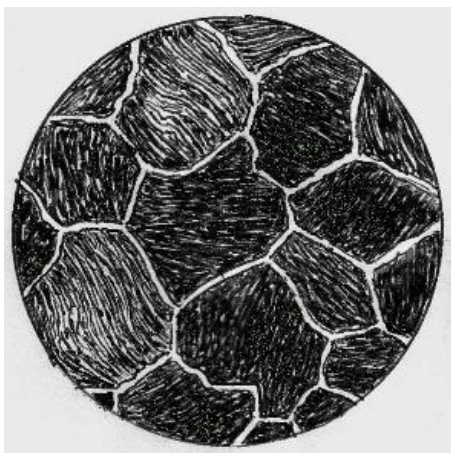
15ХСНД – строительная сталь (после отжига) структура феррит + перлит



Сталь 40ХМФА – улучшаемая сталь (после нормализации) структура феррит + перлит



Сталь 45ХН – конструкционная (после закалки и высокого отпуска) структура сорбит



Сталь ШХ6 – шарикоподшипниковая (после отжига) структура перлит + цементит

Сталь ШХ6 – шарикоподшипниковая (после закалки и отпуска низкого) структура мартенсит + карбиды Cr

Рисунок 3 – Микроструктура конструкционных легированных сталей

4. Цементуемые стали ($C \leq 0,25 \%$).

Цементацию широко применяют для деталей, работающих под действием динамических нагрузок в условиях поверхностного износа; стали подвергаются цементации, закалке, низкому отпуску. Эти стали 15X, 20X, 12ХН3А, 18ХГТ и другие применяют для деталей типа зубчатых колес, шестерен, червячных передач; участков валов, осей и др.

5. Улучшаемые стали.

Среднеуглеродистые стали (0,3–0,5 %) используют после улучшения (закалка, высокий отпуск) со структурой сорбит. Улучшаемые стали имеют высокую прочность, вязкость, малую чувствительность к концентраторам напряжений и хорошую прокаливаемость. Применяют для изготовления коленчатых валов, валов, осей, шатунов, штоков, зубчатых колес и др. К этой группе относят стали: 40X, 40ХН, 30ХГС, 40ХН2МА и др. Чем больше в стали легирующих элементов, тем выше ее прокаливаемость. Их применяют для деталей с большими сечениями. Для уменьшения закалочных напряжений охлаждение при закалке проводят в менее интенсивно действующих средах: минеральном масле и даже на воздухе.

6. Рессорно-пружинные стали (0.5–0.7 %C).

Основным требованием к сталям этой группы является высокое сопротивление малым пластическим деформациям (высокий предел упругости, высокий предел выносливости (σ_{-1} , σ_R) и повышенная релаксационная стойкость с сохранением упругих свойств в течение длительного времени.

Стали для пружин и рессор обычно легируют кремнием и марганцем в сочетании с другими элементами (65Г, 60С2, 70С3А, 60С2ХФА и др.). Термообработка: закалка, отпуск средний с получением структуры троостит. После термообработки изделие подвергают поверхностному наклепу (ППД): пружины – дробеструйной и гидроабразивной обработке, рессоры – обкатке, обжатию роликами. В поверхностных слоях создаются остаточные сжимающие напряжения, что увели-

чивает выносливость, предел же усталости повышается в 1,5–2,0 раза. Для работы в агрессивных средах пружины изготавливают из хромистых коррозионностойких сталей типа 40X13, 95X18 и др.

7. Мартенситный (перлитный) класс

Шарикоподшипниковые стали.

Основные требования: высокая износостойкость и выносливость при контактном циклическом нагружении (контактная выносливость $\sigma_{\text{Hlim B}}$), сопротивление контактной усталости и истиранию. Эти требования удовлетворяются, когда сталь обладает высокой твердостью и малым количеством металлургических дефектов.

После нормализации заэвтектоидные стали (ШХ15, ШХ9С, ШХ6 и др.) получают структуру сорбита с включениями вторичных карбидов. Изделия из этой стали (кольца, шарики и ролики подшипников качения) закаливают в масле от 820 – 840 °С, затем проводят низкий отпуск при 150 – 180 °С. После такой термообработки структура стали ШХ15 состоит из мелкоигльчатого мартенсита с включениями вторичных карбидов округлой формы.

Для подшипников, работающих в агрессивных средах, используются высокохромистые стали, содержащие около 1,0 % углерода, например, 95X18.

8. Инструментальные стали

К инструментальным относится большая группа сталей и сплавов, используемых для обработки материалов давлением, резанием.

Чаще всего инструментальные сплавы подразделяются по теплостойкости: нетеплостойкие, полутеплостойкие и теплостойкие.

В зависимости от их назначения стали делят на: стали для режущего инструмента, штамповые стали для холодного и горячего деформирования и стали для измерительных инструментов.

Инструментальные стали по химическому составу бывают углеродистые и легированные (низко- и высоколегированные); получают их либо обычным металлургическим переделом, либо методом порошковой металлургии (в том числе и твердые сплавы).

9. Нетеплостойкие легированные стали с повышенной прокаливаемостью.

К этой группе относят стали: 11ХФ, 9ХС, 13Х, ХВСГ, 9ХВГ, 7ХЗ и др. (Траб = 220–250 °С).

Введение Сг повышает прокаливаемость стали, стойкость к повышенным деформациям, повышает вязкость стали и уменьшает опасность растрескивания.

Ванадий тормозит рост зерна аустенита при нагреве стали под закалку.

Поэтому из этой группы сталей изготавливают инструмент большего диаметра, чем из углеродистых.

Из стали В2Ф, называемой «алмазной», изготавливают пилы по металлу. После термической обработки (3, Он) твердость составляет 62–64 HRC.

Таблица 2 – Состав и класс легированных сталей по структуре

Марка стали	Химический состав, %		Вид термической обработки (температура °С, среда)	Микроструктура	Класс стали в нормализованном состоянии	Примечание
	углерод	легирующие элементы				
09Г2С	≤ 0,12	1,45-1,70 Mn, 0,3 Cr, 0,3 Ni; 0,3 Cu; 0,7-1,0 Si	Отжиг	Феррит лег.+перлит	Перлитный	Корпуса судов
10ХСНД	≤ 0,12	0,8-1, 1 Si; 0,5-0,8 Mn; 0,6-0,9 Cr; 0,5-0,8 Ni; 0,4-0,65 Cu	Отжиг	Феррит лег.+перлит	Перлитный	Строительная с повышенной коррозионной стойкостью в атмосфере
18ХГТ	0,17-0,23	0,8-1,1 Mn, 1,0-1,3 Cr, 0,03-0,09 Ti	Ц, З, О _Н	Мартенсит + карбид (поверхностный слой)	Мартенситный	Зубчатые колеса, шестерни, червячные передачи и т. д.
40Х	0,36-0,44	0,5-0,8 Mn; 0,8-1,1 Cr 0,17– 0,37 Si	З 860 °С О _В 500 °С	Сорбит	Перлитный	Коленчатые валы, оси, шестерни
70СЗА	0,66-0,74	0,6-0,9 Mn; 2,4-2,8 Si 0,3 Cr, 0,2 Cu, 0,25 Cu	З 860 °С Ос 460 °С	Тростит	Перлитный	Пружины вагонов, автомобильные рессоры; торсионные валы в станкостроении
ШХ15	0,95-1,05	1,3-1,65Cr; 0,2-0,4Mn; 0,17-0,37Si	З 840-860 °С О _Н 150-170 °С	Мартенсит + карбиды	Мартенситный (перлитный)	Подшипники качения (кольца, шарики, ролики); решетки измельчителей мяса

Окончание таблицы 2

Марка стали	Вид термической обработки (температура °С, среда)	Механические свойства				
		σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	КСУ МДж/м ²	HRC (HB)
1	2	3	4	5	6	7
09Г2С	Нормализация	450-480	300-320	31	0,5-0,6	-
10ХСНД	Нормализация	600-620	40	16	0,4-0,5	-
18ХГТ	Ц, З, О _H	1000	900	9	0,8	60-65 (поверхностный слой)
40Х	З, О _B	1000	800	11	0,8	-
70С3А	З, О _C	1800	1600	10	2,4	-
ШХ15	З, О _H	2160	1670	-	0,5	60-63

10. Полутеплостойкие стали

К этой группе, в основном, относятся штамповые стали для холодного и горячего деформирования: X12BM, X12Ф1, X12BMФ, X6ВФ, 6XB2C, 5XHM, 5XGM, 5XHB и др.

11. Теплостойкие стали

Быстрорежущие стали: P9, P6M5, P18, P6M5K5, P12Ф4K5 и др. После термической обработки твердость у некоторых сталей достигает 68–70 HRC.

С повышением твердости возрастают износостойкость и предел выносливости стали, уменьшается налипание металла на инструмент и улучшается чистота обрабатываемой поверхности. Твердость этих сталей определяется не только содержанием углерода в мартенсите (0,3–0,4 %), но в большей степени дисперсностью карбидов типа MC , $M_{23}C_6$, M_7C_3 , которые присутствуют в количестве до 25–30 %, либо интерметаллидами типа Co_7W_6 .

Высокая теплостойкость быстрорежущих сталей ($T_{раб} = 600–650^\circ C$) обусловлена легированием W, Mo, V, Co.

В связи с высокой стоимостью быстрорежущих сталей из-за содержания большого количества W) встала проблема создания безвольфрамовых или маловольфрамовых сталей.

Технологический процесс изготовления инструмента из быстрорежущих сталей:

– литье. В структуре литой стали ледебуритная эвтектика, (рисунок б);

– горячая обработка давлением (ковка), происходит дробление эвтектики.

При недостаточной проковке наблюдается карбидная ликвация (строчечность), отсюда анизотропность свойств (рисунок б);

– отжиг изотермический при температуре 840–880 °C, получаем структуру перлит сорбитообразный, карбиды первичные (крупные), вторичные (мелкие), эвтектоидные (очень мелкие) (рисунок б).

Окончательная термообработка:

– закалка ($T_{нагрева} 1250–1290^\circ C$). Охлаждающая среда – минеральное масло.

Для избежания трещин применяют предварительный подогрев при 800 – 850 °C. Структура: мартенсит, содержащий 0,3–0,4 % °C, карбиды первичные, ~ 30% аустенита остаточного.

– отпуск низкий (3-кратный) при температуре 550–570 °C. При этом происходит дисперсионное твердение на вторичную твердость (выделяются карбиды хрома). Окончательная структура: мартенсит отпуска, карбиды первичные W, V, Mo, карбиды вторичные Cr.

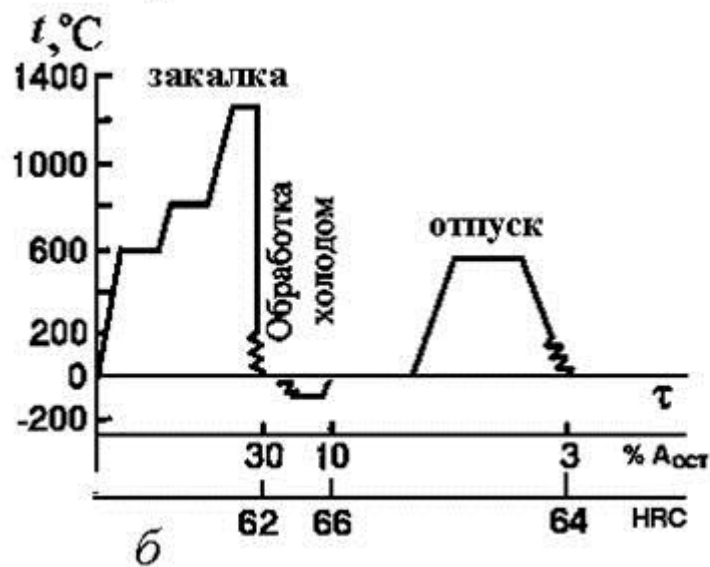
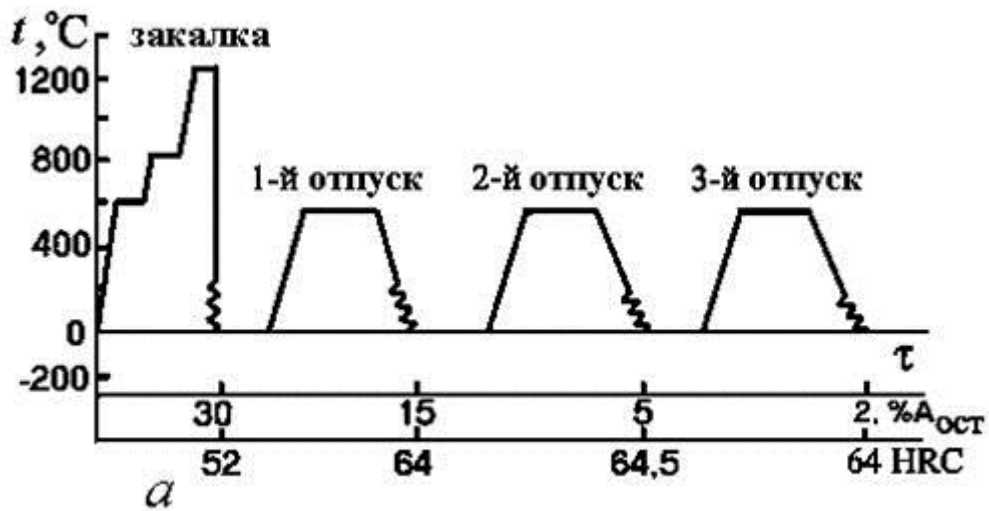
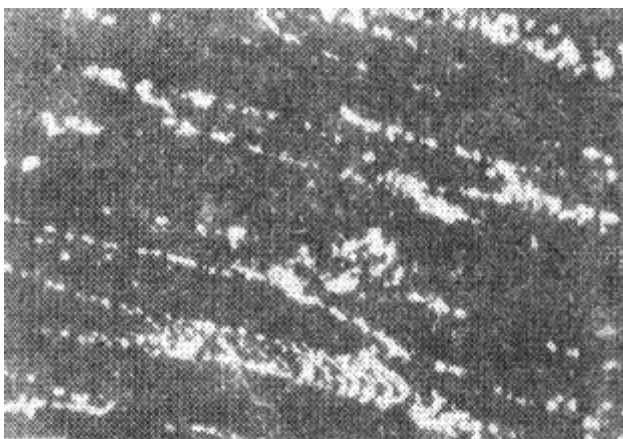
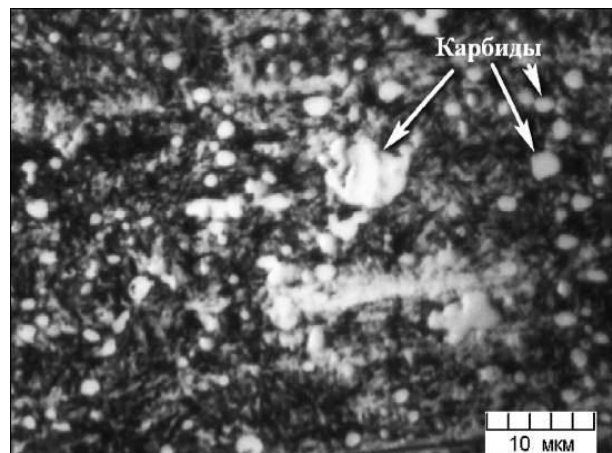


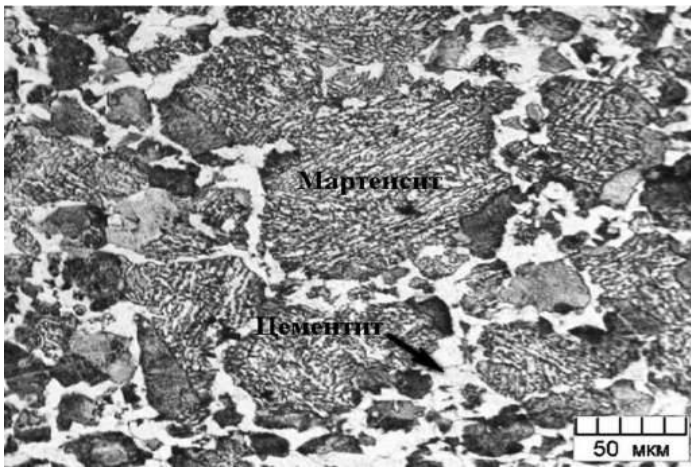
Рисунок 4 – Режимы термической обработки инструмента из быстрорежущей стали Р18: а) закалка и трехкратный отпуск; б) закалка, обработка холодом, отпуск



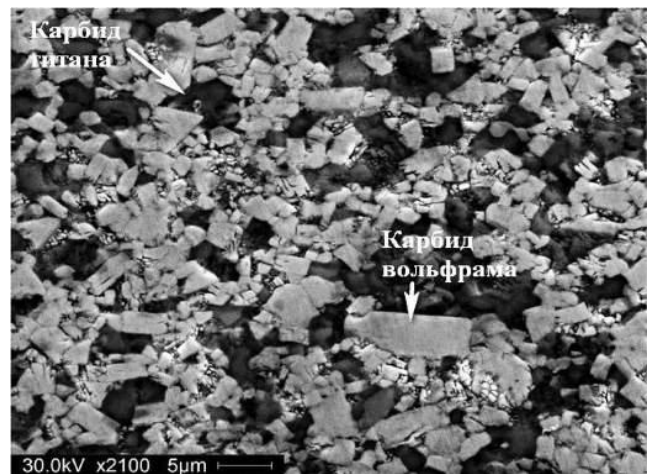
Сталь Х12М после закалки, структура мартенсит и полосчатые карбиды



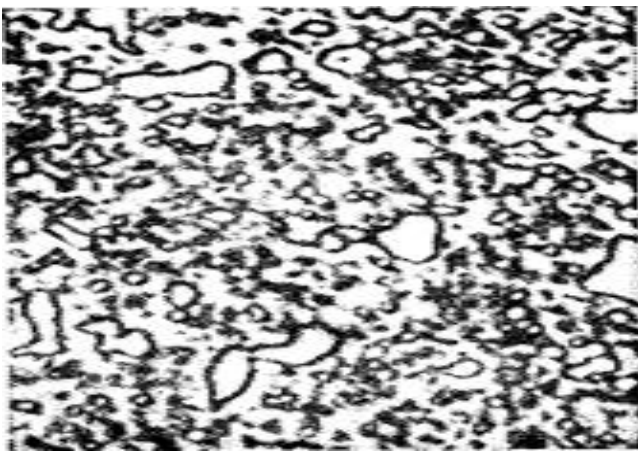
Сталь Р18 после закалки и однократного высокого отпуска, структура: мартенсит отпуска, карбиды (светлые включения)



Инструментальная сталь ХГТ (после закалки и низкого отпуска) структура – мартенсит отпуска и легированный цементит (светлая сетка)



Твердый сплав Т5К10: светлые частицы – карбид вольфрама, темные – карбид титана, связующая – кобальт



Литая стали Х12Ф1 структура – сорбито-образный перлит



Литая стали Х12Ф1 структура – ледебуритная эвтектика скелетного типа, вторичные карбиды, аустенит,

Рисунок 5 – Микроструктура инструментальных легированных сталей

Сталь 11М5Ф (характеризуется отсутствием эвтектических карбидов) имеет практически аналогичные свойства по сравнению со сталью Р6М5, но меньшую чувствительность к обезуглероживанию.

Методами повышения качества быстрорежущих сталей являются:

1. Электрошлаковый переплав (ЭШП). Стойкость инструмента из этой стали возрастает в два раза.

2. Метод порошковой металлургии. Порошковые стали характеризуются малыми объемными деформациями, хорошо шлифуются, улучшается качество обрабатываемых поверхностей. Стойкость инструмента повышается в 1,5–2 раза.

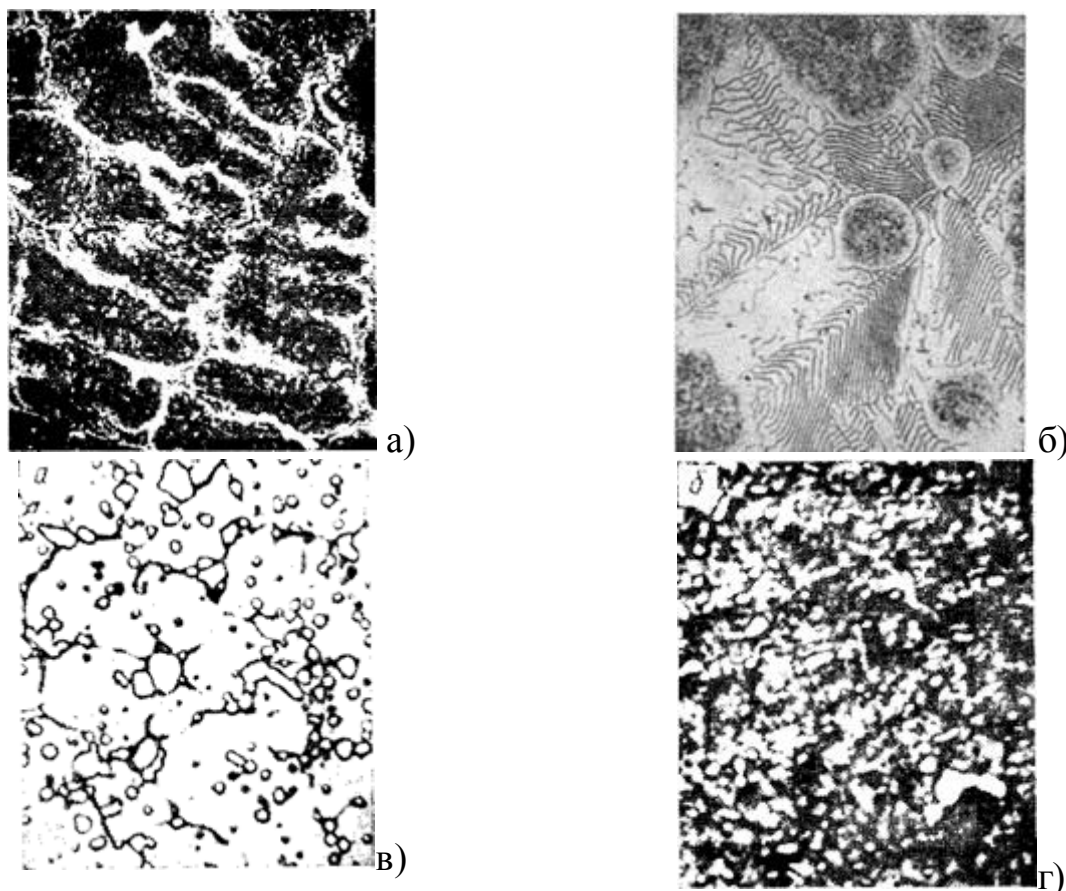


Рисунок 6 – Микроструктура литой стали P6M5 и P18 (дендриты сорбитообразного перлита, карбиды вторичные, ледебуритная эвтектика и аустенит по границам дендритных ячеек):
a – P6M5, $\times 200$; *б* – P18, $\times 900$; *в* – P18 закаленная (аустенит остаточный);
г – P18 мартенсит закалки карбиды легирующих элементов

Твердые сплавы

Твердые сплавы – материалы, состоящие из высокотвердых и тугоплавких карбидов вольфрама, титана, тантала с металлической связкой, полученные методами порошковой металлургии. Увеличение содержания металлической связки порошка кобальта вызывает снижение твердости, но повышает прочность и вязкость сплава. Сплавы получают спеканием порошков карбидов с порошком кобальта при 1400–1550 °С после предварительного прессования.

Твердые сплавы широко применяются в металлообработке (70 % всей стружки снимается с помощью твердосплавного инструмента). Однако увеличение доли труднообрабатываемых материалов, использование станков с ЧПУ, многоцелевых станков, гибких производственных систем – ГПС, требует повышения физико-механических свойств, что достигается усовершенствованием технологии изготовления, применением легирующих элементов тантала (Ta), хрома (Cr), ниобия (Nb), рения (Re).

Твердые сплавы сочетают высокую твердость 74–76 HRC (85–97HRA), высокий модуль упругости (до $6,8 \cdot 10^5$ МПа), предел прочности на сжатие (до 6000 МПа), износостойкость с высокой теплостойкостью (800–1000°С). Скорость резания твердыми сплавами в 5–10 раз выше, чем при применении быстрорежущих

сталей. Главными недостатками твердых сплавов являются их хрупкость, трудность механической обработки, сложность изготовления фасонных изделий.

Твердые сплавы производят в виде пластин, которые механическим способом или медным припоем крепят на державке режущего инструмента.

Инструмент с твердосплавными пластинами применяют в наиболее тяжелых условиях резания с максимальными скоростями.

В зависимости от состава карбидной основы твердые сплавы подразделяются на вольфрамовые, титановольфрамовые, титанотанталовольфрамовые.

1. Вольфрамовые сплавы (система WC-Co) ВКЗ – ВК8 применяют для режущих инструментов при обработке материалов, дающих прерывистую стружку (чугуна, цветных металлов, керамики, фарфора и т. д.). Сплавы ВК10 и ВК15, обладающие более высокой вязкостью, используют для волочильных досок и буровых инструментов.

Сплавы ВК20 и ВК25 применяют для изготовления штамповых инструментов. Теплостойкость этой группы сплавов до 800 °С.

2. Вторую группу образуют сплавы системы TiC – WC – Co. Сплавы отличаются более высокой теплостойкостью (900 – 1000 °С). Их применяют для высокоскоростного резания сталей (Т30К4).

3. Сплавы третьей группы (система TaC – TiC – WC – Co): ТТ7К12, ТТ8К6 отличаются большей прочностью и лучшей сопротивляемостью вибрациям и выкрашиванию. Их применяют для наиболее тяжелых условий резания (черновая обработка стальных слитков, отливок, поковок).

12. Эффективность применения материалов с износостойкими покрытиями.

Повышение стойкости режущего инструмента достигается нанесением на его рабочие поверхности износостойких покрытий (Пк).

Наиболее перспективными являются газофазный метод и КИБ. За рубежом практически единственным является газофазный (конденсация газообразных соединений с образованием твердых осадков).

Методом КИБ наносятся Пк из нитрида титана, газофазным методом – Пк из карбида титана (TiC).

Срок службы пластин из твердых сплавов с Пк повышается в 3–4 раза.

Для повышения же износостойкости, долговечности, стойкости режущего инструмента, не подвергающегося переточке, из быстрорежущих сталей применяют низкотемпературное цианирование, азотирование, нитроцементацию с последующим оксидированием. В последние годы все шире находит применение ионное азотирование.

13. Материалы для режущего инструмента.

Режущий инструмент (резцы, сверла, метчики, плашки и др.) в процессе эксплуатации находится в сложнапряженном состоянии, подвергаясь динамическим изгибающим и крутящим нагрузкам, износу, разогреву вследствие выделения тепла при трении об обрабатываемый материал.

В готовых инструментах для обеспечения длительной и надежной работы материал должен обладать:

– высокой твердостью и износостойкостью (чаще 63–66 HRC) – а для резания более твердых и труднообрабатываемых материалов 66–69 HRC. Такая же высокая твердость, но в тонком поверхностном слое (после азотирования или цианирования), должна быть у большинства инструментов для резания конструкционных сталей и чугунов;

– высокой прочностью и сопротивлением пластической деформации, а при преобладании динамических нагрузок при резании – возможно лучшей вязкостью;

– теплостойкостью, т. е. способностью сохранить твердость и режущие свойства при длительном нагреве в процессе работы.

Наряду со свойствами, определяющими работоспособность инструмента, весьма важны технологические характеристики материалов: пластичность сталей в холодном и горячем состоянии, свариваемость (для составного инструмента), обрабатываемость резанием, прокаливаемость, закаливаемость, несклонность к росту зерна аустенита и обезуглероживанию при нагреве под закалку, шлифуемость.

Для резания конструкционных сталей и чугунов с твердостью до 220–230 НВ применяют стали полутеплостойкие. Использование сталей повышенной теплостойкости рационально в случаях:

1. Повышения скорости резания с 40–50 до 70–80 м/мин – применяются кобальтовые стали;

2. Резания с обычной скоростью, но необходима повышенная износостойкость (протяжки, развертки) – применяют высокованадиевую сталь Р12Ф3 или сталь 10Р8М3. При этом износостойкость инструмента повышается на 50–60 %;

3. Для инструментов, от которых требуется длительная стойкость (автоматические линии), нужны сталь 10Р8М3 или кобальтовые стали с повышенным содержанием углерода высокой твердости 66–68 HRC и износостойкости.

Для резания улучшенных конструкционных сталей с твердостью 30–45 HRC, аустенитных жаропрочных сталей, а также нержавеющей сталей и сплавов нужны стали повышенной теплостойкости.

14. Материалы для штампов холодного деформирования

К этой группе отнесены штампы, т. е. инструменты, изменяющие форму материала без снятия стружки.

В зависимости от операции холодного деформирования (резка, гибка, вытяжка, формовка, объемная штамповка) и применяемого оборудования (гидравлические, механические, чеканные прессы, холодновысадочные автоматы и пр.) условия работы штампового инструмента существенно различаются. В наиболее тяжелых условиях инструмент работает при объемной штамповке и вырубке (высокие удельные давления, разогрев до высоких температур).

Использование ударного нагружения при штамповке на чеканных прессах и холодновысадочных автоматах также ухудшает условия работы инструмента.

Основными причинами выхода из строя тяжело нагруженных штампов для холодного деформирования являются хрупкое разрушение от высоких циклических напряжений (усталость) и изменение геометрических размеров инструмента вследствие износа и смятия.

В зависимости от конструкции и назначения штампа определяющее значение приобретают различные свойства. Так, для вырубных штампов наиболее важны прочность, вязкость и износостойкость, а для штампов холодного прессования, работающих плавно, но с повышенным разогревом, необходимы высокая теплостойкость и сопротивление малым пластическим деформациям, при этом вязкость может быть пониженной.

Стали для штампов холодного деформирования должны обладать:

- высоким сопротивлением пластической деформации (смятию) при высоких удельных давлениях (до 2200–2500 МПа и выше), что достигается за счет высокой твердости 52–60 HRC и оптимальной структуры, содержащей избыточную карбидную фазу;

- достаточной вязкостью, обеспечивающей высокое сопротивление хрупкому и усталостному разрушению при динамических нагрузках;

- теплостойкостью (до 400–500 °С) при тяжелых условиях штамповки.

Штампы холодного деформирования изготавливают с высокой точностью, они могут быть весьма сложными и крупными, поэтому стали для их изготовления должны иметь удовлетворительные технологические характеристики: обрабатываемость резанием и шлифуемость, закаливаемость и прокаливаемость, устойчивость против обезуглероживания, малую деформируемость при термической обработке.

Так, для штампов холодного прессования применяют стали X12M, X12Ф1, X12ТФ и др. Для вырубных и отрезных штампов используют стали X6ВФ, X12ВМ и т. д. Термообработка сталей этой группы: закалка, отпуск низкий с получением структуры мелкоигольчатого мартенсита и карбидов легирующих элементов.

15. Стали для штампов горячего деформирования

Основную массу штампов изготавливают в инструментальных цехах машиностроительных заводов в условиях штучного или мелкосерийного производства. Штампы изготавливают цельными или сборными. Конструкции штампов зависят от их назначения (отрезные, прошивные, для объемной штамповки, накатки, высадочные и т. д.), способа нагружения (молотовые, прессовые и т. д.) и других факторов.

Штампы горячего деформирования работают в весьма жестких условиях, для которых характерны: высокие действующие напряжения, уровни которых приближаются к пределам текучести штамповых сталей; высокие температуры нагрева; циклическое действие напряжений от знакопеременных усилий при деформации; термические напряжения, определяемые условиями нагрева и охлаждения штампов.

Поэтому стали для производства штампов горячего деформирования должны обладать следующими механическими и технологическими свойствами: высокой теплостойкостью (до 600–700 °С); высокой вязкостью, определяющей высокое сопротивление стали хрупкому разрушению после термической обработки на твердость HRC 45–50; сопротивлением термической усталости (разгаростойкостью); окалиностойкостью и сопротивлением коррозии под напряжением; тепло-

проводностью и низким коэффициентом теплового расширения; прокаливаемостью, так как многие штампы имеют большие размеры; технологическими свойствами (минимальной деформируемостью при термической обработке, устойчивостью против обезуглероживания, удовлетворительной обрабатываемостью резанием и шлифуемостью).

Для изготовления штампов горячего деформирования используют легированные стали, содержащие 0,3–0,6 % С, которые после закалки и отпуска имеют структуру троостита или троостосорбита.

Стали для молотовых штампов: 5ХНМ, 5ХГМ, 5ХНВ и др., для штампов горизонтально-ковочных машин и прессов: 3Х2В8Ф, 4Х5МФС и др.

Термообработка сталей этой группы: закалка отпуск средний с получением структуры троостит.

Для изготовления пресс-форм при литье металлов под давлением применяют стали 4Х4ВМФС или 3Х2М2Ф.

16. Стали для измерительного инструмента.

Стали, применяемые для изготовления измерительного инструмента, должны обладать высокой твердостью, износостойкостью, способностью сохранять точные размеры и форму в течение длительного времени, хорошей шлифуемостью.

Обычно используют заэвтектоидные высокоуглеродистые хромистые стали Х, ХВГ, 12ХГ. Закалку проводят с более низкой температуры (обычно с 850–870 °С), и для более полного превращения аустенита в мартенсит применяют обработку холодом при -70 °С непосредственно после закалки.

Шаблоны, лекала, шкалы, измерительные скобы и другие плоские инструменты лучше изготавливать из низкоуглеродистых листовых сталей 15, 20, 15Х, 20Х, подвергаемых цементации, закалке и низкому отпуску.

Таблица 3 – Режим термической обработки и механические свойства некоторых инструментальных сталей

Марка ста- ли	Закалка				Балл зерна	Отпуск		$\sigma_{изг}$ МПа	КСУ, МД ж/м ²
	T _п , °С	T _а , °С	Охлаждающая среда	HRC		T, °С	HRC		
P18	800-850	1270-1290	Масло	63-65	10-11	560-570 (3– кратный)	62	2600-3000	-
P6M5	800-850	1200-1230	То же	64-65	10-11	555-565 (3– кратный)	63	3200-3600	-
P6M5K5	800-850	1210-1240	- -	65-66	10-11	540-560 (3– кратный)	63	2600-3000	-
XBCГ	-	830-850	- -	56-58	10	140-200	58-63	-	-
XBG	-	850-870	- -	58-60	10	140-200	60-64	-	-
X12M	650-700	1000-1030	- -	63-65	10-11	190-210	60-62	2550-2700	0,4
X6BФ	650-700	980-1000	- -	63-65	11	150-170	62-63	2600-3100	0,9
5XHM	700-750	840-860	- -	56-60	-	500-550	38-41	$\sigma_{0,2} = 1400-1450$	0,33-0,37
4X4BMФC	700-750	1050-1070	- -	55-61	10	620-630	47-50	$\sigma_{0,2} = 1600-1650$	0,3-0,4
3X2B8Ф	700-750	1070-1100	- -	48-52	10	600-620	42-48	$\sigma_{0,2} = 1350-1450$	0,20-0,25

Таблица 4 – Химический состав инструментальных сталей, применение

Марка стали	Химический состав %								Назначение
	C	Mn	Si	Cr	W	Mo	V	Co	
1. Нетеплостойкие стали повышенной прокаливаемости									
ХВСГ	0,95-1,05	0,60,-0,90	0,65-1,00	0,60-1,1	0,50-0,8	-	0,05-0,15	-	Крупные плашки
ХВГ	0,90-1,05	0,80-1,10	0,10-0,40	0,90-1,20	1,20-1,60	≤0,30	-	-	Протяжки длинные, метчики и развертки, холодно-высадочные матрицы, пуансоны
2. Стали высокой теплостойкости									
P18	0,73-0,83	≤0,40	≤0,50	3,80-4,40	17,0-18,5	<1,00	1,0-1,4	-	Метчики, резьбовые фрезы (шлифуемые небольшого диаметра)
P6M5	0,82-0,88	≤0,40	≤0,50	3,80-4,40	5,5-6,5	5,0-5,5	1,7-2,1	-	Метчики, протяжки, фрезы сверла
P6M5K5	0,80-0,88	≤0,50	≤0,50	3,8-4,3	5,7-6,7	4,8-5,3	1,7-2,2	4,8-5,3	Развертки, протяжки, зенкеры повышенной стойкости для обработки конструкционных сталей
3. Стали для штампов холодной штамповки									
X12M	2,0-2,2	0,15-0,45	0,10-0,40	11,0-12,5	-	0,6-0,9	0,15-0,30	-	Штампы холодной штамповки
X6BΦ	1,05-1,15	0,15-0,40	0,15-0,35	5,5-6,5	1,1-1,5	-	0,5-0,8	-	Штампы холодной штамповки
4. Стали для штампов горячей штамповки									
5XHM	0,50-0,60	0,50-0,80	0,10-0,40	0,50-0,80	-	0,15-0,30	-	1,4-1,8 Ni	Крупные молотовые штампы
4X4BMΦC	0,37-0,44	0,2-0,50	0,60-1,00	3,2-4,00	0,8-1,2	1,2-1,5	0,6-0,9	-	Штампы горячей штамповки
3X2B8Φ	0,30-0,40	0,15-0,40	0,15-0,40	2,2-2,7	7,5-8,5	-	0,2-1,2	-	Штампы, формы литья под давлением цинковых, магниевых, алюминиевых сплавов

Таблица 5 – Твердые сплавы (материалы с твердостью HV 1500-2000)

Марка сплава	Химический состав, %				Твердость HRA	Прочность $\sigma_{изг}$, МПа	Назначение
	WC	TiC	TaC	Co			
1. Вольфрамокобальтовые сплавы							
ВК3	97	-	-	3	89	1100	Точение чистовое (непрерывное резание) чугуна. Обработка стекла, резины, пластмасс.
ВК6М	94	-	-	6	90	1350	Обработка аустенитных сталей и сплавов, твердых чугунов и неметаллов
ВК20	80	-	-	20	84,5	1900	Штампы и детали при повышенном износе и небольших ударных нагрузках.
2. Вольфрамтитанокобальтовые							
T15K6	79	15	-	6	90	1150	Точение чистовое (непрерывное), фрезерование
T5K15	83	5	-	12	87	1600	
3. Вольфрамтитанотангалокобальтовые							
ТТ8К6	86	5	-	6	90,5	-	Точение, строгание при больших нагрузках; черновая обработка слитков, отливок, поковок

17. Коррозионностойкие стали

Основным легирующим элементом в этих сталях является хром. При его содержании 12–14 % электрохимический потенциал скачком из $-0,6$ В переходит в $+0,2$ В (рисунок 7), на поверхности образуется защитная плотная пленка оксида Cr_2O_3 .

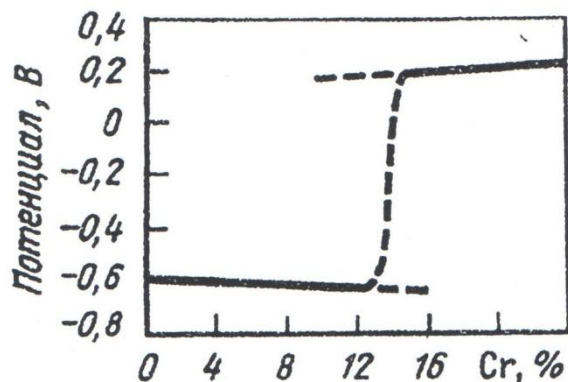


Рисунок 7 – Влияние содержание хрома на изменение электрохимического потенциала стали

Коррозионностойкие стали в зависимости от содержания углерода и хрома могут относиться к разным классам.

К ферритному классу относятся сталь 08X13. Рост зерна при высокотемпературном нагреве, например, при сварке в зоне термического влияния ограничивает применение в сварных конструкциях.

Стали 20X13, 30X13, 40X13 являются сталями мартенситного класса, они претерпевают полное $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращение и закаливаются на мартенсит при охлаждении на воздухе благодаря малой критической скорости заковки.

Термическая обработка хромистых нержавеющей сталей в зависимости от назначения состоит в закалке и высоком ($600\text{--}750$ °С) отпуске, либо в закалке и низком ($250\text{--}350$ °С) отпуске.

а) Высокий отпуск проводят для деталей равномерно нагруженных по всему сечению (валы, штоки, пружины).

б) Низкий отпуск — для изготовления пар трения, испытывающих большую контактную нагрузку (втулки, шестерни, червяки, режущий, хирургический инструмент).

Низкотемпературный отпуск не оказывает влияния на коррозионную стойкость стали.

Ферритные стали подвергают отжигу при температуре $700\text{--}800$ °С для получения однородного твердого раствора и увеличения коррозионной стойкости. Из сталей марок 12X17, 15X25Т, 15X28 изготавливают оборудование для предприятий пищевой промышленности, трубы теплообменной аппаратуры и т.д. Сталь 95X18, относящаяся к мартенситному классу, используют для изготовления подшипников качения, работающих в агрессивных средах, дисковых ножей рыбоперерабатывающих машин и т. д.

18. Аустенитные. Хромоникелевые стали.

Хромоникелевые стали аустенитного класса из-за наличия никеля дороже хромистых сталей, но обладают сочетанием очень ценных свойств: высокой коррозионной стойкостью, жаропрочностью и жаростойкостью, хорошей технологичностью. Высокую коррозионную стойкость этим сталям обеспечивает хром, содержание которого составляет 18 %. Никель вводится в количестве 9–12 %, что переводит сталь в аустенитный класс.

Сталь с однофазной аустенитной структурой имеет более высокую коррозионную стойкость, применяется в пищевой промышленности в изделиях, контактирующих с пищевыми средами (емкости, трубопроводы и т. д.). Из них изготавливают теплопередающие трубы различных диаметров, коллекторы.

Склонность к хрупким разрушениям хромоникелевых аустенитных сталей практически отсутствует, благодаря чему они используются в криогенной технике до температуры – 253 °С.

Для нержавеющей Cr-Ni сталей, имеющих высокую стойкость против общей коррозии, опасность представляет межкристаллитная коррозия (МКК). Она заключается в избирательном разрушении по границам зерен контактирующего с агрессивной средой металла: выпадение из γ – твердого раствора по границам зерен карбидов хрома $Cr_{23}C_6$ при нагревании в температурном интервале 550 – 650 °С.

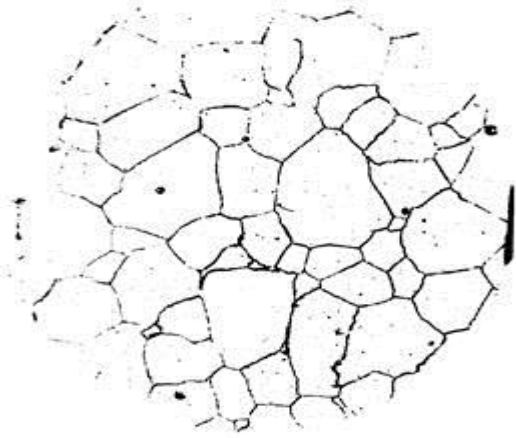
Для предотвращения межкристаллитной коррозии (МКК) в сталь вводят более сильно карбидообразующие элементы Ti, Nb.

Термообработка сталей: закалка в воде из аустенитной области с температуры 1000 °С. При нагревании происходит растворение карбидов хрома, а быстрое охлаждение фиксирует гомогенный γ – твердый раствор.

Структура сталей этого класса под микроскопом представляет крупные полиэдрические зерна аустенита, в которых наблюдаются двойниковые прослойки. Наиболее распространенная сталь этого класса 12X18H10T.

Упрочнение этих сталей проводят методами холодной обработки (холодная прокатка, наклеп дробью).

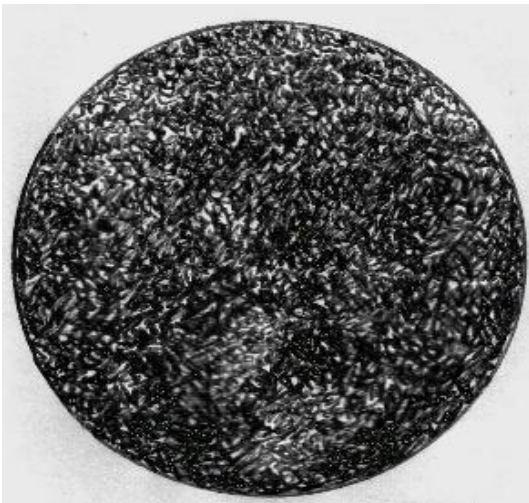
Никель (Ni) способствует повышению удельной ударной вязкости КСУ и снижает порог хладноломкости T_{50} , поэтому эти стали применяют в криогенной технике.



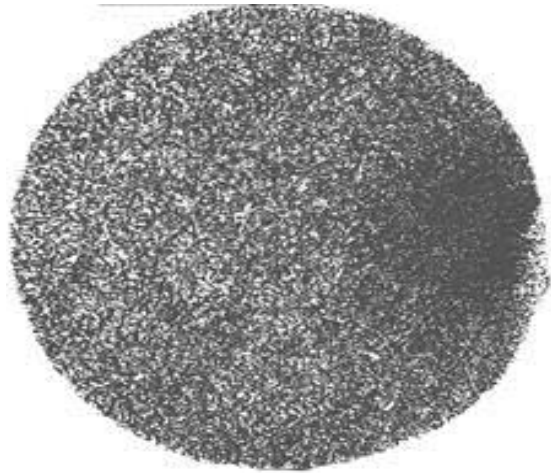
Нержавеющая сталь X28. Отжиг при 780 °С. Хромистый феррит. х 450



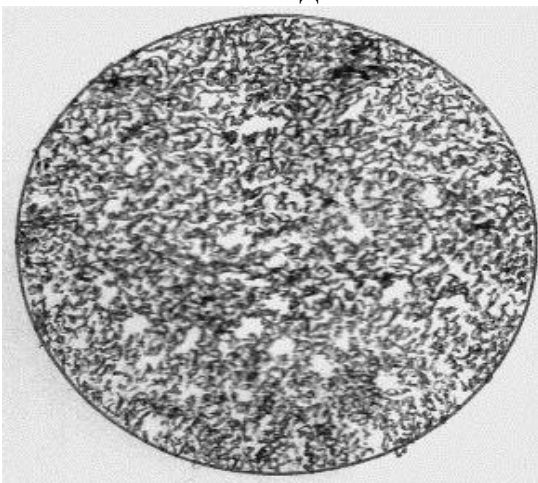
Нержавеющая сталь X18H9T. Закалка с 1080 °С в воде. Хромоникелевый аустенит. х 450



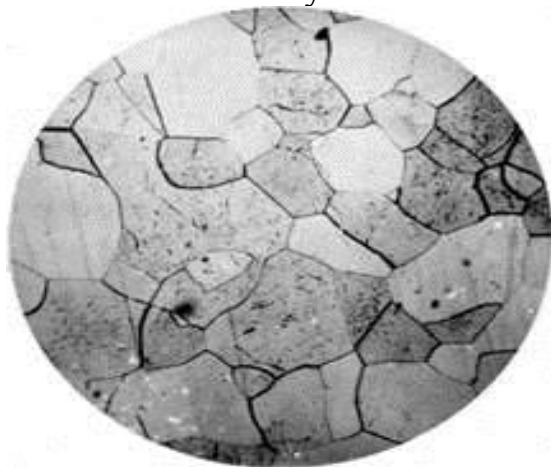
Магнитотвердая сталь EX3 после закалки, отпуска низкого. Мартенсит + карбиды Cr



Жаростойкая сталь 40X9C2 после закалки и отпуска высокого. Сорбит отпуска



Сталь 40X13 после закалки после закалки, отпуска низкого. Мартенсит + карбиды Cr



Сталь 2111 после отжига. Феррит легированный

Рисунок 8 – Микроструктура легированных сталей с особыми свойствами

19. Жаростойкие стали.

Способность металла сопротивляться химической коррозии в сухой газовой, жидкой среде (бензин, масло и др.) не проводящей электрический ток, при высоких температурах называется жаростойкостью или окалиностойкостью. Основным фактором, влияющим на жаростойкость, является химический состав сплава, защитные свойства оксидной пленки металла.

Хром, алюминий, наряду с кремнием используют для повышения жаростойкости легированных сталей. Основным легирующим элементом является хром (Cr), сумма же Al и Si не превышает 4 %.

С повышением содержания Cr повышается жаростойкость: 15X5 – окалиностойкость до 600 °С, 40X9C2 – до 860 °С, 08X17T – до 900 °С, 12X18H9T – 800–850 °С и т. д.

Стали используются для малонагруженных деталей печей, труб и др.

20. Жаропрочные стали.

Жаропрочность – это способность материала сопротивляться пластическому деформированию и разрушению под действием длительных механических нагрузок при высоких температурах. В таких условиях нагружения работают детали современных паросиловых установок и газовых турбин (лопатки турбин, диски, компрессоры), клапаны моторов.

В зависимости от легирования аустенитные жаропрочные стали делятся на следующие группы:

- однофазные аустенитные стали (08X18H10T, 12X18H10T и др.);
- аустенитные стали с карбидным упрочнением;
- аустенитные стали с интерметаллидным упрочнением.

Жаропрочность аустенитных сталей обеспечивается структурой аустенита, так как решетка ГЦК Fe_γ характеризуется прочными межатомными связями и малой скоростью диффузии атомов железа. Рассмотренные выше коррозионностойкие аустенитные хромоникелевые стали широко используются и как жаропрочные. Но еще более высокую жаропрочность дает дополнительное карбидное или интерметаллидное упрочнение стали.

Из жаропрочных аустенитных сталей с карбидным упрочнением, предназначенных для работы при температурах 650–700 °С, изготавливают ответственные детали энергомашиностроения: диски, лопатки турбин, крепежные детали и др.

В структуре в большом количестве присутствуют мелкодисперсные включения карбидной фазы.

Оптимальная структура этих сталей получается после закалки с температуры 1050–1200 °С и отпуска (старения) при 650–750 °С в течение нескольких часов. Старение вызывает повышение твердости вследствие дисперсионного твердения. Дисперсные частицы карбидной фазы (VC, WC, Mo₂C) являются эффективными препятствиями на пути движения дислокаций.

К жаропрочным сталям этой группы относятся: 09X14H16B, 45X14H14B2M и др. с рабочей температурой до 600–700 °С.

Аустенитные стали с интерметаллидным упрочнением являются наиболее жаропрочными и применяются при изготовлении турбин, компрессоров, дисков,

шпилек, болтов, работающих при температуре 750–800° С. Они содержат повышенное количество никеля, титана и алюминия. Количество углерода в этих сталях не превышает 0,1 %. Оптимальная микроструктура формируется после закалки с температуры 1100–1200° С с охлаждением на воздухе и с последующим старением при температуре 800° С в течение нескольких часов. Закалка приводит к образованию высоколегированного твердого раствора на основе γ – железа (аустенита).

В процессе старения образуется интерметаллидная фаза $\gamma = (\text{Ni}_3, \text{Ti}) \text{Al}$ в виде дисперсных включений размером 200–500 Å и фазы Лавеса $\text{Fe}_2 \text{Mo}$, $\text{Fe}_2 \text{W}$, отличающиеся высокой термической стабильностью. Из дисперсионно-твердеющих сплавов на основе железа наиболее жаропрочным является ХН35ВТЮ.

Стали мартенситного класса (15Х11МФ, 40Х9С2, 40Х10С2М и др.) используют для изготовления лопаток, турбинных дисков, роторов, выхлопных клапанов двигателей внутреннего сгорания и т. д., работающих при температуре 600–620 °С.

Стали перлитного класса (12ХМ, 12Х1МФ и др.) используют для изготовления крепежа, труб, паропроводов, пароперегревателей и коллекторов энергетических установок, длительно работающих при температуре 500–550 °С.

21. Магнитные стали и сплавы.

Магнитотвердые материалы должны обладать высокими значениями коэрцитивной силы H_c , остаточной индукции B_r , сохранять свойства в течение длительного времени. Применяются высокоуглеродистые стали (около 1 % С), дополнительно легированные Cr, Co (стали ЕХ3, ЕХ5К5 и т. д.). Стали подвергают закалке и низкому отпуску с получением двухфазной структуры: мартенсит + карбиды хрома.

Стали и сплавы этой группы применяются для изготовления постоянных магнитов.

22. Магнитомягкие материалы

Основными требованиями к этим материалам являются низкие значения коэрцитивной силы и высокая магнитная проницаемость μ , а также малые потери при перемагничивании и на вихревые токи. Для этого металл, сталь должны обладать однофазной структурой, чистыми от примесей и включений, иметь крупнозернистое строение.

В качестве магнитомягкого материала применяют технически чистое железо ($C < 0,025 \%$), идущее для изготовления реле, сердечников, электромагнитов постоянного тока.

Электротехнические стали содержащие 0,05–0,005 % С, дополнительно легируют кремнием (0,8–4,8 % Si), что повышает магнитную проницаемость μ . Структура стали – феррит легированный. В России принята цифровая маркировка стали (1311, 2111, 3416 и т. д.). Стали применяют для деталей электродвигателей, генераторов, трансформаторов, магнитопроводов и др.

В качестве немагнитных сплавов применяется нержавеющая сталь аустенитного класса (08Х18Н10, 12Х18Н10Т и др.).

Таблица 6 – Химический состав легированных сталей с особыми свойствами

Марка стали	% углерода (С)	% легирующих элементов	Класс	Примечание
40X13	0,35-0,45	0,6Mn; 0,6Si; 12– 14Cr; 0,6Ni; 0,03S; 0,03P	Мартенситный	Режущий, мерительный и хирургический инструмент
12X17	0,12	16-18Cr; 0,8Si; 0,8Mn; 0,6Ni; 0,3Cu; 0,025S; 0,035P;	Ферритный	Оборудование заводов в пищевой промышленности, сварные конструкции
12X18Н10Т	0,12-0,14	0,8Si; 1-2Mn; 17– 19Cr; 9-11Ni; до 0,6Ti;	Аустенитный	Сварные конструкции в агрессивной среде, жаростойкие, жаропрочные
40X9C2	0,35-0,45	8-10 Cr; 2-3Si;	Мартенситный	Клапаны автомобильных и авиационных двигателей
ЕХ3	0,9-1,1	2,8-3,6 Cr;	Мартенситный	Постоянные магниты
2111	0,05-0,005	0,4-0,8Si;	Ферритный	Магнитопроводы, статоры, роторы электродвигателей

Таблица 7 – Легированные стали с особыми свойствами

№ п/п	Марка стали	Термообработка	Структура	σ_B МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ %	КСУ, МДж/м ²
1	40X13	З. 1000-1050, O _H – 200	М+ карбиды Cr	1680	1400	3.0	-
2	40X13	З. 1000-1050, O _B – 600-700	Сорбит	1120	800	13.0	0,7
3	12X17	Отжиг 700-730	Феррит легир.	450	280	25	0,5-1,0
4	12X18H10T 12X18H10T	З. 1150 после наклепа ($\epsilon = 50\%$)	Аустенит легир. --“--	600 1000	200 750	60 4-5	2,5 -
5	40X9C2	З. 1000-1050, O – 800	Троостит	750	500	15	-
					Остаточная индукция		Коэрцитивная сила
6	EX3	З. 100-1200, O – 500-600	М+ карбиды Cr		$B_r = 0,95Tл$		$H_c = 4,8$ кА/м
7	2111	Отжиг 1100-1200(вакуум или в сухом водороде)	Феррит легир.		$B_r = 1,5$ Тл и частота тока $f = 50$ Гц; Потери: $P_{1,5/50} = 9,5$ Вт/кг		

Вопросы для самопроверки.

1. Какие стали называются легированными?
2. Для какой цели используется легирование?
3. Какие фазы образуют легирующие элементы с железом?
4. Какие фазы образуют легирующие элементы с углеродом?
5. В какой среде следует охлаждать детали из легированных сталей при закалке? Почему?
6. Как влияет легирование на процессы отпуска стали?
7. Что такое отпускная хрупкость второго рода? Чем она обусловлена? Какие элементы способствуют снижению и устраняют отпускную хрупкость?
8. Какие стали относятся к сталям повышенной прокаливаемости, не обладающими теплостойкостью (для режущего инструмента)?
9. Особенности и марки быстрорежущих сталей.
10. Штамповые стали холодной и горячей обработки давлением.
11. На какие классы делятся твердые сплавы?
12. Дать марки и области применения твердых сплавов.
13. Какие стали по назначению относятся к сталям с особыми свойствами?
14. Какой основной легирующий элемент содержится в коррозионностойких сталях? Его минимальный процент?
15. Какие стали по химическому составу относятся к коррозионностойким?
16. На какие классы по структуре делятся коррозионностойкие стали? Привести пример.
17. В чем проявляется межкристаллическая коррозия (МКК)?
18. Как предупредить ее?
19. Привести марки аустенитных коррозионностойких сталей.
20. После какой термообработки получается структура аустенит легированный? Что происходит при этом.
21. Как упрочняются аустенитные коррозионностойкие стали?
22. Что такое жаростойкость? Какой основной легирующий элемент в этих сталях? Привести марки.
23. Что такое жаропрочность? Факторы, влияющие на жаропрочность.
24. Привести классы жаропрочных сталей, их рабочую температуру, марки сталей.
25. Стали для криогенной техники, дать марки.
26. Какие стали относятся к парамагнитным?
27. Какие стали и сплавы относятся к магнитотвердым? Какой структурой и свойствами они должны обладать?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

МИКРОАНАЛИЗ МЕДНЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Цель работы: получить практические умения и навыки и умения в области распознавания медных и алюминиевых сплавов.

Оборудование, приборы и материалы

1. Металлографический микроскоп МИМ-1
2. Набор микрошлифов медных литейных и деформируемых сплавов.
3. Диаграмма состояния системы сплавов Cu – Zn, Cu – Sn, Cu — Al, Cu – Pb, Cu – Be, Al – Cu, Fe – Si,
4. Твердомер Бринелля.
5. Альбомы микроструктур сплавов.

Методические указания и задания по выполнению работы

1. Рассмотреть под микроскопом при увеличении $\times 200$ и зарисовать структуру медных сплавов:
 - однофазную и двухфазную латунь;
 - литейные и деформируемые бронзы;
 - замерить твердость в 3 точках на макрошлифах цветных металлов и их сплавов на приборе Бринелля.

Содержание отчета

1. Зарисовать диаграммы состояния медь – цинк; медь – алюминий; медь – олово.
2. Зарисовать микроструктуру цветных металлов и их сплавов и указать их марку, примерный химический состав, механические свойства и область применения. На каждом рисунке стрелками указать структурные составляющие сплава,
3. Для каждого сплава цветных металлов дать его наименование и подробное описание фаз и структурных составляющих.

Теоретические сведения

Медь – металл с плотностью $8,94 \text{ г/см}^3$. Кристаллическая решетка ГЦК. Температура плавления $1083 \text{ }^\circ\text{C}$. Характерными свойствами меди является ее высокая электропроводность и теплопроводность, поэтому медь широко применяется в электротехнике. Технически чистая медь маркируется: М00, М0, М1, М2, и т. д., цифра – номер марки по ГОСТу.

Условные обозначения химических элементов в марках цветных металлов и сплавов.

Элемент	Химический символ	Обозначение элемента
Алюминий	Al	А
Бериллий	Be	Б
Железо	Fe	Ж
Кремний	Si	К
Магний	Mg	Мг
Марганец	Mn	Мц
Медь	Cu	М
Никель	Ni	Н
Олово	Sn	О
Свинец	Pb	С
Сурьма	Sb	Су
Титан	Ti	Т
Фосфор	P	Ф
Хром	Cr	Х
Цинк	Zn	Ц

Основные группы медных сплавов:

- Латунни – сплав на основе меди, где главным легирующим элементом является цинк;
- Бронзы – сплав на основе меди, в котором основным легирующим элементом может быть любой, кроме цинка и никеля;
- Медноникелевые сплавы – сплавы на основе меди, где основной легирующий элемент – никель.

Медные сплавы подразделяются по технологическим свойствам на деформируемые и литейные.

Латунни

Латунни по химическому составу подразделяются на двойные и многокомпонентные, а по структуре на однофазные (α) и двухфазные ($\alpha + \beta'$).

Маркировка: Латунни обозначаются буквой Л.

Однофазные (деформируемые), например, Л90, цифра указывает содержание меди.

Двухфазные (литейные), например, ЛЦ41 – цифра указывает процент цинка. Буквы указывают легирующий элемент, цифра за буквой его содержание в целых процентах.

Диаграмма состояния медь цинк (рисунок 1), как видно из диаграммы латунь, содержащая до 39 % Zn однофазная и состоит из α – твердого раствора замещения Zn в Cu, решетка ГЦК. Ее структура – светлые дендриты, обогащенные медью, а междендритные участки обогащены цинком. После деформации и рекристаллизационного отжига зерна приобретают полиэдрическую форму с двойниками (рисунок 2).

Однофазные латуни, обладающие высокой пластичностью, деформируются как в горячем, так и в холодном состоянии. Из них изготавливают ленты, радиаторные трубки, гильзы патронов и др. Специальные латуни, имеющие повышенную коррозионную стойкость в морской воде легированы оловом (ЛЮ 70-1, ЛЮ 62-1), идут для изготовления труб и досок конденсаторов и теплообменников, работающих в забортной воде.

Двухфазные латуни, содержащие до 45 % Zn имеют структуру ($\alpha + \beta'$), где β – твердый раствор на основе химического соединения электронного типа CuZn. Фаза β' – имеет высокую твердость, но низкую пластичность. Поэтому изделия из них изготавливаются деформированием при температуре выше 500 °С (600–750 °С) в основном же эти латуни используются для изготовления отливок.

Литейные латуни используют для изготовления запорной арматуры, червячных колес, подшипников скольжения.

Двухфазные латуни нередко легируют Al, Fe, Ni, Si, Mn, Pb и другими элементами. Такие латуни называют специальными или многокомпонентными.

Так, свинец облегчает обрабатываемость резанием и улучшает антифрикционные свойства (ЛС 59-1).

Алюминий повышает прочность, твердость и коррозионную стойкость латуни (ЛА 77-2).

Кремний улучшает жидкотекучесть, свариваемость и способность к деформации (ЛК 80-3).

Никель повышает растворимость цинка в меди и улучшает механические свойства (ЛН 65-5).

Олово повышает сопротивление коррозии в морской воде (ЛЮ 70-1 – морская латунь).

Латунь ЛАЖМцЖ 67-5-2-2 применяется для изготовления гребных винтов.

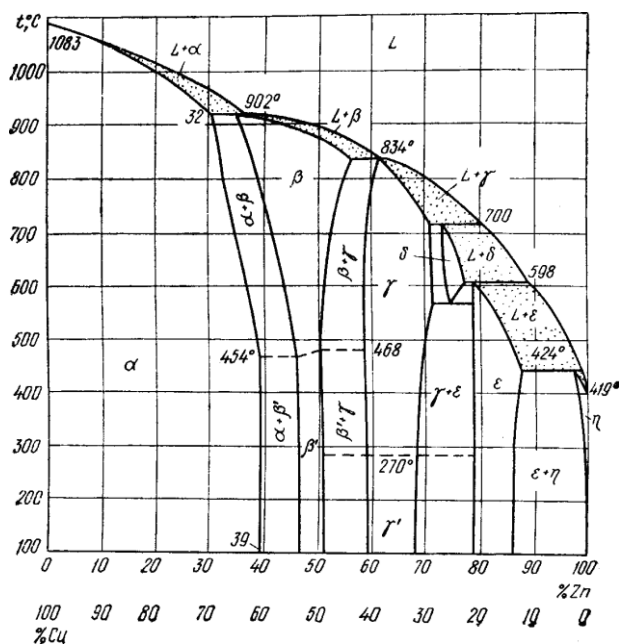


Рисунок 1 – Диаграмма фазового равновесия системы «Медь – Цинк»

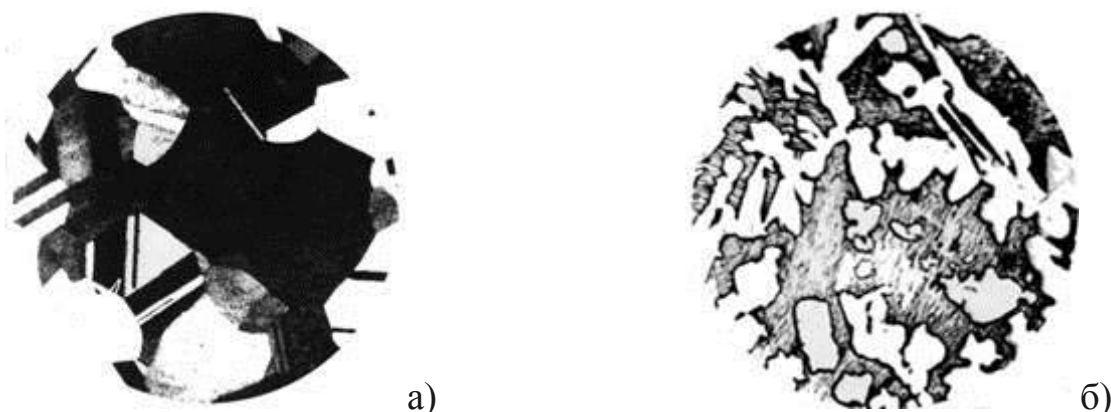


Рисунок 2– Микроструктура латуни: а) однофазной (α) деформированной; б) двухфазной ($\alpha + \beta'$) литейной.

Бронзы

Бронзы – двойные или многокомпонентные сплавы меди с оловом, алюминием, свинцом, кремнием, бериллием и другими элементами, среди которых цинк не является основным легирующим компонентом, называются бронзами. По основному легирующему элементу различают бронзы оловянистые, свинцовистые, хромистые и т. д.

Оловянистые бронзы

При сплавлении меди с оловом образуются твердые растворы и электронные соединения.

На рис. 3 приведена левая часть диаграммы состояния Cu – Sn.

В твердом состоянии в бронзах имеются фазы:

α – твердый раствор замещения олова в меди;

β – твердый раствор на базе электронного соединения CuSn;

γ – твердый раствор на основе химического соединения Cu₃Sn;

δ – твердый раствор на базе соединения электронного типа Cu₃₁Sn₈.

При температуре 520 °С протекает эвтектоидное превращение $\gamma \rightarrow (\alpha + \delta)$ эвтектоид.

Различают деформированные (Sn до 4–5 %), бронзы: Бр. ОЦ 4-3,

Бр. ОФ 4–0,25 и др., литейные (Sn до 10 %): Бр. О10Ф1, Бр.05Ц5С5,

Бр. 03Ц7С5Н1 и др.

Из деформируемых бронз изготавливают трубки аппаратов и приборов, и пружинящие контакты электрооборудования, мембраны, сетки и т. д.

Литейные бронзы применяют для пароводяной аппаратуры, отливок антифрикционных деталей типа втулок, вкладышей подшипников скольжения, червячных колес.

Литые оловянистые бронзы с цинком и свинцом имеют высокие литейные свойства: малую объемную усадку (менее 1–2 %), хорошую жидкотекучесть. Из бронз изготавливают сложные отливки; в частности, художественное литье.

Микроструктура оловянистой бронзы представлена на рисунке 4.

Алюминиевые бронзы

Диаграмма алюминиевых бронз дана на рис 5, где α – твердый раствор замещения алюминия в меди.

При температуре 565°C протекает эвтектоидное превращение $\beta \rightarrow (\alpha + \gamma)$ эвтектоид, где γ фаза – твердый раствор на основе химического соединения электронного типа $\text{Cu}_{32}\text{Al}_{19}$. γ_2 отличается повышенной твердостью и хрупкостью.

Алюминиевые бронзы по коррозионной стойкости в морской воде превосходят медь и оловянистые бронзы. Они достаточно устойчивы в перегретом паре, работают в молочной, лимонной, уксусной кислотах и других средах. Бронзы с содержанием Al до 9% обладают высокой пластичностью и обрабатываются давлением как в горячем, так и в холодном состоянии (Бр А7; Бр АЖ 9-4 и др.).

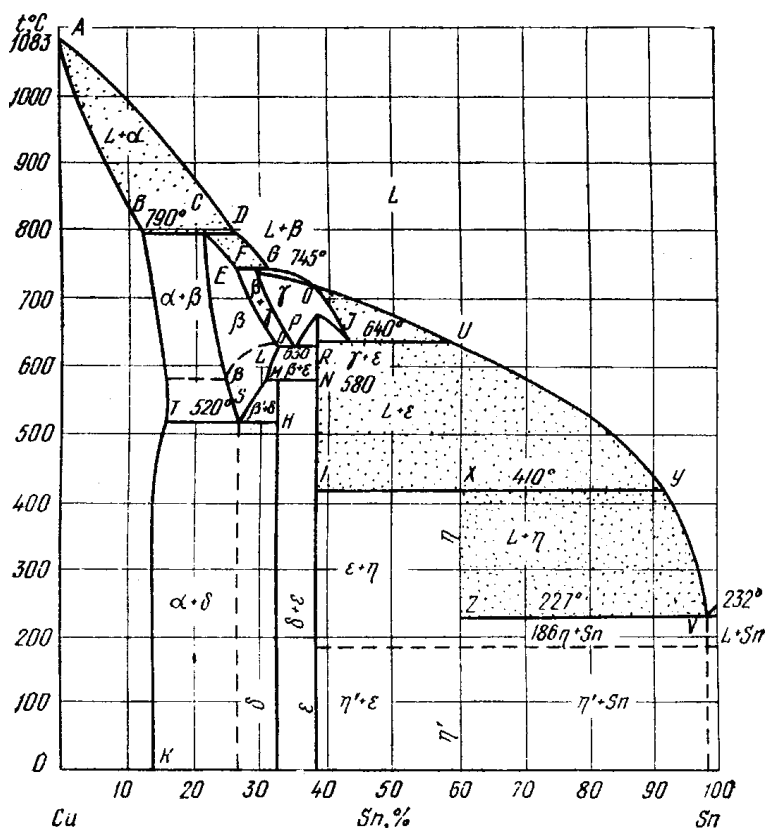
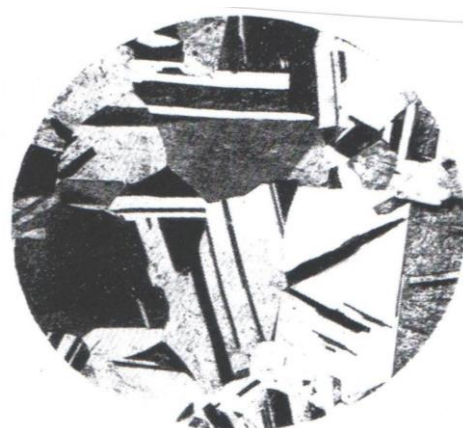
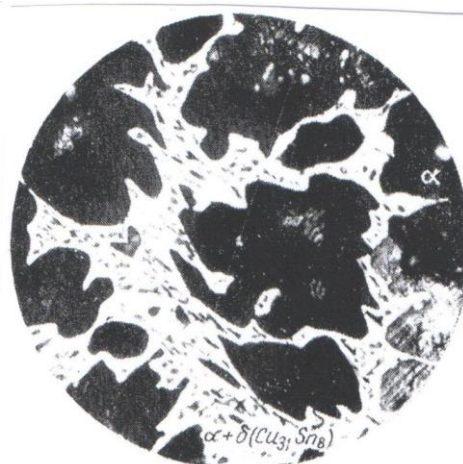


Рисунок 3 – Диаграмма фазового равновесия системы «Медь – Олово»



а)



б)

Рисунок 4 – Микроструктура оловянистой бронзы: а) однофазной (α) деформированной; б) литейной, структура $\alpha + \delta$ эвтектоид ($\alpha + \delta$)

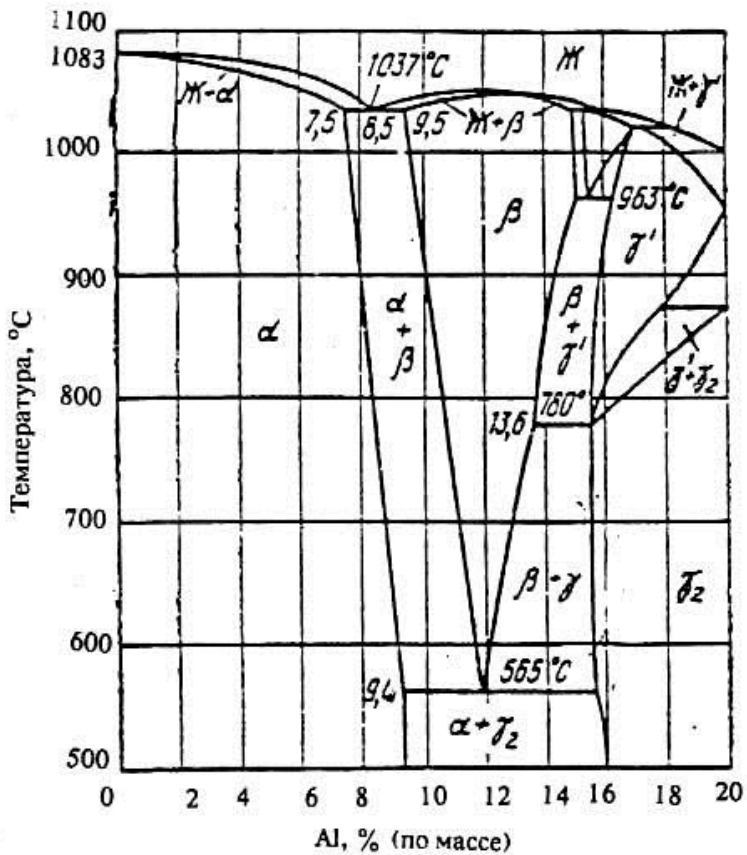
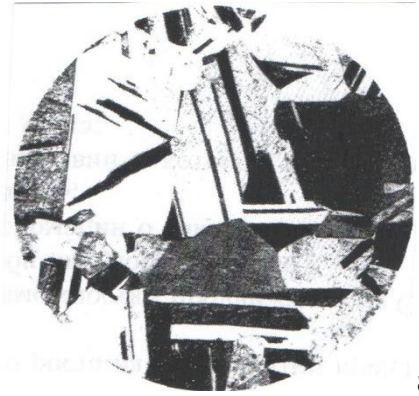


Рисунок 5 – Диаграмма фазового равновесия системы «Медь – Алюминий»



а)



б)

Рисунок 6 – Микроструктура алюминиевой бронзы: а) однофазной (α) деформированной; б) литейной, структура α + эвтектоид (α+γ)

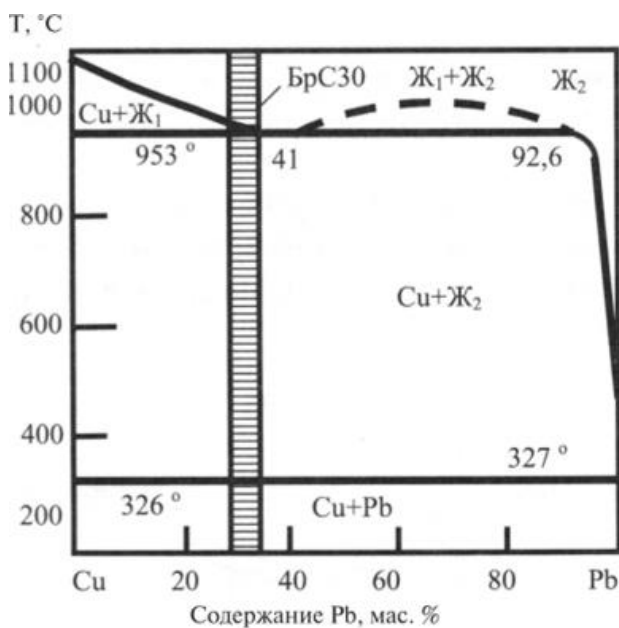


Рисунок 7 – Микроструктура свинцовистой бронзы Бр С30



Рисунок 8 – Микроструктура свинцовистой бронзы Бр С30

Сплавы, содержащие Al до 10–11 % идут для изготовления литых деталей, но имеют большую концентрированную объемную усадку, обладая малой склонностью к дендритной ликвации (Бр.А10Ж4Н4Л; Бр.А11Ж6Н6Л; и др.). Они применяются для изготовления червячных передач, втулок, шестерней, деталей насосов и турбин и т. д.

Микроструктура алюминиевой бронзы представлена на рисунке 6.

Свинцовистые бронзы

Свинец не растворяется в меди, поэтому сплавы после кристаллизации состоят из кристаллов меди и включений свинца. Такая структура бронзы обеспечивает высокие антифрикционные свойства. Это предопределяет широкое применение свинцовистых бронз для изготовления вкладышей подшипников скольжения, работающих с большими скоростями и при повышенных давлениях. По сравнению с оловянистыми бронзами теплопроводность бронзы Бр. С30 в 4 раза больше, поэтому она хорошо отводит теплоту, возникающую при трении.

Из-за невысоких механических свойств бронзу Бр С30 наплавляют тонким слоем на стальные ленты. Нередко свинцовые бронзы легируют никелем и оловом, которые растворяясь в меди, повышают механические свойства.

Диаграмма медь-свинец дана на рисунке 7, микроструктура свинцовистой бронзы Бр. С30 на рисунке 8.

Бериллиевые бронзы

Диаграмма состояния системы медь – бериллий даны на рис. 9, микроструктура бронзы Бр. Б2,5 на рисунке 10.

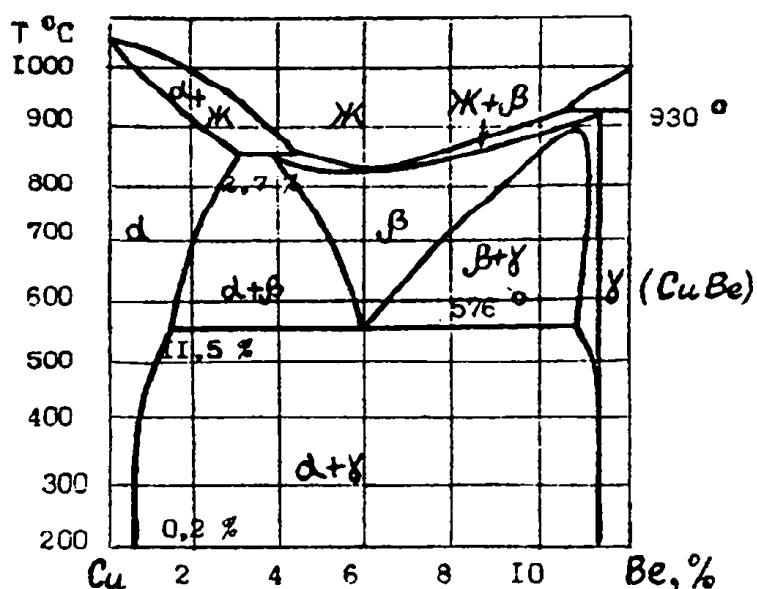


Рисунок 9 – Диаграмма фазового равновесия системы «Медь – Бериллий»

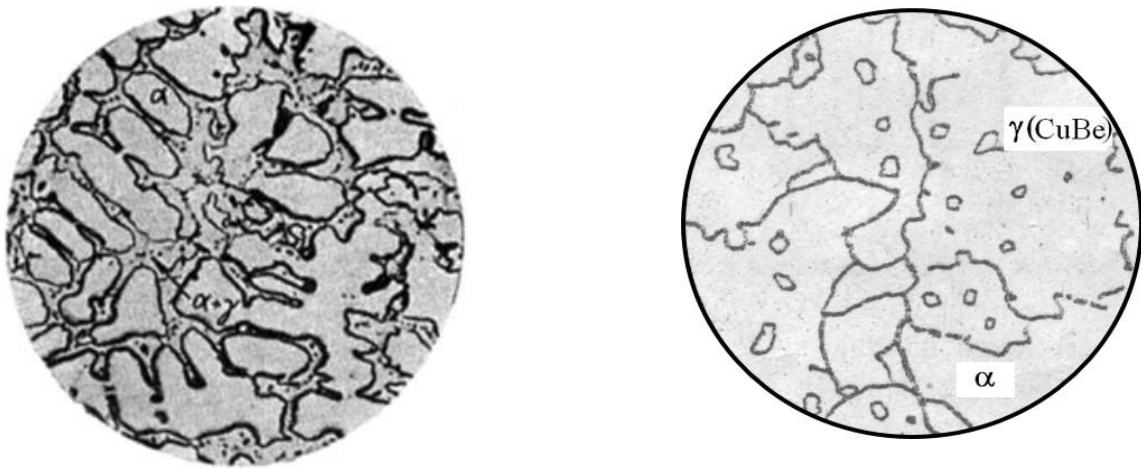


Рисунок 10 – Микроструктура бериллиевой бронзы Бр. Б2,5 а) литой; б) литой (З, С).

Бериллиевая бронза имеет предельную растворимость Be в Cu до 0,2 % при температуре 300 °С. Кроме α – твердого раствора замещения Be в Cu в системе имеются β и γ фазы. При температуре 576 °С протекает эвтектоидное превращение $\beta_{6,0} \rightarrow (\alpha_{1,4} + \gamma_{11,0})$ эвтектоид.

γ фаза – твердый раствор на основе химического соединения электронного типа Cu Be. При закалке с температуры 760–780 °С в воде получается пересыщенный α твердый раствор; при последующим старении при 300–350 °С происходит выделение γ' фазы (Cu Be) что повышает прочность бронзы. Теплостойкость бериллиевых бронз составляет 500 °С.

На рисунке 10 на фоне светлых зерен α – твердого раствора видны мелкие включения γ фазы.

Бериллиевые бронзы применяются для изготовления пружин, мембран, пружинящих контактов. Инструменты из бериллиевой бронзы не дают искр, поэтому их применяют при производстве взрывчатых веществ.

Таблица 1 – Химический состав и свойства медных сплавов

Марка сплава	Структура	Химический состав сплава	Механические свойства		
			σ_B , МПа	δ , %	НВ, МПа
Латуни					
деформируемые					
Л 90	α	88-91 Cu	260	45	530
ЛО 70-1	α	69-70 Cu; 1,0-1,5 Sn.	250/350	49/62	600/480
литейные					
ЛЦ 41	$\alpha + \beta'$	40-42 Zn ост. Cu.	390	44	-
ЛЦ 23А6ЖЗМц2	$\alpha + \beta'$	64-68 Cu; 4,0-7,0 Al; 2,0-4,0 Fe; 1,5-3,0 Mn.	700	7	160
Оловянистые бронзы					
деформируемые					
Бр ОФ 6,5-0,15	α	6,0-7,0Sn; 0,1-0,25P;	400	65	700
Бр ОЦС 4-4-2,5	α	3,0-5,0Sn; 3,5Zn; 1,5-3,5Pb;	350	40	600
литейные					

Марка сплава	Структура	Химический состав сплава	Механические свойства		
			σ_B , МПа	δ , %	НВ, МПа
Бр О10 Ф1	α +эвтектоид ($\alpha + \delta$)	9-11 Sn; 0,4-1,1 P	250	7	800
Бр О10 Ц2		9-11 Sn; 1-3 Zn	230	5	900
Бр О5Ц5С5		4-6 Sn; 4-6 Zn; 4-6 Pb	180	4	600
Бронза алюминиевая					
деформируемая					
Бр АЖ 9-4	α	8-10Al; 2,0-4,0 Fe	550	40	1300
литейная					
Бр А10Ж4Н4Л	α +эвтектоид; ($\alpha + \gamma$)	9-11 Al; 3,5-5,0 Fe; 3,5-5,0 Ni	600	10	1900
Бронза свинцовистая					
Бр С30	Cu + Pb	29-31 Pb	600	4	250
Бронза бирилливая					
Бр Б2	$\alpha + \gamma$ (3,С)	1,9-2,2 Be; 0,2-0,5 Ni	1200	4	37
Мельхиор					
МНЖМц30-0,8-1	α	29-31 Ni; 0,8Fe; 1,0 Mn	400	23-28	700
МН19	α	18-20 Ni	400	35	-

Медно-никелевые сплавы

Сплавы Cu с Ni имеют большое значение в технике. Медноникелевые сплавы условно разделяют на две основные группы: коррозионностойкие и электротехнические. К первой группе относятся сплавы: мельхиор, нейзильбер, куниаль. Во вторую группу входят сплавы для компенсационных проводов, манганин и термоэлектродные сплавы.

Мельхиор. Мельхиором называют двойные и более сложные сплавы меди, в которых основной легирующий элемент Ni. Сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью в морской воде, органических кислотах и т. д. поэтому их широко применяют в морском судостроении (конденсаторные трубы), для разменной монеты, медицинского инструмента, деталей в точной механике и т. д., эта марка МНЖМц 30-0,8-1, МН 19.

Нейзильбер. Эти сплавы принадлежат к тройной системе Cu– Ni-Zn (МНЦ 15–20). Применяются, как и мельхиоры.

Алюминий.

Кристаллическая решетка – ГЦК, плотность $\rho - 2,7 \text{ г/см}^3$, температура плавления $660 \text{ }^\circ\text{C}$. Алюминий обладает высокой электро- и теплопроводностью; низкой прочностью, но высокой пластичностью, а также высокой коррозионной стойкостью, которая обусловлена образованием на его поверхности тонкой, но плотной пленкой оксида $\text{Al}_2 \text{O}_3$.

Алюминий и его сплавы имеют высокую коррозионную стойкость в сухой и влажной атмосфере, чистой пресной воде, органических кислотах: винной, яблочной, лимонной и др.

Из алюминия прокаткой получают тонкую фольгу (ФГ, ФЛ и др.), широко

применяемую в пищевой промышленности.

Маркировка первичного алюминия:

- особой чистоты А999 (99,999 %Al);
- технической чистоты А85 (99,85Al %), А8 (99,8 % Al).

Маркировка деформированного технического алюминия:

- АД0 (99,5 %Al), АД1 (99,3 %Al). Цифра – номер марки по ГОСТу.

На рисунке 11 даны типовая диаграмма состояния сплавов алюминий – легирующий элемент, где показано, что в деформируемых сплавах содержание легирующего элемента не должно превышать предельную растворимость (тч. К).

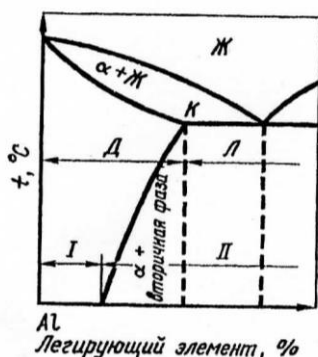


Рисунок 11 – Типовая диаграмма состояния сплавов алюминий – легирующий элемент (схема):

Д – деформируемые сплавы; Л – литейные сплавы; I – сплавы, не упрочняемые термической обработкой; II – сплавы, упрочняемые термической обработкой

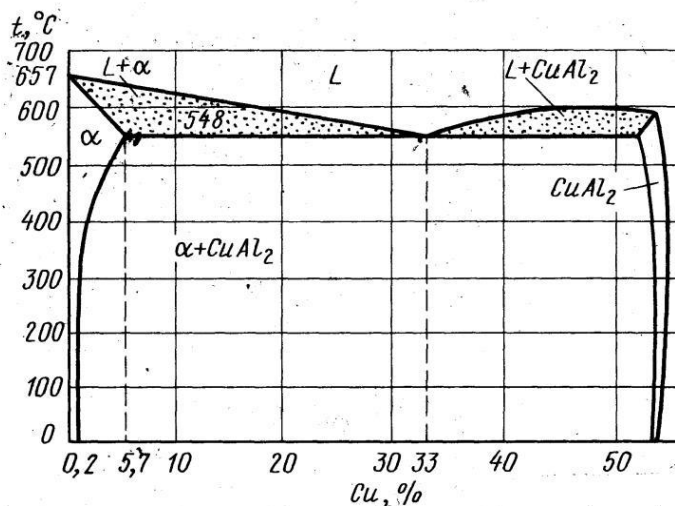


Рисунок 12 – Диаграмма состояния алюминий – медь

Все алюминиевые сплавы можно разделить на три группы:

1. Деформируемые, предназначенные для получения поковок, штамповок, проката, труб.
2. Литейные сплавы.
3. Сплавы, получаемые методом порошковой металлургии (спеченные алюминиевые порошки (САП) и сплавы (САС).

В свою очередь, сплавы делятся на упрочняемые и не упрочняемые термообработкой.

Деформируемые сплавы, упрочняемые термообработкой.

К этой группе сплавов относятся: дуралюмины (Д1, Д16), авиали (АВ), ковкие (АК4, АК6), высокопрочные (В95), жаропрочные (АК4 – 1). В этих сплавах цифра обозначает номер марки по ГОСТу.

а) Дуралюмины (система Al – Cu – Mg).

Диаграмма состояния системы сплавов представлены на рисунке 12.

Растворимость меди в алюминии возрастает с 0,5 % до 5,7 % при $T = 548 \text{ }^\circ\text{C}$. В диаграмме α – твердый раствор замещения Cu в Al. При температуре $548 \text{ }^\circ\text{C}$ протекает эвтектическое превращение: $\text{Ж} \rightarrow (\alpha + \text{CuAl}_2 (\Theta))$ эвтектика.

Термическая обработка дуралюмина состоит в закалке и естественном или искусственном старении. При нагреве под закалку до температуры около $500 \text{ }^\circ\text{C}$ фазы Θ (Cu Al_2) и S (Cu Mg Al_2) растворяются в α – твердом растворе, структура становится однофазной. Последующее быстрое охлаждение в воде (закалка) фиксирует пересыщенный α – твердый раствор. При старении естественном ($T = 20\text{--}25 \text{ }^\circ\text{C}$, время выдержки до 4–5 сут. или искусственном ($T = 100\text{--}190 \text{ }^\circ\text{C}$, в течение нескольких часов) из α пересыщенного твердого раствора выделяют упрочняющие фазы: $\text{Cu Al}_2 (\Theta)$, (Cu Mg Al_2 (S)).

Сплав Д1 в настоящее время используется ограниченно, а Д16, обладающий более высокими механическими свойствами, используется в авиации, судостроении (панели крыла, шпангоуты, обшивка фюзеляжа и т. д.) Дуралюмины плохо свариваются, поэтому применяются для изготовления клепанных конструкций.

Структура сплавов показана на рисунке 13.

Для повышения коррозионной стойкости применяют оксидирование или плакирование чистым алюминием. Толщина плакирующего слоя составляет 2...10 % от толщины листа.

Авиали (АВ, АД31) хорошо свариваются, обладают высокой коррозионной стойкостью против атмосферной коррозии, поэтому сплав АВ используют для изготовления лопастей вертолетов, АД31 в строительстве (рамы), для внутренней отделки кабины самолетов и в автомобилестроении.

Ковкие сплавы АК6, АК8 идут для ответственных силовых деталей в авиационной и другой технике. Сплав АК 4-1, обладая теплостойкостью до $250\text{--}300 \text{ }^\circ\text{C}$, применяют для изготовления дисков компрессоров, крыльчаток и др.

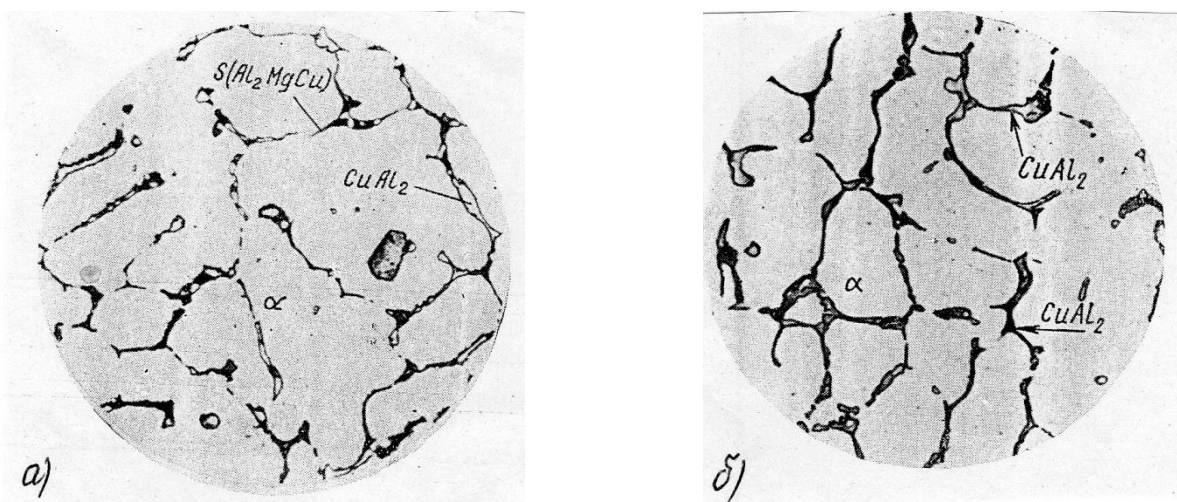


Рисунок 13 – микроструктура термически упрочняемого алюминиевого сплава:
а) литой дуралюмин Д16, б) деформируемый дуралюмин Д1

Сплав В95 относится к числу наиболее легированных и наиболее прочных деформируемых сплавов. Широко используется в самолетостроении в виде листов

для обшивки и панелей. Из-за низкой теплопроводности сплав В95 нельзя использовать для обшивки сверхзвуковых самолетов.

Сплавы АМц используются редко, хотя обладают высокой коррозионной стойкостью, хорошей свариваемостью, высокой технологической пластичностью. Из него изготавливают малонагруженные изделия – сварные бензобаки, маслопроводы.

Литейные алюминиевые сплавы

Для литья используются сплавы систем Al – Si (силумины). Al – Cu, Al – Mg.

Условные обозначения разновидностей термической обработки:

Режим Т1 – искусственное старение без предварительного нагрева под закалку;

Режим Т2 – отжиг отливок;

Режим Т4 – закалка без последующего искусственного старения;

Режим Т5 и Т6 закалка и искусственное старение. (Т6 – старение на максимальную прочность, Т5 – неполное старение);

Режим Т7 – закалка и стабилизирующее старение (перестаривание).

Наиболее распространены в промышленности силумины (система Al – Si) к ним относятся АК12, (АЛ2), АК9ч, АК7ч и др., где цифра – средний процент кремния, а в скобках дан старый ГОСТ.

Силумины имеют высокие литейные свойства при % Si > 4 – 5; обладают высокой жидкотекучестью, имеют малую склонность к горячим трещинам, хорошую свариваемость, но механические свойства невысоки. Коррозионная стойкость средняя между магналиями и дуралюминами.

Сплав АК12 не упрочняется термообработкой, т.к. после закалки получается мало пересыщенный твердый α – раствор.

Согласно диаграмме состояния системы сплавов Al – Si, (рисунок 14) структура сплава с 12 % Si состоит из грубой эвтектики и кристаллов Si (сплав заэвтектический), так как эвтектика содержит 11,6 % Si. Сплав обладает низкими механическими свойствами.

После модифицирования (смесь солей NaCl и NaF) сплав становится доэвтектическим, так как эвтектика содержит 14 % Si, поэтому структура сплава: α + эвтектика (α + Si).

Появление α твердого раствора повышает пластичность сплава, а измельчение эвтектики повышает механические свойства, рисунок 15.

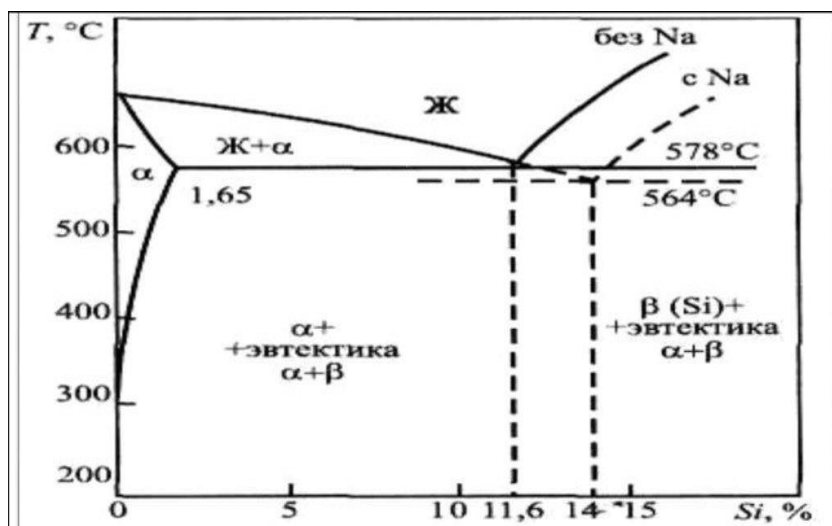
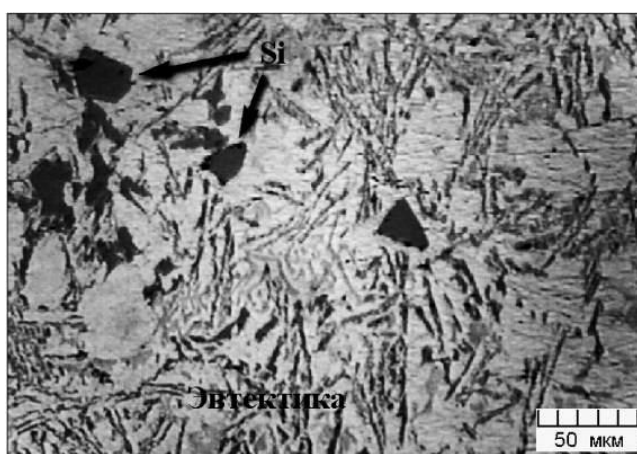
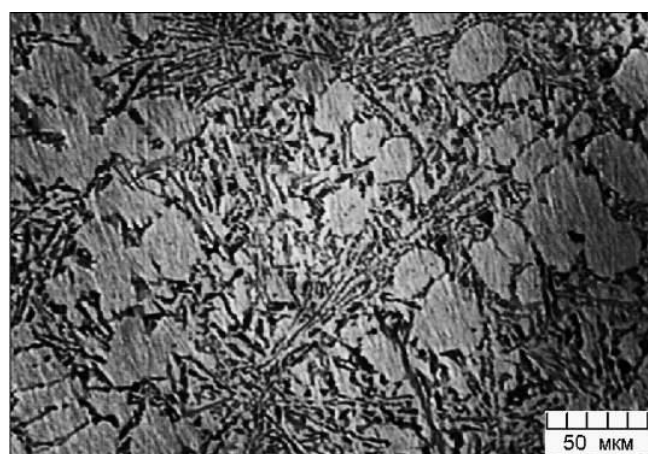


Рисунок 14 – Диаграмма состояния системы алюминий – кремний



а)



б)

Рисунок 15 – Микроструктура силумина а) до модификации; эвтектика + кристаллы Si; б) после модификации: эвтектика + α – твердый раствор

Сплав АК12, обладающий наилучшими литейными свойствами применяется в крупносерийном производстве малонагруженных деталей, получаемых литьем под давлением.

Термически упрочняемые силумины АК9ч, АК7ч, АК7пч, относящиеся к системе Al – Si – Mg, имеют хорошие литейные свойства, используют для отливки средне нагруженных деталей. Многие из этих силуминов благодаря хорошей герметичности работают в пневмо-, и гидросистемах (не дают течи под давлением воздуха, воды, масла).

Особую группу составляют поршневые сплавы. Сплав для поршней двигателей внутреннего сгорания (ДВС) должен быть жаропрочным (днище поршня может разогреваться до 350 °С), иметь низкий коэффициент температурного рас-

ширения, обладать стабильностью и износостойкостью. Этими качествами обладает медистый силумин АК12М2МгН (система Al – Si –Cu– Mg). По стойкости против коррозии, особенно в морской воде, сплавы на основе системы Al-Mg превосходят все другие литейные алюминиевые сплавы. Однако при нагреве сплава АМг10 выше 80 °С по границам α – твердого раствора выделяется β фаза (Mg_2Al_3), что обуславливает склонность к межкристаллитной коррозии и коррозионному растрескиванию.

Химический состав, термообработка, структура и механические свойства некоторых алюминиевых сплавов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Химический состав, термообработка, структура, свойства алюминиевых сплавов

Марка сплава	Система	Химический состав	Термическая обработка	Структура	Механические свойства		
					σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ , %
Д1	Al – Cu – Mg	3,8-4,8Cu; 0,4-0,8Mg; 0,4-0,8Mn	З (500-505) + Сестеств.	$\alpha + \text{Cu Al}_2 (\Theta)$	400	240	20
Д16	Al – Cu – Mg	3,8-4,9Cu; 1,2-1,8Mg; 0,3- 0,9Mn	З (495-505) + С190, 12ч	$\alpha + \text{CuAl}_2 (\Theta) + \text{Cu}$ $\text{Mg Al}_2 (\text{S})$	440	330	16
АК6	Al – Mg – Si – Cu	1,8-2,6Cu; 0,4-0,8Mg; 0,4-0,8Mn; 0,7-1,2Si	З (505-525) + С160, 10-15ч	$\alpha + \text{CuAl}_2 (\Theta) + \text{Mg}_2$ $\text{Si} (\beta) + \text{Cu}_2 \text{Mg}_8 \text{Si}_6$ $\text{Al}_5 (\text{W})$	400	300	12
В95	Al – Zn – Mg – Cu	1,4-2,0 Cu; 1,8-2,8Mg; 0,2- 0,6Mn; 5,0-7,0Zn	З (460-470) + С 120-140, 15-25ч	$\alpha + \text{MgZn}_2 (\eta) +$ $\text{CuMgAl}_2 (\text{S}) + \text{Al}_2$ $\text{Zn}_3 \text{Mg}_3 (\text{T})$	540	470	10
АК12 (АЛ2)	Al – Si	10-13Si	-	$\alpha + \text{эвтектика} (\alpha + \text{Si})$	180	80	6,0
АК12М2Мг Н (АЛ25)	Al – Si – Cu – Mg – Ni	11-13Si; 0,8-1,3Mg; 1,5- 3,0Cu; 0,3-0,6Mn; 0,8-1,3Ni	Т/О; Т1	$\alpha + \text{эвтектика} + \text{Mg}_2$ $\text{Si} + \text{W}(\text{Cu}_2 \text{Mg}_8 \text{Si}_6$ $\text{Al}_5) +$ $\text{Cu Al}_2 (\Theta)$	400	190	4,0

Магний – лёгкий металл (плотность – $1,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) серебристо-белого цвета, полиморфных превращений не имеет, кристаллизуется в плотноупакованной гексагональной решётке, температура плавления $650 \text{ }^\circ\text{C}$. Промышленность выпускает магний двух марок: Мг1 (99,92 % Mg) и Мг2 (99,65 % Mg). Литой магний имеет $\sigma_b = 120 \text{ МПа}$, $\delta = 8 \text{ \%}$, НВ 30.

Легирование значительно повышает механические свойства магния. Основными легирующими элементами магниевых сплавов являются алюминий, цинк, марганец. Для дополнительного легирования используют цирконий, кадмий, церий, неодим и др. Диаграммы фазового равновесия и механические свойства сплавов систем Mg – Al и Mg – Zn представлены на рисунке 16.

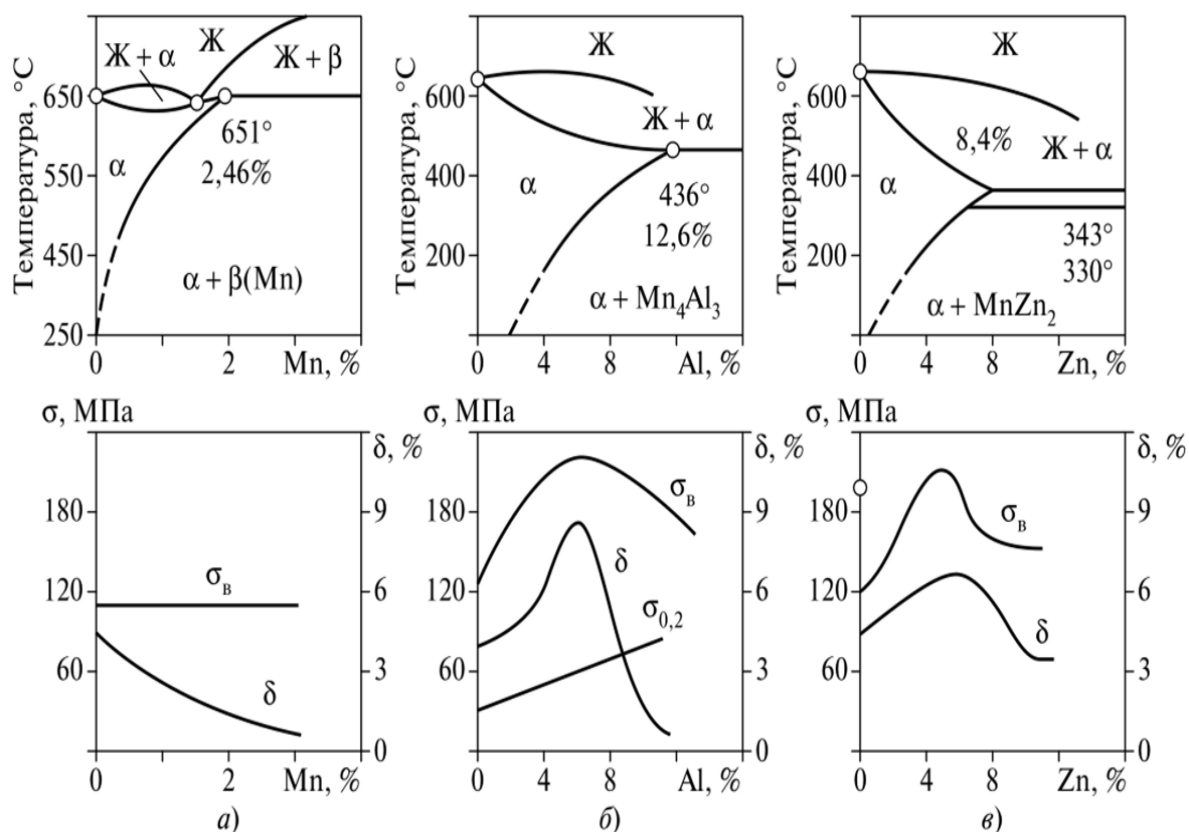


Рисунок 16 – Диаграммы состояний и влияние легирующих элементов на механические свойства сплавов:

а) – Mg–Mn; б) – Mg–Al; в) – Mg–Zn;

температуры (прессование – $300\text{--}480 \text{ }^\circ\text{C}$; прокатка: начало процесса $340\text{--}440 \text{ }^\circ\text{C}$, конец процесса – $225\text{--}250 \text{ }^\circ\text{C}$; штамповка – $480\text{--}280 \text{ }^\circ\text{C}$)

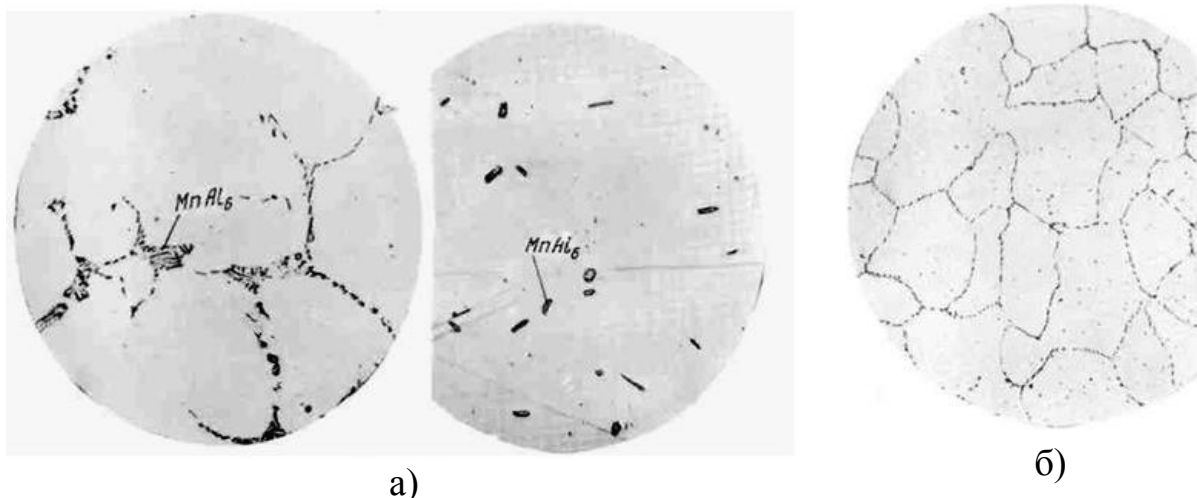


Рисунок 17 – Микроструктура литого сплава АМц:

а) слева – на фоне α – твердого раствора видны включения марганцевистой фазы $MnAl_2$, справа – α – твердый раствор и фаза видны включения марганцевистой фазы $MnAl_6$, б) микроструктура отожженного сплава АМг5

По технологии изготовления магниевые сплавы подразделяют на деформируемые (МА) и литейные (МЛ). По областям применения и основным свойствам магниевые сплавы разделяются на группы высокопрочных, жаропрочных и общего назначения. По склонности к упрочнению с помощью термической обработки – на сплавы, упрочняемые и не упрочняемые термической обработкой.

Для повышения пластичности магниевых сплавов их производят с пониженным содержанием вредных примесей Fe, Ni, Cu, ($\leq 0,08\% \text{ Fe}$, $\leq 0,1\% \text{ Cu}$, $\leq 0,01\% \text{ Ni}$). В этом случае к марке сплава добавляют строчные буквы «пч» (повышенной чистоты), например, МЛ5пч.

Химический состав, типичные механические свойства и области применения некоторых магниевых сплавов представлены в таблице 3.

Деформируемые магниевые сплавы марок МА2-1, МА5 относятся к системе Mg-Al-Zn-Mn. Для повышения механических свойств эти сплавы в литом состоянии подвергают гомогенизации при температуре от 390 до 425 °С в течении 20 ч. При этом растворяется фаза $Mg_{17}Al_{12}$ и при последующей обработке давлением не образуется грубая волокнистая структура.

Закалка и искусственное старение сплава МА5 в деформируемом состоянии позволяют снизить анизотропию структуры полуфабрикатов и получить небольшой эффект упрочнения (до 30 %).

Таблица 3 – Химический состав, механические свойства и области применения магниевых сплавов

Марка сплава	Химический состав, % (легирующие элементы)	Механические свойства		Вид термической обработки	Области применения сплава
		σ_b , МПа	δ , %		
1	2	3	4	5	6
ДЕФОРМИРУЕМЫЕ МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ (ГОСТ 14957-76)					
МА2-1	Al = 3,8 ... 5 Mn = 0,3 ... 0,7 Zn = 0,8 ... 1,5	275	17	Отжиг	Детали летательных аппаратов (люки, створки, дверцы, панели)
МА8	Mn = 1,3 ... 2,2 Ce = 0,15 ... 0,3	226	20	Отжиг	Высоконагруженные коррозионностойкие детали (до 200 °С)
МА5	Al = 7,8 ... 9,2 Zn = 0,2 ... 0,8 Mn = 0,15 ... 0,5	320	14	Закалка и старение при 175 °С	Деталей летательных аппаратов с максимальной прочностью
МА14	Zn = 5,0 ... 6,0 Zr = 0,3 ... 0,9	350	9	Закалка и старение при 175 °С	Высоконагруженные детали летательных аппаратов (до 250 °С)
МА21	Al = 4,3 ... 5,3 Mn = 0,0 ... 0,1 Ce = 0,0 ... 0,15 Zn = 1,0 ... 2,0 Cd = 4,0 ... 5,0 Li = 7,5 ... 9	196	8	Отжиг	Средненагруженные детали для работы до 100 °С
МА11	Mn = 1,5 ... 2,5 Nd = 2,5 ... 4,0 Ni = 0,1 ... 0,25	280	10	Закалка и старение при 175 °С	Детали, работающие до 250 °С
ЛИТЕЙНЫЕ МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ (ГОСТ 2856-79)					
МЛ3	Al = 2,5 ... 3,5 Mn = 0,15 ... 0,5 Zn = 0,5 ... 1,5	157	6	Литьё в землю	Средненагруженные детали, герметичные детали до 150 °С
МЛ5	Al = 7,5 ... 9,0 Mn = 0,15 ... 0,5 Zn = 0,2 ... 0,8	216	4	Закалка	Высоко- и средненагруженные детали (до 150 °С)
		220	5	Закалка и старение при 175 °С	

1	2	3	4	5	6
МЛ8	Zn = 5,5 ... 6,6 Zr = 0,7 ... 1,1 Cd = 0,2 ... 0,8	255	5	Закалка и старение при 175 °С	Ненагруженные детали машин (до 200 °С).
МЛ12	Zn = 4,0 ... 5,0 Zr = 0,6 ... 1,1	196	6	Литьё и старение при 300 °С	Высоконагруженные детали при 200 °С
		270	3	Закалка и старение при 300 °С	
МЛ15	Zn = 4,0 ... 5,0 Zr = 0,7 ... 1,1 La = 0,6 ... 1,2	210	3	Литьё	Высоконагруженные детали для работы до 350 °С.
МЛ9	Zr = 0,4 ... 1,0 Y = 0,0 ... 0,8 Nd = 1,9 ... 2,6	200	8	Литьё	Детали двигателей топливной аппаратуры (от 200 до 400 °С)
МЛ19	Y = 1,4 ... 2,2 Zn = 0,1 ... 0,6 Nd = 1,6 ... 2,3 Zr = 0,4 ... 1,0	216	3	Закалка и старение при 175 °С	Нагруженные детали (до 300 °С)

Небольшой эффект упрочнения этого сплава объясняется тем, что при распаде твёрдого раствора образуются сразу стабильные фазы с относительно большим расстоянием между частицами. Для магниевых сплавов характерна малая скорость диффузионных процессов, что требует больших выдержек при нагреве под закалку (от 4 до 24 ч). По этой же причине возможна закалка на воздухе.

Марганец, связывая примесь железа, повышает коррозионную стойкость сплава МА8. Добавка церия измельчает зерно, повышает прочность и пластичность сплава МА8. Термической обработкой этот сплав не упрочняется. Сплав МА14 обладает высокими механическими свойствами и коррозионной стойкостью.

К жаропрочным магниевым сплавам относятся сплавы пригодные к длительной работе при температурах от 125 до 300 °С. Для всех жаропрочных магниевых сплавов характерна гетерогенная структура, состоящая из твёрдого раствора легирующих элементов в магнии и избыточных фаз – химических интерметаллидных соединений AlCe, Mg₅Th, Mg₉Nd и др.

В процессе старения магниевых жаропрочных сплавов происходит мелкодисперсное субмикроскопическое выделение тугоплавких фаз, которые затрудняют пластическую деформацию при комнатной и повышенной температурах.

Литейные магниевые сплавы. К высокопрочным литейным магниевым сплавам относятся сплавы, предназначенные для длительной работы при температурах до (150 ... 200) °С. Высокопрочные литейные сплавы по химическому составу разделяют на две группы:

- а) сплавы системы Mg-Al-Zn; МЛЗ, МЛ5, МЛ6;
- б) сплавы системы Mg-Zn-Zr: МЛ8, МЛ 12, МЛ15.

В сплавах системы Mg-Al-Zn основным упрочнителем является алюминий. Структура литых сплавов состоит из твёрдого раствора алюминия и цинка в магнии с включениями по границам зёрен соединения $Mg_{17}Al_{12}$. Сплавы системы Mg-Al-Zr обладают более высокими значениями пределов прочности и текучести по сравнению со сплавами системы Mg-Al-Zn. Марганец от 0,1 до 0,5 % повышает коррозионную стойкость высокопрочных литейных магниевых сплавов.

Характерной особенностью магниевых сплавов вышеупомянутых систем является усадочная пористость (рыхлота) в отливках. К жаропрочным литейным сплавам относятся сплавы пригодные для длительной эксплуатации при температурах от 250 до 350 °С и кратковременной до 400 °С, разработанные на основе систем магний – редкоземельные металлы-цирконий. Представителем таких сплавов является сплав МЛ19, который имеет хорошие литейные свойства, высокогерметичен, стабильноразмерен, мало склонен к образованию микрорыхлот и горячих трещин в отливках.

Применение магниевых сплавов в промышленности. Малая плотность магниевых сплавов, а в отдельных случаях высокая удельная прочность, способствуют их широкому применению в самолётостроении (корпуса приборов, насосов, коробок передач, фонарей, дверей кабин и др.), ракетной технике (корпуса ракет, обтекатели, топливные и кислородные баки), конструкциях автомобилей и тракторов (корпуса, колёса, помпы и др.), в приборостроении (корпуса и детали приборов). В электротехнической промышленности магниевые сплавы могут быть широко применены при производстве электродвигателей.

Вследствие малой способности к поглощению тепловых нейтронов их используют в атомной технике, в результате высокой демпфирующей (рассеивающей) способности – при производстве кожухов для электронной аппаратуры, а также пиротехнике.

Вопросы для самопроверки

1. Какие сплавы называются латунями? Как они маркируются?
2. Структура деформируемых и литейных латуней.
3. Какие бронзы вы знаете? Как они маркируются?
4. На какие группы по технологическим свойствам делятся бронзы?

5. Какими свойствами обладают оловянистые бронзы, где они применяются?
6. Где применяются алюминиевые бронзы? Их микроструктура и свойства.
7. Область применения свинцовистых бронз.
8. Особенности свойств бериллиевой бронзы. Ее термообработка.
9. Какими свойствами обладает мельхиор?
10. Как маркируются алюминий и алюминиевые сплавы?
11. Какие структурные составляющие входят в состав деформируемых алюминиевых сплавов, упрочняемых термообработкой?
12. Какие сплавы относятся к деформируемым, не упрочняемым термообработкой? Как они упрочняются?
13. Как влияет модификация на структуру литейного алюминиевого сплава-силумина?
14. Области применения силуминов.
15. Какие существуют системы классификации магниевых сплавов?
16. Каковы принципы маркировки деформируемых и литейных магниевых сплавов?
17. Какие свойства объясняют широкое применение магниевых сплавов?
18. Какими элементами легируют магниевые сплавы?
19. Для изготовления каких изделий используются деформируемые магниевые сплавы?
20. Для изготовления каких изделий используются литейные магниевые сплавы?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

МИКРОАНАЛИЗ ТИТАНОВЫХ, АНТИФРИКЦИОННЫХ СПЛАВОВ И ПРИПОЕВ

Цель работы: приобрести практические навыки в определении микроструктуры и свойств титановых, антифрикционных сплавов и припоев.

Оборудование, приборы, материалы

1. Металлографический микроскоп МИМ-7.
2. Набор микрошлифов технического титана и титановых сплавов.
3. Твердомер Бринелля.
3. Диаграммы состояния систем титановых сплавов.

Методические указания по выполнению работы

1. Рассмотреть под микроскопом и зарисовать структуру технического титана и титановых сплавов.
2. Замерить твердость титановых сплавов на приборе Роквелла (шкала В).

Содержание отчета

1. Зарисовать диаграммы состояния сплавов титан– α стабилизаторы, титан– β стабилизаторы; Ti – нейтральные компоненты.
2. Зарисовать микроструктуру технического титана и титановых сплавов (деформируемых и литейных). Указать марку сплава, химический состав, механические свойства, применение.
3. Объяснить влияние структурных составляющих на свойства.

Теоретические сведения

Титан и титановые сплавы.

Титан – серебристо-белый легкий металл с удельной плотностью $4,5 \text{ г/см}^3$ и температурой плавления $1668 \text{ }^\circ\text{C}$. При температуре $882 \text{ }^\circ\text{C}$ титан претерпевает полиморфное превращение Ti α (ГПУ) \rightarrow Ti β (ОЦК). С уменьшением чистоты титана (марки ВТ1-00, ВТ1-0, ВТ1-1) прочностные свойства повышаются, а пластичность падает.

Промышленный способ производства титана состоит в обогащении и хлорировании титановой руды с последующим восстановлением из четыреххлористого титана металлическим магнием. Полученную при этом титановую губку маркируют по твердости по Бринеллю выплавленных из нее образцов (ТГ100, ТГ110 и т. д.). Затем губку размалывают, прессуют и спекают или переплавляют.

Технический титан

Титан обладает высокой коррозионной стойкостью в большом количестве агрессивных сред, превосходя даже нержавеющей сталь. Высокая коррозионная стойкость обусловлена образованием на поверхности плотной защитной пленки TiO₂ отлично стойкой в морской воде. Титан отличается высокой удельной

прочностью σ/ρ .

Низкий модуль упругости почти в 2 раза меньше, чем у железа, что затрудняет изготовление жестких конструкций. Титан обладает склонностью к ползучести даже при температуре 20–25 °С.

В условиях глубокого холода характеризуется высокой прочностью.

При повышении температуры титан поглощает газы, поэтому он нашел применение в радиоэлектронной промышленности в качестве геттерного материала. Геттеры предназначены для повышения вакуума электронных ламп.

Титан хорошо сваривается, но плохо обрабатывается резанием, налипая на инструмент, который быстро изнашивается. Титан имеет низкие антифрикционные свойства.

Чистый титан находит применение в авиации и ракетостроении, а также в химической промышленности. Металлургической промышленностью изготавливается в виде листов, труб, прутков, проволоки и других полуфабрикатов. Повышение прочностных характеристик титана может быть достигнуто за счет легирования его Al, Mo, V, Mn, Cr, Sn, Zr, Nb. Упрочнение титана при легировании сопровождается снижением его пластичности.

Фазовые превращения титановых сплавов.

На рис.1 представлена схема диаграмм состояния титан-легирующий элемент.

Легирующие элементы оказывают большое влияние на температуру полиморфного превращения. Такие элементы, как Al, O, N повышают температуру полиморфного превращения и расширяют α область, их называют α -стабилизаторами. Практическое значение для легирования титана имеет только алюминий, так как кислород и азот сильно охрупчивают сплавы. Такие элементы, как Mo, V, Mn, Cr, Fe понижают температуру полиморфного превращения и расширяют область существования β -фазы; их называют (β -стабилизаторами). При легировании титана Mn, Fe, Cr, Si в сплавах протекает эвтектоидное превращение. Образование эвтектоида охрупчивает сплав.

Деформируемые титановые сплавы.

В соответствии со структурой различают:

1) α -сплавы со структурой твердого раствора легирующих элементов в α -титане; основной легирующий элемент в α -сплавах – алюминий (BT – 5, BT 5 – 1, OT – 4);

2) $\alpha+\beta$ – сплавы, состоящие из α и β – твердых растворов.

Содержат кроме алюминия 2–4 % β -стабилизаторов, таких как Cr, Mo, Fe и других (BT6, BT8, BT14);

3) β – сплавы, имеющие структуру твердого раствора легирующих элементов в β – титане; эти сплавы содержат большое количество β -стабилизаторов (BT15, BT22, BT3-1).

Наиболее ходовой сплав BT6 используется в отожженном состоянии, $T_{\text{раб}} - 400$ °С (max): диски компрессоров авиационного газотурбинного двига-

теля. Упрочняющая термообработка: закалка – 890 °С, охлаждение – вода, структура $\alpha' + \beta$, старение при 520 °С в течение 2–6 ч. Сплавы $\alpha + \beta$ более прочны, чем однофазные, хорошо куются и штампуются, поддаются термической обработке. К этому классу принадлежат большинство промышленных сплавов.

Титан и α – сплавы титана подвергают только рекристаллизационному отжигу, $\alpha + \beta$ – сплавы могут быть упрочнены закалкой с последующим старением.

На рисунках 2–4 приведены микроструктуры титановых сплавов, химический состав некоторых сплавов и механические свойства даны в таблице 1.

Важнейшими областями использования титановых сплавов являются следующие:

- авиация и ракетостроение, где из титановых сплавов изготавливаются корпуса двигателей, баллоны для газов, сопла, диски, лопатки компрессоров, детали крепежа, фюзеляжа, обшивки для сверхзвуковых самолетов и т. д;
- химическая промышленность (клапаны, компрессоры, вентили для агрессивных жидкостей баллоны для сжиженных газов);
- морское и речное судостроение (гребные винты, обшивка морских судов, подводных лодок, торпед);
- криогенная техника (при отрицательных температурах до -250 °С).

Расширение области применения титана и его сплавов сдерживает высокая стоимость. В земной коре содержится много (~0,6 %) титана, т. е. среди конструкционных материалов по распространенности он занимает четвертое место после алюминия, железа.

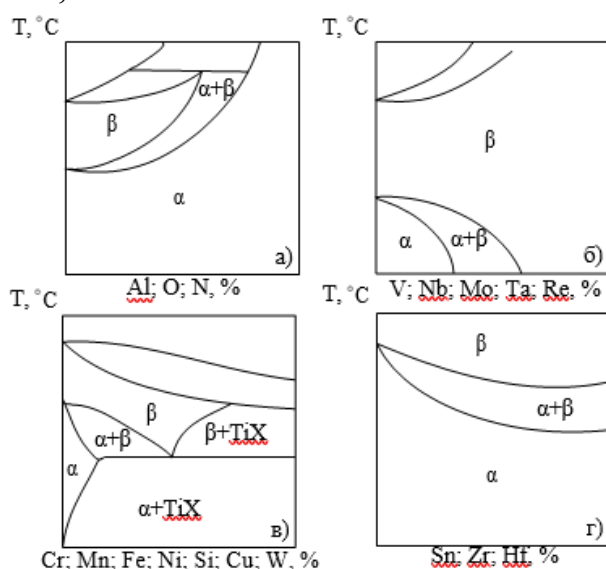
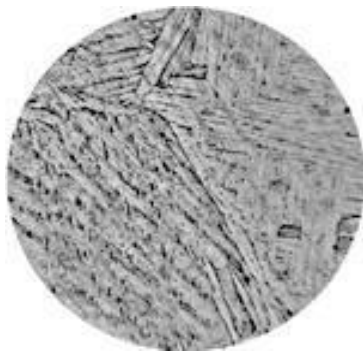
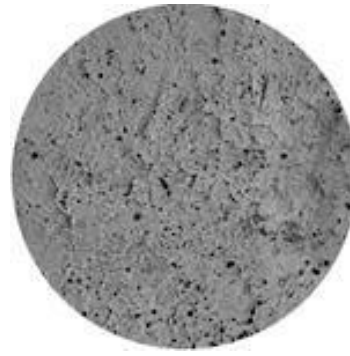


Рисунок 1 – Диаграммы состояний систем «Ti-легирующий элемент» (схемы): а) «Ti- α -стабилизаторы»; б) «Ti-изоморфные β -стабилизаторы»; в) «Ti-эвтектоидообразующие β -стабилизаторы»; г) «Ti-нейтральные элементы»

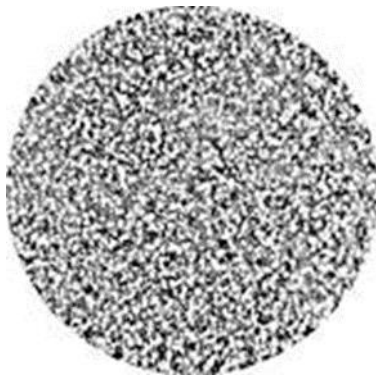


а)



б)

Рисунок 2 – Микроструктура сплава ВТ5-1 (группа α -сплавов):
а) после перегрева, охлаждение с печью с 1050 С – пластинчатая структура;
б) после рекристаллизационного отжига – зерна α -раствора и небольшие частицы β -фазы

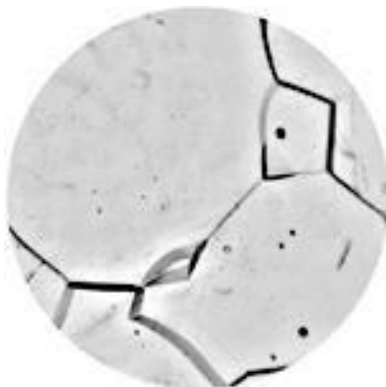


а)



б)

Рисунок 3 – Микроструктура титанового высокопрочного сплава ВТ3-1 (группа $\alpha+\beta$ -сплавов мартенситного класса):
а) после закалки и отпуска; б) после закалки и старения – ориентированные частицы α -фазы, возникшие в результате распада мартенситной α' -фазы



а)



б)

Рисунок 4 – Микроструктура титанового высокопрочного сплава ВТ22 (группа псевдо β -сплавов):
а) после закалки – зерна равноосные; б) медленное охлаждение из β области (отжиг). В результате распада β -фазы появились ориентированные пластинки α -фазы

Литейные титановые сплавы

Сплавы имеют хорошие литейные свойства (высокая жидкотекучесть, хо-

рошая плотность отливок, объемная усадка около 3 %). Недостатком литейных титановых сплавов является склонность к поглощению газов и высокая активность при взаимодействии с формовочными материалами. Поэтому плавку и разливку ведут в вакууме или в среде нейтральных газов. Это сплавы ВТ5Л, ВТ3-1Л, ВТ14Л. Отличие литейного сплава от деформированного (составы те же) состоит в том, что в литейном сплаве допускается большее содержание примесей. Материал для литейных форм – графит.

Сплавы ВТ6Л, ВТ9Л, ВТ20Л используют в авиационной промышленности вместо штамповок. Ресурс работы нагруженных литых деталей из титановых сплавов повышают с помощью высокотемпературной газостатической обработки (ВГО): детали помещают в газостат, где они при повышенной температуре и давлениях до 100 МПа (1000 атм) подвергаются всестороннему сжатию, которое практически не изменяет формы и размеров детали после окончания ВГО. ВГО повышает σ_B на 20 % циклическую долговечность на один (два) порядка. ВГО применяют только для особо ответственных деталей.

Таблица 1 – Химический состав, термообработка, структура и механические свойства титановых сплавов.

Сплав	Содержание легирующих элементов (стабилизаторов); % остальные – Ti	Структура	Механические свойства				Область применения
			σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	КСУ МДж/м ²	
Деформируемые сплавы							
BT 1-0 BT 1-1	0,18Fe; 0,10Si; 0,07C; 0,12O; 0,01H; 0,25Fe; 0,12Si; 0,08C; 0,15O; 0,12H; 0,05N;	технический титан; игольчатая (мартенситного типа)	450-600 520	380-500 400	20-25 24	-	Химическая промышленность, криогенные установки
BT 5 BT 5-1	4,3-6,2 Al; 4,5-6,0 Al; 2,0-3,0 Sn;	α – сплавы; отжиг	700-950 700-950	660-850 650-850	10-15 10-15	0,5 0,4	Трубы, проволока, сортовой прокат. Т-рабочая от криогенной до 450-500 °С
OT 4 BT20	3,5-5,0 Al; 0,8-2,0 Mn; 5,5-7,0 Al; 0,8-2,3V; 0,5-1,8Mn; 1,4-2,5Zr;	псевдо α – сплавы; отжиг 800-850 °С	700-900 950-1150	550-650 850-1000	12-20 8	0,4	Детали для работы при криогенной и повышенных температурах до 450 °С
BT 6 BT 16 BT 22	5,5-7,0Al; 3,5-5,3V; 1,6-3,8Al; 4,0-5,0V; 4,5-5,5 Mo; 4,8-5,2Al; 4,5-5,5V; 4,5-5,5Mo; 0,8-1,2Cr; 0,8-1,2Fe;	(α + β) сплавы; термообработка: (закалка 900-950 °С); старение – 450-550 °С; отжиг	1100-1150 1250-1450 1100-1250	1000-1050 1100-1200 -	14-16 4-6 9	0,4-0,8 0,4-0,6 -	Сварные конструкции для длительной работы при 400 °С, кратковременно до 750 °С; Авиационные детали длительно работающие до 350 °С; Детали работающие при 500 °С, газотурбинные двигатели, диски компрессоров.
Литейные сплавы							
BT 5Л BT 6Л BT 20Л	4,1-6,2 Al; 5,0-6,5 Al; 3,5-4,5 V; 5,5-7,5Al; 0,8-1,8 V; 0,5-2,0 Mo; 1,5-2,5Zr;	отжиг 800-850 °С, воздух закалка 900-950 °С старение 450-550 °С отжиг 700-800 °С, воздух	700 850 930	630 - -	6-8 5 8	0,3 - -	Корпуса, рабочие колеса насосов, патрубки и т. д.; Авиационная промышленность; Жаропрочные, Траб. до 500 °С.
Маркировка: буквы BT или OT, цифры – условный номер сплава							

Антифрикционные сплавы

В машиностроении применяют как подшипники качения, так и подшипники скольжения в виде вкладышей, втулок. Для их изготовления применяют антифрикционные сплавы.

Основные свойства сплавов: антифрикционность и сопротивление усталости.

Антифрикционность – способность материала обеспечивать низкий коэффициент трения скольжения и тем самым низкие потери на трение и малую скорость изнашивания сопрягаемой детали – стального или чугунного вала.

Антифрикционность обеспечивают:

- высокая теплопроводность;
- хорошая смачиваемость смазочным материалом;
- способность образовывать на поверхности защитные пленки мягкого металла;
- хорошая прирабатываемость, основанная на способности материала при трении легко пластически деформироваться и увеличивать площадь фактического контакта, что приводит к снижению местного давления и температуры на поверхности подшипника;
- коррозионная стойкость в среде масел.

Критерии для оценки подшипникового материала: коэффициент трения (f) и допустимые характеристики: давление P , действующие на опору; скорость скольжения V .

Антифрикционность сплавов достигается получением гетерогенной структуры, состоящей из мягкой, сравнительно легко деформирующейся основы и твердых включений в этой основе, предотвращающих молекулярное сцепление.

Мягкая составляющая обеспечивает прирабатываемость в процессе пуска, твердая – износостойкость при эксплуатации.

Все сплавы делятся на две группы.

Сплавы с мягкой матрицей и твердыми включениями.

К этой группе относятся: баббиты, оловянистые бронзы, алюминиевые сплавы.

Баббиты

Сплавы по антифрикционным свойствам, превосходящим другие сплавы, но уступают им по сопротивлению усталости, поэтому их применяют только для тонкого покрытия рабочей поверхности опоры скольжения.

а) К оловянистым баббитам относятся Б83, Б88, которые используются для подшипников главного коленчатого вала тепловозных двигателей, паровых турбин, дизелей.

Диаграмма Sn-Sb дана на рисунке 5, а структура сплавов на рисунке 7. Химический состав, свойства, даны в таблице 2.

Баббит маркируется буквой – Б, цифра показывает процент олова. Структура Б83 состоит из α – твердого раствора Sb и Cu в олове, кубических кристалл-

лов β – фазы (Sn Sb), игольчатых кристаллов (звездочек) $Cu_3 Sn$. Медь добавляют в сплав для устранения ликвации по плотности Sn и Sb.

б) В связи с высокой стоимостью олова его заменяют свинцом. К свинцовистым баббитам относятся: Б16, БС6 (цифра – % Sn).

Баббит Б16 (рисунок 4б) представляет структуру: мягкая основа – эвтетика, состоящая из свинца (~80 %), олова (~10 %) и сурьмы (~10 %); твердых кристаллов β -раствора (Sn Sb) и очень мелких игольчатых кристаллов Cu_2Sb ; применяется для изготовления вкладышей подшипников подвижного железнодорожного состава (паровозов, тепловозов).

Таблица 2 – Химический состав, свойства баббитов

Марка баббита	Химический состав, %	Свойства					
		Плотность δ , г/см ³	σ_b МПа	НВ МПа	δ , %	КСУ МДж/м ²	Коэффициент трения со смазкой
Б83	10-12 Sb; 5,5-6,5 Cu; ост. Sn	7,38	90	270-300	6	0,06	0,005
Б88	7,3-7,8 Sb; 2,5-3,5 Cu; 0,8-1,2 Cd; 0,15-0,25 Ni; ост Sn;	7,35	80	270-300	9	0,08	0,005
Б16	15-17 Sn; 15-17 Sb; 1,5-2,0 Cu; ост. Pb	9,29	78	300	0,2	0,014	0,006
БК2	1,5-2,1 Sn; 0,30-0,55 Ca; 0,20-0,40 Na; 0,06-0,11Mg; ост. Pb	10,3	95	200	8	0,12	0,004

в) На железнодорожном транспорте широко применяется кальциевый баббит марки БК2 (диаграмма Pb-Ca, рисунок б) состоящий из небольших добавок кальция, натрия, остальное свинец.

Кальций почти не растворяется в свинце, а образует химическое соединение $Pb_3 Ca$. Натрий, растворяясь в свинце, повышает его твердость.

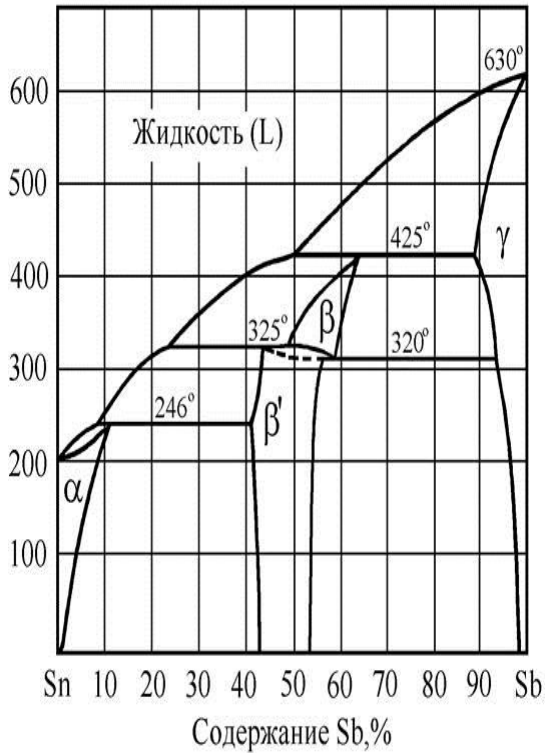


Рисунок 5 – Диаграмма состояния системы сплавов Sn – Sb

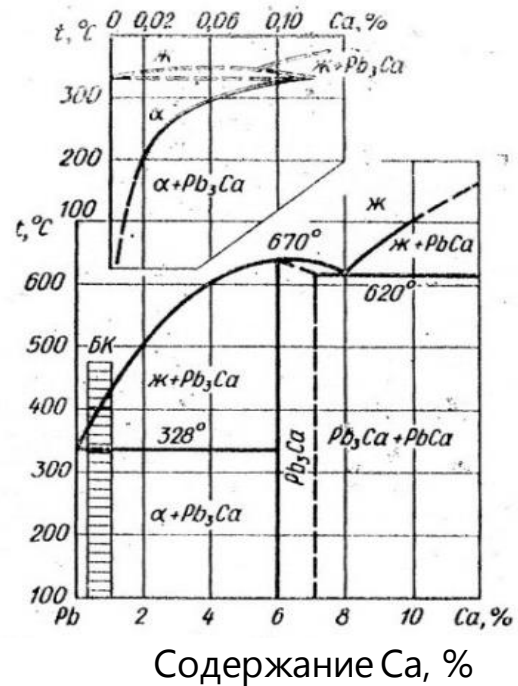


Рисунок 6 – Диаграмма состояния системы сплавов Pb – Ca

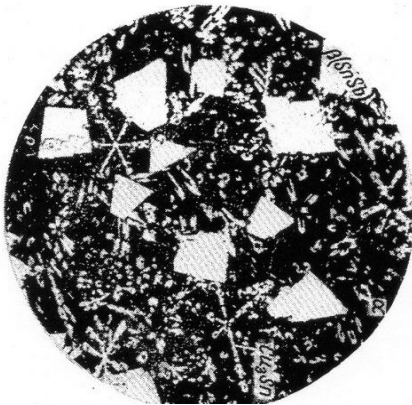


Рисунок 7 – Микроструктура оловянистого баббита Б83

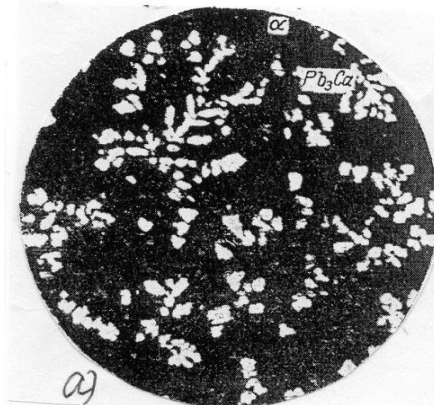


Рисунок 8 – Микроструктура свинцовистых баббитов: а) кальцевого БК2; б) Б16



Таким образом структура баббита БК2 представляет мелкие твердые включения Pb_3Ca в мягкой основе твердого раствора (рисунок 8,а).

Для улучшения коррозионной стойкости при луживании в баббит вводится олово и магний.

Бронзы оловянистые

Структура бронз и диаграмма Cu – Sn даны в работе N4. Бронзы Бр.О10Ф1, Бр.О10Ц2, Бр.О5Ц5С5 используются для изготовления монолитных подшипников скольжения турбин, электродвигателей, компрессоров. выдерживают значительные нагрузки P и средние скорости скольжения V.

Латуни

Заменители бронз в опорах трения, но уступают им по антифрикционным свойствам: невысокие нагрузки P и малые скорости V (менее 2 м/с), поэтому применяются в приборостроении. Это марки ЛЦ36К4, ЛЦ40Мц2, ЛЦ38Мц2С2.

Сплавы с твердой матрицей и мягкими включениями.

Бронза свинцовистая Бр.С30 (см. работу N10).

Микроструктура: Cu (основа) плюс включения Pb.

Свинцовистые бронзы обладают высокой теплопроводностью: в 4 раза выше, чем у оловянистых бронз и в 6 раз выше, чем у баббитов. Допускают нагрев до 300–320 °С.

Применяют для биметаллических подшипников: тонкий слой бронзы Бр.С30 заливается на стальную ленту.

Применение: высоконагруженные опорные и шатунные подшипники мощных турбин, деталей авиационных моторов. Недостаток: ликвация Pb, что снижает антифрикционные свойства, поэтому применяют легирование оловом, никелем.

Алюминиевые сплавы

Диаграмма алюминий–олово дана на рисунке 9.

Сплавы классифицируются по микроструктуре. К первой группе относят сплавы, имеющие твердые включения $CuAl_2$, $AlSb$, $Al_3 Ni$ в пластичной основе. Так микроструктура сплава АСМ (рисунок 10) состоит из кристаллов химического соединения $AlSb$, равномерно распределенных в двойной эвтектике (α -твердого раствора Mg и Sb и химического соединения $AlSb$).

В сплавах второй группы АО20-1 и др. (рисунок 11) микроструктура состоит из α -твердого раствора Cu в Al, твердых включений химического соединения $CuAl_2$ и равномерно распределенных включений Sn. У алюминиевых сплавов снижение твердости с повышением температуры происходит медленнее, чем у оловянистых баббитов.

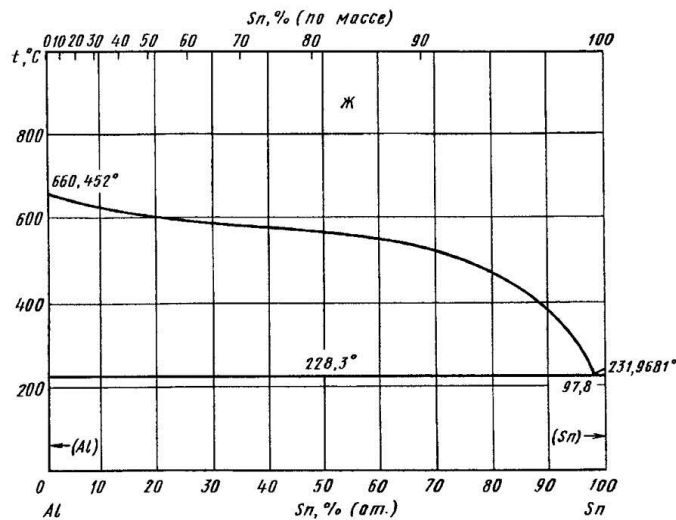


Рисунок 9 – Диаграмма состояния системы сплавов Al – Sn

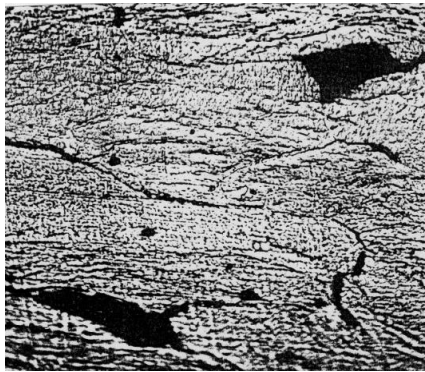


Рисунок 10 – Микроструктура алюминиевого сплава АСМ (5 % Sb; 0.5 % Mn; остальное Al)

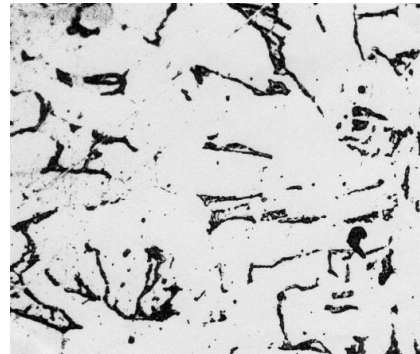


Рисунок 11 – Микроструктура алюминиевого сплава АО20-1 (1 % Cu; 20 % Sn; остальное Al)

Усталостная же прочность значительно выше, чем у свинцовистой бронзы и оловянистых баббитов.

Антифрикционные чугуны

Используются группы марок АЧ01, АЧС3 и др, АЧВ1, АЧВ2 и т. д. с перлитной основой и повышенным количеством графита. Являясь сам по себе смазкой графит впитывает смазочные масла и значительно понижает коэффициент трения. Присутствие же феррита в структуре антифрикционного чугуна недопустимо, так как он вызывает быстрый износ.

Достоинством чугунов является невысокая стоимость; недостаток: плохая прирабатываемость, пониженная стойкость к ударным нагрузкам, чувствительность к недостаточности смазки.

Твердость чугунов должна быть меньше твердости стальной цапфы.

Цинковые сплавы

Дефицитность олова, а также свинца заставляет изыскивать и применять сплавы на другой, менее дефицитной основе (цинка, алюминия).

В качестве цинковых подшипниковых применяют сплавы марки ЦАМ10-5 и ЦАМ5-10. Их состав приведен в таблице 3 (там же указаны структура и некоторые свойства).

Цинковые сплавы ЦАМ10-5 и ЦАМ5-10 уступают баббитам на оловянистой основе по пластичности, коэффициенту трения и коэффициенту линейного расширения и примерно равноценны свинцовистым баббитам.

Таблица 3 – Состав и некоторые свойства цинковых баббитов

Марка баббита	Содержание элементов, %		Свойства				
	Al	Cu	Плотность г/см ³	t _{пл} °C	δ, %	Коэффициент трения	α · 10 ⁶
ЦАМ10-5	11	5	6,3	395	0,5	0,009	27
ЦАМ5-10	5	10	7,1	500	1	-	28

Примечание:

1. Мягкая основа указанных баббитов – эвтектика Zn+Al+CuZn₃; твердые включения – CuZn₃.

2. Предел прочности указанных баббитов 300 МПа.

Припой.

Припой – сплавы, применяемые для соединения частей спаиваемых изделий.

Требования: высокая электропроводимость (небольшое переходное электросопротивление ρ), жидкотекучесть, механическая прочность; температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) металла и припоя должны быть близки; хорошая смачиваемость поверхности металла; коррозионная стойкость.

Припой в зависимости от температуры плавления делятся на:

– мягкие (низкотемпературная пайка), T – плавления ниже 400 °C;

– твердые (высокотемпературная пайка), T – плавления 780–920 °C.

В таблице 4 приведены составы и некоторые свойства мягких и твердых припоев.

На рисунках 12 и 13 даны диаграммы состояния системы Pb – Sn; Sn – Zn

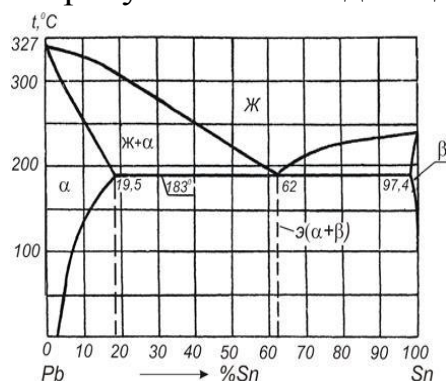


Рисунок 12 – Диаграмма состояния Pb – Sn

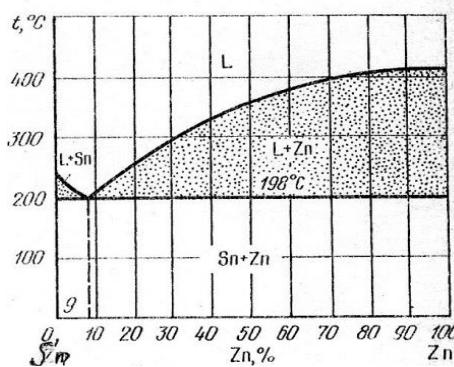


Рисунок 13 – Диаграмма состояния Zn – Sn

Таблица 4 – Составы и свойства мягких и твердых припоев

Марка припоев	Система	Химический состав, %	Свойства				Примечание
			Температурный интервал затвердевания, °С	Электропроводность М/Ом·мм ²	σ _в , МПа		
					металла	шва	
Мягкие припои							
ПОС-90	Pb-Sn	89-90Sn; <0,15Sb; ост.Pb	заэвтектический сплав 220-185	-	40	-	Пайка посуды, медицинской аппаратуры, меди, латуни, бронзы так же пайка белой жести, железа
ПОС-61	Pb-Sn	56-62Sn; <0,8Sb; ост.Pb	эвтектический сплав 185-183	6,9	50	40-80	
ПОС-30	Pb-Sn	29-30Sn; 1,5-2,0Sb; ост.Pb	доэвтектический сплав 256-183	5,5	30	30-90	
ПОЦ-92	Sn-Zn	8Zn; 92Sn	эвтектический сплав 200-198	-	-	-	Пайка алюминия и алюминиевых сплавов
ПОЦ-70	Sn-Zn	70Sn; 30Zn	заэвтектический сплав 400-199	-	-	-	
ПСр2,5	Pb-Ag	2,3-2,7Ag; 5,5Sn; ост.Pb	305-295	5,2	33	-	Пайка различных металлов и сплавов
Твердые припои							
ПСр72	Ag-Cu	27,3-28,5Cu; ост.Ag; примеси <0,25	779	электро сопротивление, Ом·мм ² /м 0,022	-	-	Пайка токопроводящих деталей – меди, латуни, бронзы, стали, серебра, платины и других металлов кроме алюминия
ПСр45	Ag-Cu-Zn	29,5-30,5Cu; 24-26,5Zn; ост.Ag; примеси <0,5	725-660	0,097	-	-	
ПМЦ54	Cu-Zn	52-58Cu; 46Zn	860-825	-	220	-	Медь и ее сплавы, сталь, ковкий чугун

Мягкие припои

К этой группе припоев относятся оловянно-свинцовистые, оловянно-цинковые, свинцовисто-серебряные.

Диаграммы состояния систем сплавов Pb-Sn, Sn-Zn дана на рисунках 8, 9.

Припои маркируются буквой П, затем идут элементы системы, цифра указывает на содержание Sn, %.

Система свинец-олово (Pb-Sn).

Температура плавления эвтектики 183 °С, эвтектика – смесь кристаллов твердых растворов α и β , где α – твердый раствор замещения Sn в Pb, а β – твердый раствор замещения Pb в Sn.

Доэвтектические припои; ПОС30, ПОС40, ПОС50, где структура: α + эвтектика;

Эвтектический припой ПОС 61 (третник) наиболее легкоплавкий, структура: эвтектика ($\alpha+\beta$)

Заэвтектический ПОС 90 со структурой β – эвтектика.

Переходное электросопротивление $\rho = 0,14-0,21 \text{ мк Ом} \cdot \text{м}$, $\sigma_v = 50 - 70 \text{ МПа}$. Из-за низкой прочности соединения паяная деталь не должна подвергаться высоким механическим нагрузкам.

Припои применяются для пайки очень тонких проводов из меди и медных сплавов.

Система олово – цинк (Sn-Zn)

Температура плавления эвтектики 199 °С. Эвтектический сплав ПОЦ90, структура-эвтектика (Sn + Zn). Заэвтектические сплавы: ПОЦ70, ПОЦ60, ПОЦ40, структура: эвтектика + Zn.

Припои применяются для пайки алюминия и его сплавов. Они имеют более высокую прочность по сравнению с припоями системы Pb-Sn.

Для пайки при очень низких температурах (<100 °С) применяют сплавы Bi с Pb, Sn, Cd, которые образуют тройные и более сложные эвтектики, но они имеют невысокие механические свойства, обладают хрупкостью.

Система свинец – серебро (Pb-Ag)

Припои применяются для пайки любых металлов и сплавов, например: ПСр2,5 (2,5 % Ag; 5,5 % Sn; 92 % Pb).

Твердые припои (высокотемпературная пайка)

Соединения отличаются более высокими механическими свойствами. Переходное электросопротивление этих припоев меньше, чем для низкотемпературных припоев.

Система медь – цинк (Cu-Zn).

Это припои ПМЦ-36, ПМЦ-48, ПМЦ-54, где цифра показывает процент меди (Cu).

Переходное электросопротивление $\rho = 0,03-0,04 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$.

Температура плавления припоев в диапазоне 825–880 °С.

Система медь – фосфор (Cu-P).

Особенностью припоя ПМФ7 (7 % P) является высокая технологичность, возможность проведения пайки без флюса.

Серебряные припой.

Применяются для пайки любых металлов и сплавов, обладают высокой коррозионной стойкостью.

Система Cu-Zn-Ag.

Это припой ПСр72, ПСр61, ПСр45 и др. Цифра – % Ag. Так припой ПСр40 (40% Ag, 17% Cu, 17% Zn, 26% Cd) имеет переходное электросопротивление $\rho = 0,022-0,065 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$. Температура плавления 780–920 °С.

Припой ПСр72 (72 % Ag) имеет $T_{\text{пл}} = 779 \text{ °С}$, структура: эвтектика ($\alpha + \beta$) переходное электросопротивление $\rho = 0,022 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$.

Флюсы

Вспомогательные материалы, применяемые при пайке.

Они должны:

- растворять и удалять окислы с поверхности металла;
- защищать поверхность металла в процессе пайки;
- уменьшать поверхностное натяжение расплавленного припоя;
- улучшать растекаемость припоя.

Вопросы для самопроверки

1. Дать характеристику свойств технического титана.
2. Какие полиморфные модификации имеет титан?
2. Каким недостатком обладает титан?
4. Как получают технический титан?
5. На какие группы делятся легирующие элементы (стабилизаторы)? Какие области они расширяют.
6. Какие сплавы относятся к группе α -сплавов? Какой термообработке они подвергаются? Марки.
7. Какие сплавы относятся к группе $\alpha+\beta$? Их термообработка, марки.
8. Область применения титановых сплавов.
9. В чем отличие деформируемых и литейных сплавов по химическому составу?
10. В чем заключается высокотемпературная газостатическая обработка (ВГО)? Когда она применяется?
11. Дайте определение антифрикционным свойствам подшипниковых сплавов
12. Как классифицируются подшипниковые сплавы по химическому составу и назначению?

13. Какие структурные составляющие входят в состав новых алюминиевых подшипниковых сплавов?
14. Как маркируются подшипниковые сплавы?
15. Укажите твердость подшипниковых сплавов и область их применения.
16. Какие сплавы называют припоями? На какие группы они делятся?
17. Какими свойствами должны обладать припой?
18. Для какой цели применяются флюсы при пайке?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: получить практические умения и навыки классификации, исследовании некоторых физико-механических свойств пластмасс; приобретении практических навыков определения их твердости, прочности, ударной вязкости; сравнение свойств металлов и пластмасс.

Материалы и оборудование: коллекция пластмассовых деталей и образцов; металлографический комплекс, включающий оптический микроскоп МИ-1, цифровую камеру Nikon Colorpix-4300 с фотоадаптером.

Методические указания по выполнению лабораторной работы

1. Выполнить лабораторные испытания и определить следующие характеристики полиэтилена (ПЭВД и ПЭНД) с разной степенью кристалличности или оргстекла, винипласта, фторопласта, текстолита:

- а) провести испытание на растяжение и определить σ_T , σ_B ;
- б) определить твердость по Бринеллю;
- в) определить ударную вязкость;
- г) оценить на примере полиэтилена влияние степени кристалличности на свойства термопластов;
- д) сравнить изученные физико-механические свойства пластмасс со свойствами металлов, приведенными в справочнике.

2. Сделать выводы и написать отчет о работе в соответствии с заданиями (для определения названных свойств пластмасс необходимы специальные твердомеры с нагрузкой 250, 750 и 2550 Н, разрывная машина с усилием не более 50 кН, маятниковый копер).

Общие сведения

Пластические массы (пластики, пластмассы) – важные конструкционные материалы, широко применяемые в машиностроении, электро- и радиотехнике, строительстве и других отраслях народного хозяйства.

Незначительная трудоемкость изготовления пластмассовых деталей (по сравнению с металлическими), их малая себестоимость, технологичность (легко формуются, склеиваются, свариваются, обрабатываются резанием), специфические физико-механические свойства обуславливают эффективность применения и зачастую незаменимость пластмасс в машиностроении.

Основными достоинствами пластмасс являются: малая плотность и возможность ее изменения, хорошие тепло-, электро- и звукоизоляционные характеристики, высокая химическая стойкость в ряде сред и неподверженность коррозии, высокие оптические свойства (бесцветность и прозрачность органических стекол), хорошие фрикционные и антифрикционные свойства, достаточно высокая прочность (прочность некоторых пластиков сопоставима с прочностью стали), хорошие декоративные свойства, бесшумность в работе (применительно к зубчатым передачам) и некоторые другие. Недостатки

пластмасс: невысокая теплостойкость, низкие ударная вязкость и модуль упругости, склонность некоторых пластмасс к старению.

Пластмассы – это материалы на основе природных, а чаще всего искусственных (синтетических) полимеров, которые под действием нагревания и давления способны формоваться в изделия заданной формы и затем устойчиво сохранять ее. Кроме основного компонента – связующего вещества, в состав пластмасс могут входить наполнители, пластификаторы, отвердители, красители, стабилизаторы, порообразователи, ингибиторы и некоторые другие добавки. Соотношение названных компонентов в пластмассах может быть, например, таким (массовая доля): связующее вещество – 30–60 %; наполнители – 40–65; пластификаторы – около 1; красители – 1–1,5; смазывающие вещества – 1–2 %.

Связующие вещества, от которых в наибольшей степени зависят свойства пластмасс – это природные или синтетические полимеры. Под полимерами понимают высокомолекулярные вещества, молекулы которых (макромолекулы) состоят из многочисленных элементарных звеньев (мономеров). Молекулярная масса их может составлять от 5000 до 1 000 000.

Природные полимеры – белки и нуклеиновые кислоты, из которых построены клетки живых организмов, природные смолы (янтарь, копал, шеллак), натуральный каучук, целлюлоза, слюда, асбест, природный графит и др.

Синтетические полимеры – это полиэтилен, полипропилен, полистирол, поливинилхлорид, полиамиды, поликарбонаты, фторопласты, фенопласты, полиметилметакрилат, фенолоформальдегидные смолы, эпоксидные смолы и др.

В отдельных случаях пластмасса, например, полиэтилен, может целиком состоять из связующего вещества – полимера. Полимеры, преимущественно синтетические, получаемые химическим синтезом простых органических веществ (мономеров) в макромолекулы методами полимеризации или поликонденсации, являются основой не только пластмасс, но и резины, химических волокон, лаков, красок, клеев и т. д. Так, полиэтилен синтезируют путем полимеризации газа – этилена, получаемого из природного газа или нефтепродуктов. Макромолекулы полимера представляют собой цепочки из звеньев мономера, атомы в которых связаны прочной химической (ковалентной) связью.

Различие структур макромолекул (линейные, разветвленные, сетчатые – обуславливает неодинаковость свойств полимеров (рисунок 1). Так, линейные (полиэтилены, полиамиды и др.) и разветвленные (полиизобутилен и др.) полимеры характеризуются способностью образовывать анизотропные волокна и пленки и находиться в высокоэластичном состоянии; редкосетчатые полимеры (резины) обладают упругостью, густосетчатые (смолы) – хрупкие.

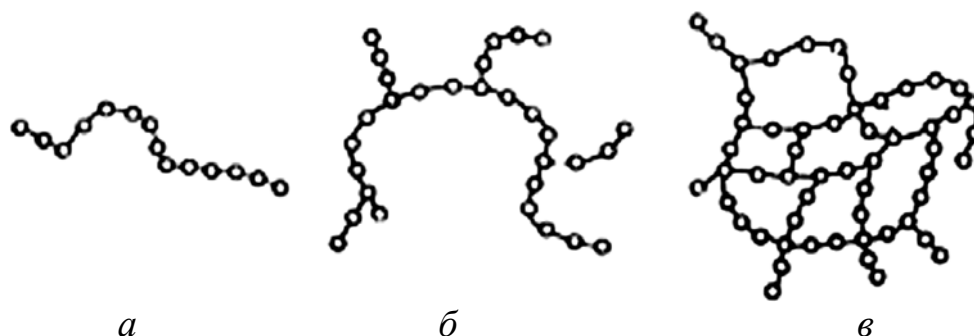


Рисунок 1 – Форма строения макромолекул полимеров:
a – линейная; *б* – разветвленная; *в* – сетчатая (схемы)

По фазовому состоянию полимеры могут быть *аморфными* или *кристаллическими*. В большинстве случаев реальные полимеры содержат аморфную и кристаллическую фазы. Содержание в полимере (в процентах) веществ в кристаллическом состоянии называют *степенью кристалличности*. На рисунке 2 приведены примеры расположения макромолекул в линейных полимерах.

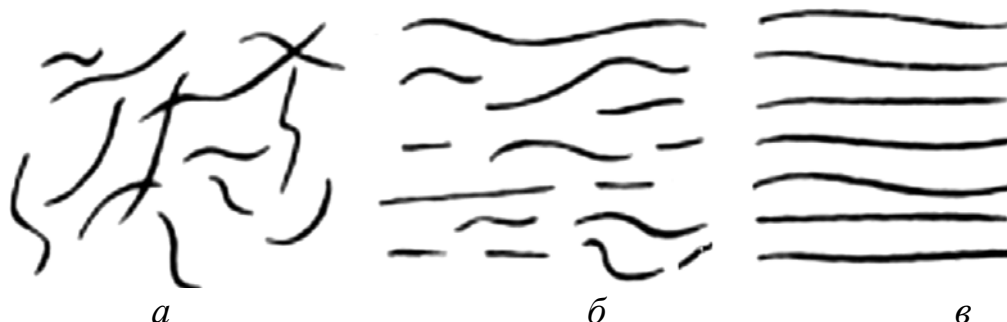


Рисунок 2 – Состояние макромолекул линейных полимеров:
a – аморфное беспорядочное; *б* – аморфное ориентированное;
в – кристаллическое (схемы)

Кристаллическую структуру имеют полимеры с макромолекулами строго регулярной линейной или редкосетчатой формы. У кристаллических полимеров более *высокие теплостойкость* и *механические свойства*.

По *полярности* различают **неполярные** (например, полиэтилен, полипропилен, фторопласт-4) и **полярные** (например, поливинилхлорид) полимеры.

Неполярные полимеры, в отличие от полярных, обладают более высокими морозостойкостью и диэлектрическими свойствами.

В зависимости от поведения при нагреве различают термопластичные (термопласты) и термореактивные (реактопласты) полимеры. Соответственно называют и пластмассы на основе этих связующих веществ.

Термопластичные – полимеры или пластмассы, которые с повышением температуры размягчаются, плавятся, при формовании не претерпевают никаких химических изменений, по мере охлаждения затвердевают и сохраняют способность пластически деформироваться при повторном нагреве. Такие по-

лимеры (полиэтилен, полистирол, капрон и др.) имеют линейную или разветвленную структуру макромолекул.

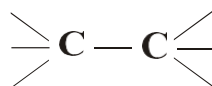
Термореактивные полимеры и пластмассы при нагреве и формовании претерпевают существенные химические изменения, затвердевают и, теряя способность пластически деформироваться, остаются твердыми. Линейная структура их при нагреве преобразуется в пространственную.

Физико-механические свойства полимеров зависят как от их структуры, температуры, так и от физического состояния.

Из-за высокой молекулярной массы полимеры не способны образовывать низковязкие жидкости или переходить в газообразное состояние, они могут находиться в одном из трех физических состояний – **стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем**.

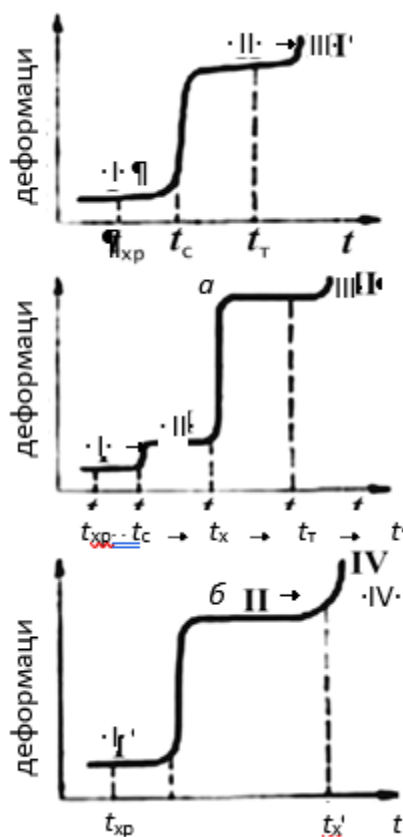
Полимеры в *стеклообразном состоянии* характеризуются пространственной структурой макромолекул, отличаются твердостью и аморфностью. Атомы находятся в равновесном положении, макромолекулы не перемещаются.

Высокоэластическое состояние макромолекул характерно для высокополимеров и выражается в их способности к большим обратимым изменениям формы при небольших нагрузках. Атомы колеблются, а макромолекулы способны изгибаться. Макромолекулы в целом не



перемещаются, но их отдельные сегменты подвижны за счет вращения групп атомов вокруг связи: в мономерных звеньях цепи.

Полимеры в *вязкотекучем состоянии* (линейные или разветвленные) отличаются от жидких веществ большей вязкостью. При этом подвижной является вся макромолекула. На рисунке 3 приведены зависимости степени деформации полимеров с различной структурой от температуры их нагрева (термомеханические кривые).



в

Рисунок 3 – Термомеханические кривые для полимеров:
a – аморфного; *б* – кристаллического; *в* – редкосетчатого для различных состояний; I – стеклообразного; II – высокоэластичного; III – вязкотекучего; IV – химического разложения

По данным кривым можно судить о характере изменения механических и технологических свойств полимеров при различных температурах. Так, полимеры или пластмассы на их основе эксплуатируются при температурах, ниже температуры стеклования t_c , когда они находятся в твердом состоянии. Формование изделий из полимеров или пластмасс ведут в области их вязкотекучего состояния. Температура t_{xp} (ниже t_c) соответствует переходу полимеров в хрупкое состояние (для полистирола $t_c = 100\text{ }^\circ\text{C}$ и $t_{xp} = 90\text{ }^\circ\text{C}$, для полиметилметакрилата $t_c = 100\text{ }^\circ\text{C}$ и $t_{xp} = 10\text{ }^\circ\text{C}$). В кристаллизующихся полимерах при температуре t_k их кристаллическая часть плавится и далее, от t_k до t_T , полимер находится в высокоэластичном состоянии. Свыше температур t_T аморфные кристаллизующиеся полимеры переходят в вязкотекучее состояние.

Для редкосетчатых полимеров температура t_x – начало химического разложения полимера.

Зависимость степени деформации кристаллических полимеров (полиэтилен, полиамиды, полиэтилентерефталат и др.) от напряжения выражается линией, состоящей из трех участков (рисунок 4). Первоначально (участок I) удлинение прямо пропорционально усилию. По достижении некоторого усилия (точка A) удлинение полимера увеличивается при неизменном усилии (участок II). Это

вызвано резким местным сужением образца, образованием «шейки», распространяющейся на всю его длину. Затем наблюдается растяжение тонкого, но ориентированного образца вплоть до разрыва (участок III). Деформация полимера зависит также от скорости и температуры нагружения.

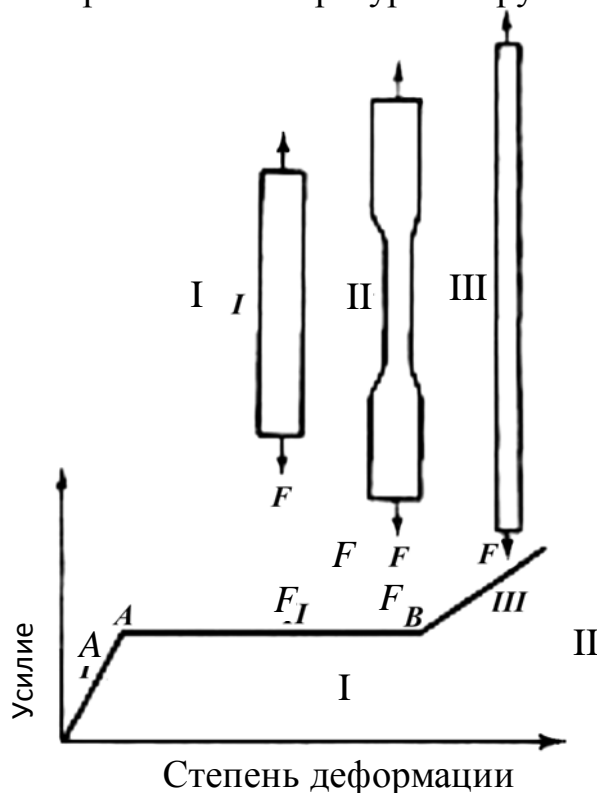


Рисунок 4 – Зависимость удлинения от усилия при деформации кристаллического полимера

На рисунке 5 приведены диаграммы растяжения термопластов – вязких аморфных и кристаллических, хрупких с ориентированными молекулами. Недостаток полимеров, а, следовательно, и пластмасс – склонность к старению, т. е. самопроизвольному необратимому изменению важнейших характеристик при эксплуатации и хранении.

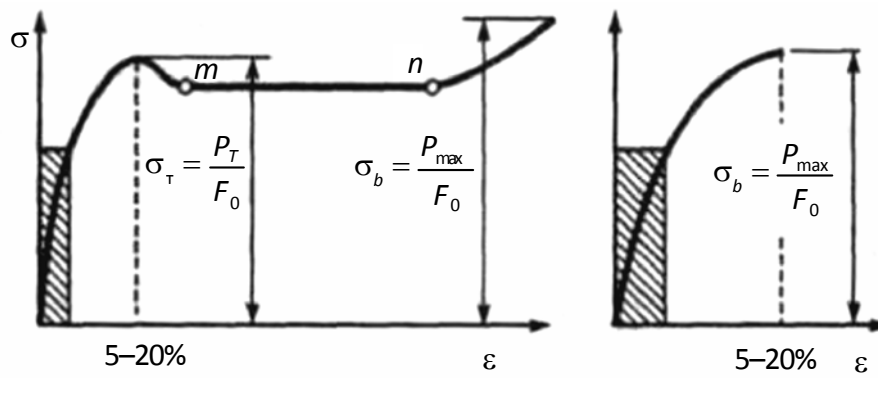


Рисунок 5 – Диаграммы растяжения пластмасс:
 а – вязкие аморфные и кристаллические термопласты;
 б – хрупкие термопласты, термопласты с молекулами, ориентированными вдоль направления растяжения, и реактопласты;
 заштрихованная область – допустимые нагрузки и удлинения

Важным компонентом пластмасс являются *наполнители*. Они повышают их механическую прочность, уменьшают усадку при формовании изделий, влияют на вязкость, водостойкость пластмасс, придают им специальные свойства (фрикционные, антифрикционные и др.). Наполнители могут быть *органическими* или *минеральными* в виде порошков, волокон, листов (сажа, древесная мука, сульфидная целлюлоза, асбест, тальк, очесы хлопка или льна, стекловолокно, бумага, ткани, древесный шпон и др.).

Органические наполнители повышают прочность, снижают хрупкость, но ухудшают термо- и водостойкость пластмасс.

Минеральные наполнители повышают прочность, водостойкость, химическую стойкость, тепло- и электроизоляционные свойства пластмасс, но часто повышают и их хрупкость, и плотность.

В зависимости от вида наполнителя различают:

- порошковые (карболиты);
- волокнистые (волокниты);
- слоистые (содержащие листовые наполнители) и некоторые другие пластмассы.

Пластификаторы способствуют повышению пластичности пластмасс или расширению температурного интервала их вязкотекучего состояния. В качестве пластификаторов широко используют органические вещества с высокой температурой кипения и низкой температурой замерзания (стеарин, дибутилфталат, олеиновую кислоту и др.). *Отвердители* (различные амины), или *катализаторы* (перекисные соединения) вводят в термореактивные пластмассы для ускорения процессов отверждения пластмасс.

Красители органического или минерального происхождения придают пластмассам желаемый цвет.

Стабилизаторы, например, сажа, препятствуют старению полимерных материалов.

Порообразователи, переходя при формовании в газообразное состояние, способствуют образованию пор в таких пластмассах, как пенополистирол, пенополивинилхлорид, поролон, пенополиуретан и др.

Смазывающие вещества вводят для уменьшения прилипаемости пластмассовых изделий к металлическим частям пресс-формы.

Кроме названных, в пластмассы вводятся с различными целями и другие добавки.

Краткая характеристика свойств и областей применения некоторых пластмасс

К термопластичным пластмассам, основой или связующим веществом в которых являются полимеры с макромолекулами линейной или разветвленной структуры, относятся:

- неполярные: полиолефины (полиэтилен, полипропилен и полиизобутилен), полистирол, фторопласт-4;
- полярные: полиметилметакрилат, поливинилхлорид, полиамиды и др.

Полиэтилен – кристаллизующийся полимер, который производят полимеризацией этилена ($\text{CH}_2 = \text{CH}_2$). Различают полиэтилен низкой плотности, получаемый при высоком давлении (ПЭВД) и содержащий 35–65 % кристаллической фазы, а также полиэтилен высокой плотности, получаемый при низком давлении (ПЭНД) и содержащий 60–95 % кристаллической фазы. Полиэтилен химически стоек, нерастворим в воде, ацетоне, спирте, морозостоек до $-70\text{ }^\circ\text{C}$ (чем выше плотность, тем выше теплостойкость и механическая прочность), но склонен к старению. Из него изготавливают несилловые детали (контейнеры, емкости, вентили, детали химических насосов, трубы для транспортирования агрессивных жидкостей), защитные покрытия на металлах, пленку для различных целей (электроизоляционная, парниковая).

Полипропилен ($-\text{CH}_2-\text{CHCH}_3-$) получают полимеризацией из пропилена в присутствии металлоорганических катализаторов. Он более теплостоек (до $150\text{ }^\circ\text{C}$), чем полиэтилен, но менее морозостоек (до $(-10) - (-20)\text{ }^\circ\text{C}$). Из полипропилена изготавливают некоторые конструкционные детали автомобилей, мотоциклов, корпуса насосов, трубы для транспортирования агрессивных сред, пленки, емкости.

Полистирол ($-\text{CH}_2-\text{CHC}_6\text{H}_5-$) – прозрачный, аморфный полимер, диэлектрик, химически стоек, нерастворим в растворителях, но склонен к старению и имеет низкую (до $80\text{ }^\circ\text{C}$) теплостойкость. Применяется он для изготовления деталей машин и приборов (ручки, корпуса и т. д.), емкостей и сосудов для химикатов, пленки и т. д.

Фторопласт-4, или *политетрафторэтилен* ($-\text{CF}_2-\text{CF}_2-$)_n, – полимер, имеющий макромолекулы в виде спиралей, диэлектрик, химически стоек. Из него изготавливают уплотнительные прокладки, трубы для транспортирования агрессивных сред, сильфоны, антикоррозионные покрытия на металлах. По химической стойкости он превосходит все известные пластмассы.

Полиметилметакрилат (органическое стекло, или плексиглас) – полярный, прозрачный, аморфный полимер на основе сложных эфиров акриловой и метакриловой кислот. В отличие от минерального стекла органическое значительно легче (более чем в два раза), пропускает ультрафиолетовые лучи, технологично (хорошо обрабатывается резанием, склеивается, сваривается, полируется), но обладает меньшей твердостью, прочностью и теплостойкостью. Идет на остекление и изготовление оптики, светотехнических деталей, емкостей. На основе полиметилметакрилата изготавливают самоотверждающиеся пластмассы типа стиракрила, которые применяют в производстве штампов, литейных моделей, абразивного инструмента.

Полиамиды (капрон, нейлон и др.) – полярные пластмассы на основе кристаллизующегося полимера, содержащего группы CO , NH и CH_2 . Они характеризуются высокой прочностью, теплостойкостью, износостойкостью и низким коэффициентом трения ($f < 0,05$), способностью погашать вибрации. Недостатки полиамидов: склонность к старению и некоторая гигроскопичность. Введение наполнителей (графит, тальк, дисульфид молибдена) обеспечивает повышение антифрикционных и некоторых других их свойств. Полиамиды применяют в машиностроении, электротехнике, медицине.

Поливинилхлорид – полярный, аморфный полимер состава ($-\text{CH}_2-\text{CHCl}-$). Непластифицированный поливинилхлорид называют винипластом и применяют для изготовления различных деталей химического оборудования, труб, деталей вентиляционных и теплообменных установок, муфт, элементов насосов, вентиляторов, защитных покрытий на металлах, облицовочной плитки. Пластикат (полихлорвинил– хлорид с пластификатором) используют для изготовления труб, конвейерных лент, печатных валиков, линолеума и т. д.

Наиболее крупнотоннажный по производству вид реактопластов – *фенопласты*, т. е. пластмассы, получаемые на основе фенолоформальдегидных смол.

Различают следующие виды фенопластов:

– ненаполненные, порошковые (наполнители – древесная мука, тальк, графит и др.);

– волокнистые (волокниты, асбо– и стекловолокниты);

– слоистые (гетинакс, текстолит и др.).

Волокниты получают пропиткой очесов льна или хлопка фенолоформальдегидным связующим и применяют для изготовления деталей, работающих на изгиб и кручение и устойчивых к ударным нагрузкам (шкивы, фланцы, стойки, направляющие втулки, маховики и т. д.).

Асбоволокниты получают пропиткой асбеста фенолоформальдегидной смолой. Они обладают высокими ударопрочностью, химической стойкостью, фрикционными свойствами и применяются для изготовления элементов тормозов (накладки, колодки, диски подъемно-транспортных устройств, автомобилей и т. д.), кислотоупорных конструкций.

Из слоистых пластмасс значительный интерес представляет *текстолит*, получаемый из связующего (фенолоформальдегидная смола) и наполнителя (хлопчатобумажные ткани – шифон, миткаль, бязь и др.). Текстолит отличается прочностью, способностью поглощать шумы и гасить вибрации, однако он может работать только при невысоких температурах (до 90°C). Из текстолита изготавливают зубчатые колеса, вкладыши подшипников, шкивы, втулки, прокладки в машиностроении, распределительные щиты и монтажные панели в электротехнике и т. д.

В таблице приведены основные физико-механические свойства некоторых названных пластмасс.

Механические свойства пластмасс определяют при проведении:

– лабораторных статических испытаний на растяжение (ГОСТ 11262-80) или сжатие, изгиб;

– динамических испытаний по определению ударной вязкости (ГОСТ 4647-80);

– путем измерения твердости (по Бринеллю ГОСТ 4670-77 с помощью твердомера ТММ-2 или по Роквеллу, Виккерсу, Шору).

Таблица 1– Некоторые физико-механические свойства пластмасс

Характеристика	Полиэтилен		Полипро- пилен	Полисти- рол	Фторо- пласт	Полиме- тилметак- рилат	Полиа- миды	Поли- винил- хлорид	Текстолит
	ПЭВД	ПЭНД							
Плотность, кг/м ³	918–930	949–955	500–910	1050–1080	2150–2350	1200	1100–1160	1400	1300–1400
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	10–17	22–30	25–40	37–45	14–35	65–70	50–100	40–60	65–100
Относительное удлинение при разрыве, %	500–600	300–800	200–800	1,5–3	250–350	2,5 – 4	50–150	10–50	1
Твердость по Бринеллю, НВ	1,4–2,5	4,5–5,8	6,0–6,5	14–15	3–4	20	–	10–16	–
Ударная вязкость, МДж/м ²	Не ломается	Не ломается	3,3–8	1–2,2	10	1,2 – 1,3	8–13	До 15	3,5
Рабочая температура, °С: – максимальная	105–108	120–125	150	80	250	60	60 – 110	65 – 80	125
– минимальная	(-40)–(-70) и ниже	-70 и ниже	-15	-20	-269	-60	(-20)–(-60)	-40	-50
Диэлектрическая проницаемость	2,2 –2,3	2,1–2,4	2,2	2,5–2,7	1,9–2,2	3*	3–4	3–5–4*	7*

* При частоте тока 50 Гц.

Контрольные вопросы

1. Положительные качества и области применения пластических масс.
2. Основные достоинства и недостатки пластмасс.
3. Основные компоненты пластмасс, их соотношение.
4. Связующие вещества – природные и синтетические полимеры.
5. Форма строения структур макромолекул полимеров.
6. Аморфные и кристаллические полимеры, аморфность и кристалличность реальных полимеров.
7. Фазовое состояние полимеров. Что такое степень кристалличности полимеров?
8. Какие полимеры имеют более высокие теплостойкость и механические свойства?
9. Термопластичные полимеры и пластмассы.
10. Термореактивные полимеры и пластмассы.
11. От каких факторов зависят физико-механические свойства полимеров?
12. Стеклообразное состояние полимеров и свойства.
13. Высокоэластическое состояние полимеров и свойства.
14. Полимеры в вязкотекучем состоянии и их свойства.
15. Термомеханические кривые для полимеров.
16. Зависимость степени деформации кристаллических полимеров от напряжения.
17. Главный недостаток полимеров – склонность к старению.
18. Важный компонент пластмасс – наполнители, виды наполнителей.
19. Диаграммы растяжения пластмасс.
20. Краткая характеристика свойств и областей применения некоторых пластмасс.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1.. Материаловедение в машиностроении / А. М. Адаскин, В. Н. Климов, А. К. Онегина, Ю. Е. Седов. – Санкт-Петербург: Юрайте, 2012. – 535 с.
2. Арзамасов, В. Б. Материаловедение: учебник / В. Б. Арзамасов, А. А. Черепашин. – Москва: Экзамен, 2009. – 352 с.
3. Солнцев, Ю. П. Материаловедение / Ю. П. Солнцев, Е. Н. Пряхин. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2004. – 736 с.
4. Бондаренко, Г. Г. Материаловедение / Г. Г. Бондаренко, Т. А. Кабанова, В. В. Рыбалко. – Москва: Юрайте, 2013. – 359 с.
5. Волков, Г. М. Материаловедение / Г. М. Волков, В. М. Зуев. – Москва: Академия, 2008. – 398 с.
6. Власов, С. В. Основы технологии переработки пластмасс: учебник для вузов / С. В. Власов, В. Н. Кузнецова. – Москва: Изд-во Мир, 2006. – 600 с.
7. Гуляев, А. П. Металловедение: учебник для вузов / А. П. Гуляев. – Москва: Металлургия, 1986. – 544 с.
8. Каллистер, У. Д. (мл.) Материаловедение: от технологии к применению (металлы, керамика, полимеры): справочное издание / У. Д. Каллистер (мл.), Д. Дж. Ретвич. – Санкт-Петербург: Изд-во Научные основы и технологии, 2011. – 895 с.
9. Конструкционные материалы: справочник / Под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. – Москва: Машиностроение, 1990. – 688 с.
10. Лахтин, Ю. М. Материаловедение: учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – Москва: Машиностроение, 1992. – 528 с.
11. Материаловедение: учебник для вузов / Под общ. ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 648 с.
12. Материаловедение и термическая обработка стали: справочное издание / под ред. М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахштадта. – Москва: Металлургия, 1995.
13. Мозберг, Р. К. Материаловедение: учеб. пособие. / Р. К. Мозберг – Москва: Высшая школа, 1991. – 448 с.
14. Плошкин, В. В. Материаловедение / В. В. Плошкин. – Москва: Юрайте, 2013. – 463 с.
15. Солнцев, Ю. П. Материаловедение: учебник для вузов. / Ю. П. Солнцев., Е. И. Пряхин. – Санкт-Петербург: ХИМИЗДАТ, 2007. – 784 с.
16. Оборудование пищевых производств. Материаловедение / Ю. П. Солнцев, В. Л. Жавнер, С. А. Вологжанина, Р. В. Горлач. – Санкт-Петербург: Профессия, 2003. – 526 с.
17. Справочник по конструкционным материалам / под ред. Б. Н. Арзамасова [и др.]. – Москва: МГУТУ им Баумана НЭ, 2006. – 637 с.
18. Материаловедение и технология металлов / Г. П. Фетисов, М. Г. Карпман, В. М. Матюнин [и др.]. – Москва: Высшая школа, 2000. – 628 с.

19. Энциклопедический справочник термиста-технолога: в 3-х томах / С. Б. Масленков, А. И. Ляпунов, В. М. Зинченко [и др.], под ред. С. Б. Масленкова. – Москва: Наука и технологии, 2004. – Т. 2.– 608 с.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

1. Стали	
Легированные строительные	ГОСТ 27772-88
Легированные судостроительные	-ГОСТ 5521-93
Легированные цементуемые	-ГОСТ 4543-90
Легированные улучшаемые	-ГОСТ 1050-88 -ГОСТ 4543-97
Легированная конструкционная, качественная рессорно-пружинная	-ГОСТ 14959-79
Подшипниковая	-ГОСТ 801-89
Легированная инструментальная	-ГОСТ 5950-2000
Быстрорежущие стали	-ГОСТ 19265-73
Жаростойкие и жаропрочные	-ГОСТ 5520-79, ГОСТ 20072-93, ГОСТ 5632-99
Коррозионно-стойкие	-ГОСТ 5632-99
Магнитотвердые сплавы (для постоянных магнитов)	-ГОСТ 6862-71
Электротехнические стали	-ГОСТ 21427.0-75 -ГОСТ 21427.3-75
Поковки из конструкционной углеродистой и легированной стали	-ГОСТ 8479-89
Отливки из хладостойкой и износостойкой стали	-ГОСТ 21357-87
2. Медь и ее сплавы	
Медь	-ГОСТ 859-2001
Латунь двойная и многокомпонентная деформируемая	-ГОСТ 15527-98
Латунь литейная	-ГОСТ 17711-93
Бронза оловянистая деформируемая	-ГОСТ 5017-74
Бронза безоловянистая деформируемая	-ГОСТ 18175-94
Бронза оловянистая литейная	-ГОСТ 613-79
Бронза безоловянистая литейная	-ГОСТ 493-79
Медно-никелевые сплавы	-ГОСТ 492-73
3. Алюминий и его сплавы	
Алюминий	-ГОСТ 4784-97
Деформируемые сплавы, термически неупрочняемые	-ГОСТ 4784-97
Деформируемые, термически упрочняемые	-ГОСТ 4784-97
Литейные сплавы	-ГОСТ 1583-93
4. Антифрикционные сплавы	
Алюминиевые	-ГОСТ 14113-78
Цинковые	-ГОСТ 21437-75
Баббиты на основе свинца, олова	-ГОСТ 1320-74
Кальциевые баббиты	-ГОСТ 1209-78
5. Титан и его сплавы	
Титановая губка	-ГОСТ 17746-79
Титановые сплавы, обрабатываемые давлением	-ГОСТ 19807-91
6. Магний и его сплавы	
Магний	-ГОСТ 804-72
Деформируемые	-ГОСТ 14957-76
Литейные	-ГОСТ 2856-79

Локальный электронный методический материал

Тамара Петровна Колина

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА
В МАШИНОСТРОЕНИИ

Редактор С. Кондрашова
Корректор Т. Звада

Уч.-изд. л. 13,3. Печ. л. 10,4.

Издательство федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Калининградский государственный технический университет».
236022, Калининград, Советский проспект, 1