

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра «Вакуумная и компрессорная техника»**

ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

для специальности

**6-05-0714-06 «Оборудование и технологии вакуумной, компрессорной и
низкотемпературной техники»,
профилизации «Вакуумная и компрессорная техника»**

Составитель: Корнеев С.В.

**Минск БНТУ
2025**

СОДЕРЖАНИЕ

с.

ВВЕДЕНИЕ	3
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	4
Глоссарий	4
Раздел I. ОСНОВНЫЕ ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ В МАТЕРИА- ЛОВЕДАНИИ	7
Тема 1.1. Предмет материаловедения. Типы связей в кристаллических решетках. Кри- сталлы и их несовершенства	7
Тема 1.2. Методы изучения строения материалов	17
Тема 1.3. Механические свойства материалов и методы их изучения	27
Тема 1.4. Кристаллизация. Поликристаллы, монокристаллы, аморфные материалы и наноматериалы	48
Тема 1.5. Диаграммы состояния: построение, фазы, виды диаграмм 1, 2, 3, 4 рода	57
Тема 1.6. Диаграмма состояния железо-углерод	66
Раздел II. СТРУКТУРА, СВОЙСТВА И НАЗНАЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ	76
Тема 2.1. Углеродистые стали	76
Тема 2.2. Чугуны	86
Тема 2.3. Классификация легированных сталей. Конструкционные стали	97
Тема 2.4. Инструментальные стали и сплавы	101
Тема 2.5. Жаростойкие, жаропрочные, нержавеющие, износостойкие стали и сплавы ...	105
Тема 2.6. Цветные металлы и сплавы	107
Тема 2.7. Неметаллические материалы: полимеры, пластмассы, стекла, керамики	116
Раздел III. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УПРОЧНЕНИИ И РАЗУПРОЧНЕНИИ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ	120
Тема 3.1. Теория и технология термической обработки сталей	120
Тема 3.2. Химико-термическая и термомеханическая обработка сталей и сплавов	135
ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	144
РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ	150
ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ	168

ВВЕДЕНИЕ

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) разработан в соответствии с учебной программой дисциплины «Материаловедение» для специальности 6-05-0714-06 «Оборудование и технологии вакуумной, компрессорной и низкотемпературной техники», профилизации «Вакуумная и компрессорная техника», представляет собой комплекс систематизированных учебных и методических материалов и предназначен для методического и информационного обеспечения учебной дисциплины. Данная дисциплина изучается студентами первого курса и дает общие представления о материалах, применяемых в промышленности, их структуре, свойствах, методах испытаний.

Цель создания ЭУМК – обеспечить качественное учебно-методическое оснащение учебного процесса, способствующее подготовке высококвалифицированных специалистов, обладающих знаниями об области применения материалов, методах изучения материалов, способах изготовления изделий из различных материалов, методах упрочнения и разупрочнения. Структура и содержание учебных материалов электронного УМК способствует системному освоению учебного материала и вовлечению обучающихся практически во все этапы учебного процесса: от разработки и принятия целей обучения до рефлексии и оценки (самооценки) образовательных результатов через самостоятельную учебную и исследовательскую работу.

Состав пособия

Разработанный ЭУМК включает в себя теоретический и практический разделы, раздел контроля знаний и вспомогательный раздел.

Материалы теоретического раздела ЭУМК представлены электронным пособием. Теоретический раздел ЭУМК снабжен значительным количеством иллюстративного материала. В основном материал построен в традициях классических учебных пособий по материаловедению с учетом специфики специальности. В некоторых случаях дается более упрощенное представление об объектах дисциплины для более легкого восприятия материала студентами первого курса.

Практический раздел ЭУМК содержит учебные материалы и методические указания для выполнения лабораторных работ. Индивидуальные задания позволяют организовать продуктивную самостоятельную работу студентов.

Раздел контроля знаний ЭУМК включает перечень вопросов для изучения учебного материала дисциплины и примеры тестов.

Вспомогательный раздел содержит учебную программу дисциплины «Материаловедение», включающую перечень литературных источников, рекомендуемых для изучения данной учебной дисциплины.

Знакомство с ЭУМК

Несомненным достоинством данного ЭУМК является то, что его использование не требует дополнительных усилий обучаемого по освоению интерфейса. После запуска ЭУМК он отображается на экране в формате .pdf, хорошо знакомом каждому пользователю компьютера.

В левой части обычно находится окно навигации. В правом окне отображается содержание разделов ЭУМК. Используя окно навигации или содержание, можно легко увидеть структуру ЭУМК и перемещаться по его разделам. При щелчке мыши по любому из элементов в окне навигации отображается соответствующий элемент содержания ЭУМК. Гиперссылки традиционно выделены цветом.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Глоссарий

Азотирование (nitriding) – ХТО с насыщением поверхностного слоя стали, чугуна и сплавов металлов азотом при температуре 500 – 1200 °С.

Аллотропия или полиморфизм – способность некоторых металлов существовать в двух или нескольких кристаллических формах.

Алитирование (aluminizing) – ХТО с диффузионным насыщением поверхности металлов и сплавов алюминием.

Аморфное состояние – состояние твёрдого тела, в котором отсутствует дальний порядок, характерный для кристалла (т.е. не кристаллическое состояние).

Анизотропия – различие свойств металлов и сплавов в разных кристаллографических направлениях.

Антифрикционные материалы – группа материалов, обладающих низким коэффициентом трения, или материалы, способные уменьшить коэффициент трения других материалов.

Аустенит (austenite) – фаза, структурная составляющая железоуглеродистых сплавов – твердый раствор углерода в γ -железе.

Аустенит остаточный – неустойчивый аустенит, существующий в качестве структурной составляющей в мартенситной или бейнитной структуре стали.

Волочение – процесс пластической деформации металла, заключающийся в протягивании заготовки через отверстие волокна, размеры которого меньше размеров поперечного сечения заготовки.

Воронение – создание на поверхности стальных или чугунных изделий темно-синей или черной оксидной пленки с целью получения декоративного или защитного слоя.

Гомогенизационный отжиг – отжиг при высокой температуре и длительной выдержке с целью уменьшения химической неоднородности, обусловленной ликвацией.

Гомогенные сплавы – сплавы, структура которых состоит из одной фазы (например, твердого раствора).

Дендрит – кристалл древовидной формы, возникающий при кристаллизации в результате различий в скоростях роста зародыша в разных кристаллографических направлениях.

Дрессировка – холодная прокатка с малыми обжатиями, обеспечивающая упрочнение поверхностного слоя металла без деформации внутренних слоев.

Жаропрочность – способность материала выдерживать механические нагрузки при высоких температурах без значительной деформации (оценивается сопротивлением ползучести) и без разрушения (оценивается длительной прочностью).

Жаростойкость – способность материала сопротивляться окислению при высоких температурах.

Закалка – термическая обработка с нагревом до температур, превышающих температуру фазовых превращений, с выдержкой и с последующим охлаждением металла или сплава со скоростью, превышающей критическую; обеспечивает получение неравновесной структуры;

Интерметаллид – химическое соединение двух или более металлов между собой;

Конода – связующая прямая, соединяющая сопряженные точки, изображающие составы равновесных фаз или линия, соединяющая составы фаз, находящихся в равновесии или линия на диаграмме состояния между двумя нодами, соответствующая постоянным внешним условиям (температура, давление) сосуществования фаз и позволяющая определить состав каждой из фаз и их количественное соотношение в данном сплаве.

Ледебурит (ledeburite) – структурная составляющая железоуглеродистых сплавов (главным образом чугунов) – эвтектическая смесь аустенита и цементита, образующаяся из расплава при температуре ниже 1147°С.

Ликвация – неоднородность сплава по химическому составу, структуре и неметаллическим включениям, образующаяся при кристаллизации слитка.

Ликвидус (liquidus) – геометрическое место точек температур начала кристаллизации всех сплавов системы.

Макроструктура – строение металлов и сплавов, видимое невооруженным глазом или с помощью лупы на шлифованных и/или протравленных образцах.

Мартенсит в стали (martensite) – пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе, образующийся при закалке из аустенита.

Метастабильная фаза – промежуточная, относительно устойчивая фаза, которая может перейти в более устойчивую под действием внешнего воздействия или самопроизвольно.

Микроструктура – строение металлов и сплавов, выявляемое с помощью микроскопа на шлифованных и (или) протравленных образцах (в оптическом и растровом электронных микроскопах) или на фольге (в просвечивающем электронном микроскопе).

Наклеп – изменение структуры и свойств металлов и сплавов в результате пластической деформации при частичном или полном подавлении рекристаллизации; сопровождается повышением твердости и прочности понижением пластичности и ударной вязкости. Упрочнение металлов и сплавов пластическим деформированием.

Нормализация – термическая обработка стали или чугуна, заключающаяся в нагреве выше критических точек (с получением преимущественно структуры аустенита), выдержке и охлаждении на воздухе.

Нитроцементация – ХТО с одновременным насыщением стали углеродом и азотом в газовой среде при температуре 850–870 °С.

Отжиг – термическая обработка с нагревом до температур, превышающих температуру фазовых или структурных превращений, с выдержкой и последующим медленным охлаждением; при этом обеспечивается получение равновесной структуры. Отжиг – вид термической обработки, при которой формируются близкие к равновесным структуры материалов, в которых неравновесные состояния возникли в результате всех предшествующих видов воздействия (литьё,ковка, прокатка, сварка и т.п.).

Отпуск – термическая обработка стали с нагревом ниже температуры полиморфного превращения, с выдержкой и охлаждением; обеспечивает получение более равновесной структуры и оптимальное сочетание служебных свойств.

Пережог – необратимый дефект металла или сплава, заключающийся в окислении или оплавлении границ зерен в результате значительного превышения заданной температуры нагрева.

Перитектическое превращение (перитектическая реакция) – процесс взаимодействия кристаллов твердого раствора с жидкостью, происходящий при постоянной температуре и постоянной концентрации фаз, приводящий к образованию кристаллов другого твердого раствора.

Перлит (pearlite) – структурная составляющая железоуглеродистых сплавов – эвтектоидная смесь феррита и цементита, имеющая межпластиночное расстояние более 0,3 мкм.

Полиморфизм – способность металлов образовывать различные кристаллические структуры одинакового состава.

Рекристаллизация – процесс зарождения новых зерен в объеме деформированного материала и их последующий рост.

Солидус – геометрическое место точек температур конца кристаллизации всех сплавов системы.

Сольвус – линия ограниченной растворимости в твердом состоянии на диаграмме состояния.

Сталь – сплав железа с углеродом, содержащий от 0,02 до 2,14 % углерода, а также ряд других элементов.

Старение – процесс распада пересыщенных закаленных твердых растворов, в которых при закалке полиморфных превращений не происходило. Как правило, этот процесс осу-

ществляется при нагреве материала. Старением называют фазовый распад сплавов, в которых содержание элементов превышает равновесное для данной температуры.

Темплет – плоский образец, вырезанный из металлического изделия или заготовки и предназначенный для выявления и изучения на нём макроструктуры изделия.

Термомеханическая обработка (ТМО) – совокупность операций пластического деформирования и термической обработки, в результате которых формируется повышенная плотность дефектов кристаллического строения металла или сплава, что приводит к повышению прочности.

Термообработка (ТО) – совокупность операций теплового воздействия на материал с целью изменения его структуры и свойств в нужном направлении.

Усталость – процесс постепенного изменения сплошности, структуры и свойств материала под воздействием циклически изменяющихся напряжений и деформаций, приводящий к его разрушению.

Феррит (ferrite) – структурная составляющая железоуглеродистых сплавов – твердый раствор углерода (до 0,02 % С) в α -железе.

Цементит (cementite) – структурная составляющая железоуглеродистых сплавов – карбид железа, Fe_3C , содержащий 6,67 %С.

Чугун – сплав железа с углеродом, содержащий более 2,14 % углерода, постоянные примеси, а иногда и легирующие элементы.

Флокены – внутренние трещины (дефекты) в стальных поковках и прокатной продукции (иногда в слитках или отливках), резко снижающие механические свойства стали.

Фрикционные материалы – конструкционные материалы трения, используемые в узлах, передающих или рассеивающих кинетическую энергию (тормоза, фрикционные муфты, сцепления, демпферы и др.).

Шлиф – полированная поверхность сечения металла или минерала, подготовленная для визуального или микроскопического исследования.

Эвтектика – механическая смесь двух или более фаз, образующаяся из расплава при эвтектической температуре.

Эвтектоид – механическая смесь фаз, образующаяся из твердого раствора в результате его распада при эвтектоидной температуре.

Раздел I. ОСНОВНЫЕ ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

Тема 1.1. Предмет материаловедения. Типы связей в кристаллических решетках. Кристаллы и их несовершенства

Материаловедение – это наука, изучающая взаимосвязь между структурой (строением) и свойствами материала, а также их изменения при внешних воздействиях (тепловом, механическом, химическом и т. д.), разрабатывающая методы и способы изменения структуры при получении необходимого комплекса свойств, обеспечивающих повышенную долговечность работы изделия.

Основные направления современного материаловедения:

- выбор материала для конкретных изделий, работающих в определенных условиях;
- получение необходимой структуры и свойств заготовок и деталей путем термообработки, пластической деформации и др. способов;
- изучение причин деградации свойств материалов в процессе эксплуатации;
- повышение прочности надежности и долговечности изделий;
- создание новых материалов с заданными механическими, физическими или химическими свойствами.

Качество материала - совокупность его свойств, обуславливающих пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с его назначением. Материаловедение дает возможность научного обеспечения качества веществ и материалов.

Взаимосвязь структуры и свойств материалов.

Материалы для изделий выбирают исходя из комплекса их свойств. Свойства зависят от структуры материала. Структура материала в свою очередь определяется составом материала и технологией его первичного получения или технологией его дополнительного упрочнения или разупрочнения.

Взаимосвязь основных понятий представлена на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Взаимосвязь основных понятий

Материал, одного химического состава может иметь различные свойства в зависимости от его структуры.

Влияние структуры Al_2O_3 на оптические свойства материала показано на рисунке 1.2.

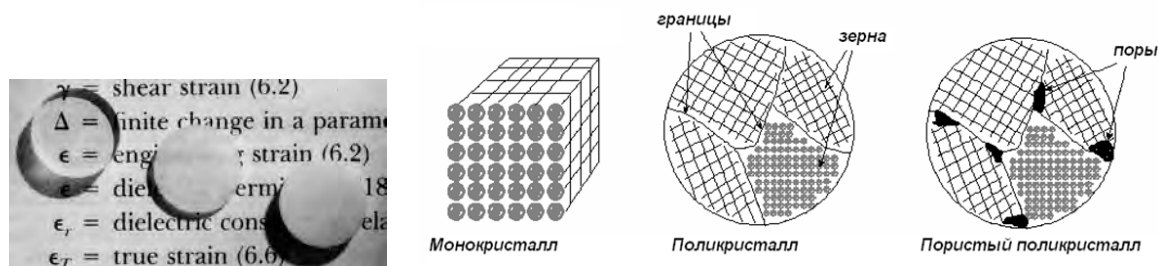


Рисунок 1.2 – Влияние структуры Al_2O_3 на оптические свойства материала

Изменение оптических свойств оксида алюминия в зависимости от его внутренней структуры:

- Монокристалл Al_2O_3 прозрачен.
- Плотный поликристалл Al_2O_3 полупрозрачен.
- Пористый поликристалл Al_2O_3 совершенно непрозрачен.

Металлы в твердом состоянии как правило представляют собой объекты, состоящие из огромного количества мелких, различимых только в микроскоп зерен – кристаллитов (рис. 1.3). В свою очередь, эти зерна состоят из атомов, упорядоченно расположенных друг относительно друга в пространстве.

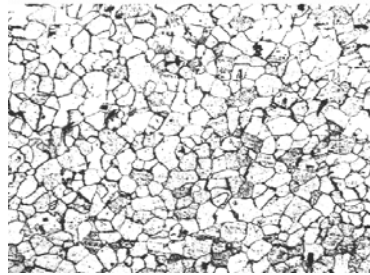


Рисунок 1.3 – Вид в микроскоп поликристаллической структуры материала на примере железа

Изменить структуру, а, следовательно, и свойства материала можно термической, химико-термической или деформационной обработкой. Термическая обработка применяется как для упрочнения (закалка), так и для разупрочнения (отжиг) материала и заключается в специальном режиме нагрева и охлаждения. При химико-термической обработке как правило насыщают поверхностный слой материала определенными химическими элементами при повышенных температурах для изменения его структуры с целью повышения прочности и износостойкости поверхности.

Упрочнить материал можно изменив его структуру деформационной обработкой. В ряде случаев, например, при получении проволоки волочением между переходами по уменьшению диаметра необходим обратный процесс – разупрочняющий отжиг с целью повышения пластических свойств, так как проволока упрочняется, приобретая наклеп и, следовательно, более интенсивно изнашивает инструмент и хуже деформируется.

Классификация материалов

По отношению к производственным процессам материалы можно разделить на основные и вспомогательные. По степени переработки: сырье (сырые материалы), материалы полуфабрикатов, материалы фабрикатов.

Материалы можно разделить на материалы природного и искусственного происхождения, по агрегатному состоянию и т.д.

Классификация материалов, используемых в машиностроении, также может быть самой разнообразной, в зависимости от выбора классифицирующего признака. Если, например, классифицировать материалы *по назначению*, то машиностроительные материалы можно разделить, например, на **конструкционные и инструментальные**. В свою очередь, конструкционные материалы по назначению можно разделить на чисто **конструкционные, износостойкие, для упругих элементов (пружинные), устойчивые к воздействию среды или температуры и т.д.**

Общая классификация материалов машиностроения представлена на рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 – Классификация материалов

Конструкционные материалы – материалы, из которых изготавливают различные конструкции, детали машин, элементы сооружений, воспринимающих силовую нагрузку. Определяющим принципом выбора таких материалов являются их механические свойства или комплекс свойств, например, для коррозионностойких, жаростойких или жаропрочных конструкционных материалов.

Инструментальные материалы – материалы, из которых изготавливают различные режущие, штамповочные и измерительные инструменты. Определяющим принципом выбора таких материалов являются их механические свойства, и, в частности, высокая твердость и, следовательно, высокая износостойкость. Для современных режущих инструментов характерна высокая производительность обработки и значительное выделение теплоты в процессе резания, поэтому такие материалы должны обладать высокой теплостойкостью.

Функциональные материалы (материалы с особыми физико-химическими свойствами) – материалы, из которых изготавливают различные изделия специального назначения. Определяющим принципом выбора является особое свойство или свойства материала (проводники, полупроводники и диэлектрики, магнитные материалы, теплопроводящие, теплоизоляционные и огнеупорные материалы, антифрикционные и фрикционные материалы, смазочные материалы, абразивные материалы, коррозионностойкие материалы и т.д.).

Материалы можно классифицировать по **количеству фаз и масштабу неоднородностей структуры**.

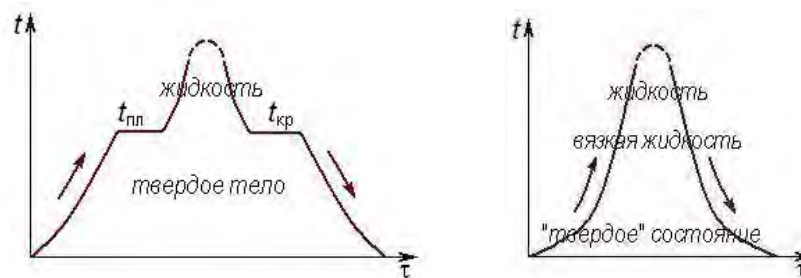
Простые материалы образованы одним веществом.

Сплавы – материалы с однородной макроструктурой, полученные в результате затвердевания расплавов или спекания порошков. Сплавы могут быть однофазными, например, сплав золота и меди или многофазными, например, сплав олова и свинца.

Композиты – многофазные материалы, имеющие неоднородную структуру. Композиционные материалы достаточно разнообразны и по строению могут быть волокнистыми, слоистыми и дисперсно-упрочненными. По аналогии с железобетоном в котором в бетонном блоке имеется арматура в различных композиционных материалах присутствует матрица и армирующий наполнитель. При армировании полимеров стеклянными волокнами получают стеклопластики, а углеродными волокнами углепластики (часто можно услышать характерное название карбон). Наиболее прочные композиты получают при армировании кевларовым волокном или тканью, что широко используется как бронезащита. Армируя керамику дисперсными металлическими частицами, получают металлокерамику, называемую керметами.

Материалы также можно классифицировать по **степени кристалличности** (т.е. какую часть от всего объема материала составляет кристаллическая структура). **Материалы, у которых отсутствует кристаллическое строение называются аморфными** или стеклообразными по наиболее типичному представителю таких материалов стеклу. Характерной особен-

ностью аморфных материалов является отсутствие площадок на кривых нагрева и охлаждения соответствующих плавлению и кристаллизации, т.е. переход из твердого состояние в жидкое происходит с постепенным уменьшением вязкости материала, а не скачкообразно (рис. 1.5).



а) кристаллического вещества

б) аморфного вещества (стекла)

Рисунок 1.5 – Плавление и затвердевание кристаллических и аморфных материалов

Несмотря на то, что металлы при обычных технологиях получения имеют поликристаллическое состояние при определенных условиях (очень высокие скорости охлаждения) можно получать аморфные металлы.

Сами металлы по их свойствам также можно разделить на несколько групп.

1. Черные: Fe, Mn и цветные: Cu, Al, Sn и др.
2. Легкие: Mg, Be, Al, Ti и др. и тяжелые: Pb, Pt, W, Os и др. (плотность превышает 5 г/см³)
3. Легкоплавкие (температура плавления до 600 °C): Hg, Sn, Pb, Zn, со средней температурой плавления и тугоплавкие ($T_{пл} \geq 1541$ °C, Fe): Mo, W, Ta.
4. Благородные (слабо реагируют с внешней средой): Ag, Au, Pt, Pd, Os.

Кристаллическое строение

В кристаллических веществах частицы, из которых построены кристаллы, размещены в пространстве в определенном порядке и образуют пространственную решетку. В зависимости от характера частиц, находящихся в узлах пространственной решетки, различают молекулярные, атомные, ионные и металлические решетки (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Кристаллические решетки твердых веществ

Характеристики	Тип кристаллической решетки			
	Атомная	Ионная	Металлическая	Молекулярная
Частицы, находящиеся в узлах решетки	Атомы	Ионы	Атомы и положительно заряженные ионы металлов	Молекулы
Прочность связи	Очень прочная	Прочная	Разной прочностью	Не прочная
Характер связи между частицами кристалла	Ковалентные связи	Электростатические связи	Металлическая связь между ионами и свободными электронами	Силы межмолекулярного взаимодействия (в т.ч. водородные связи)
Отличительные физические свойства	Очень тугоплавкие, очень твердые	Тугоплавкие, твердые, многие растворимы	Разнообразны по свойствам, имеют металлические	Легкоплавкие, небольшой твердости, многие

веществ	дые, практически нерастворимые в воде	мы в воде. Растворы и расплавы проводят электрический ток (проводники II рода)	ческий блеск, являются электрическими проводниками (проводники I рода), высокая теплопроводность	гие растворимы в воде
Примеры веществ	Алмаз (C), Кремний (Si)	NaCl, KOH, Ba(NO ₃) ₂	Cu, Zn, Li	Лед H ₂ O, Сухой лед (CO ₂)

Атомы занимают свое место в узлах кристаллической решетки в соответствии с минимумом энергии связи, силы притяжения и отталкивания при этом уравновешены (рис. 1.6).

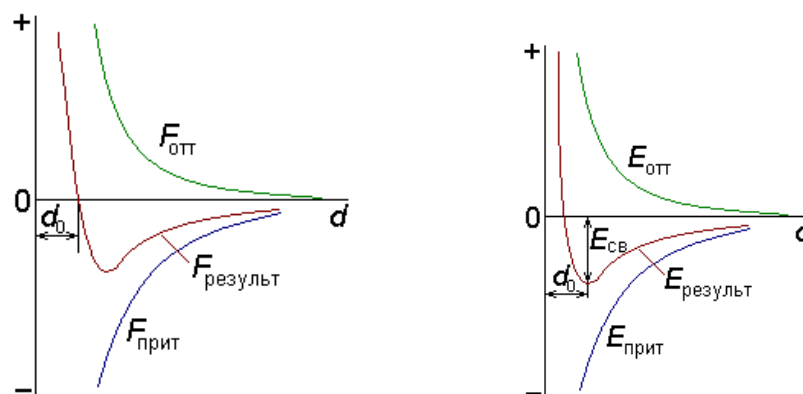
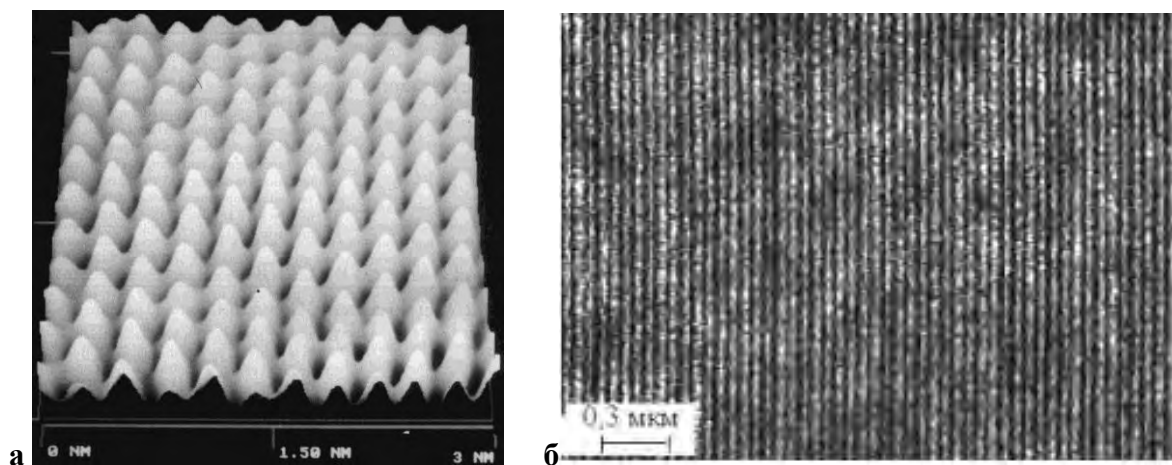


Рисунок 1.6 – Силы взаимодействия и энергия связи между атомами

Силы притяжения и отталкивания уравновешены при расстоянии между атомами d_0 . Энергия связи при расстоянии между атомами d_0 минимальна.

Расстояние между однородными атомами (ионами) называют периодом или постоянной кристаллической решётки. Расстояние между атомами крайне мало. Периоды кристаллической решётки простых веществ составляют несколько десятых долей нанометров. Визуализировать изображения атомов можно только с использованием методов электронной микроскопии (рис. 1.7).



а – атомная плоскость (111) золота (изображение получено в сканирующем туннельном микроскопе); б – кристаллическая решетка золота (расстояние между плоскостями 2,04 Å);

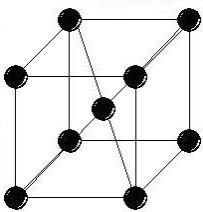
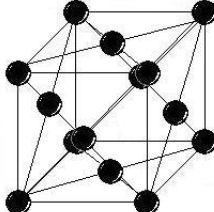
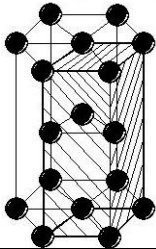
Рисунок 1.7 – Расположение атомов в золоте

Кристаллическая решетка разрушается при плавлении, испарении или растворении вещества.

За редким исключением, металлы в твердом состоянии представляют собой тела, состоящие из огромного количества мелких, различимых только в микроскоп зерен – кристаллитов. В свою очередь, эти зерна состоят из атомов, упорядоченно расположенных друг относительно друга в пространстве.

Располагаясь в пространстве ближайшие друг к другу атомы образуют контур какого-нибудь геометрического тела, например, куба (табл. 1.2). Таким образом, каждое зерно металла состоит из множества таких одинаково ориентированных геометрических тел, называемых элементарными ячейками.

Таблица 1.2 – Типы элементарных ячеек кристаллических решеток

Тип решетки	Объемно-центрированная кубическая решетка (ОЦК)	Гранецентрированная кубическая решетка (ГЦК)	Гексагональная плотноупакованная решетка (ГПУ)
Параметры	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = 90^\circ,$ $\gamma = 120^\circ$
Вид элементарной ячейки			
Металлы с таким типом решетки	K, Na, Li, Cr, Mo, W, V, Ta, Nb, Fe $_{\alpha}$, Ti $_{\beta}$	Ce, Cu, Ni, Ag, Au, Pb, Pt, Al, Fe $_{\gamma}$	Mg, Co, Zn, Cd, Os, Be, Zr $_{\alpha}$, Ti $_{\alpha}$

Плотность расположения атомов по различным плоскостям неодинакова. Вследствие этого в различных плоскостях и направлениях решётки многие свойства (химические, физические, механические) каждого кристалла зависят от направления решётки. Различие свойств монокристалла в разных кристаллографических направлениях называется анизотропией. Все кристаллы анизотропны. В отличие от кристаллов, аморфные тела (стекло) в различных направлениях имеют в основном одинаковую плотность упаковки атомов и поэтому одинаковые свойства в различных направлениях. Аморфные тела изотропны.

Технические металлы квазиизотропны. Они состоят из большого количества мелких анизотропных кристаллов и являются поликристаллами. Кристаллы неупорядоченно ориентированы один по отношению к другому и поэтому свойства во всех направлениях получаются усреднёнными (одинаковыми). Эта кажущаяся независимость свойств от направления называется квазиизотропией (мнимая изотропность).

Такая мнимая изотропность металла не будет наблюдаться, если все кристаллиты имеют одинаковую ориентировку в каком-то направлении. Эта ориентированность или текстура создаётся в результате значительной холодной деформации, например, прокатки. Тогда поликристаллический металл приобретает анизотропию свойств (вдоль и поперёк прокатки).

Дефекты кристаллического строения

Классификация дефектов кристаллического строения представлена на рис. 1.8.



Рисунок 1.8 – Классификация дефектов кристаллического строения

Точечные дефекты

Одним из распространенных несовершенств кристаллического строения является наличие точечных дефектов: вакансий, дислоцированных атомов и примесей (рис. 1.9.)

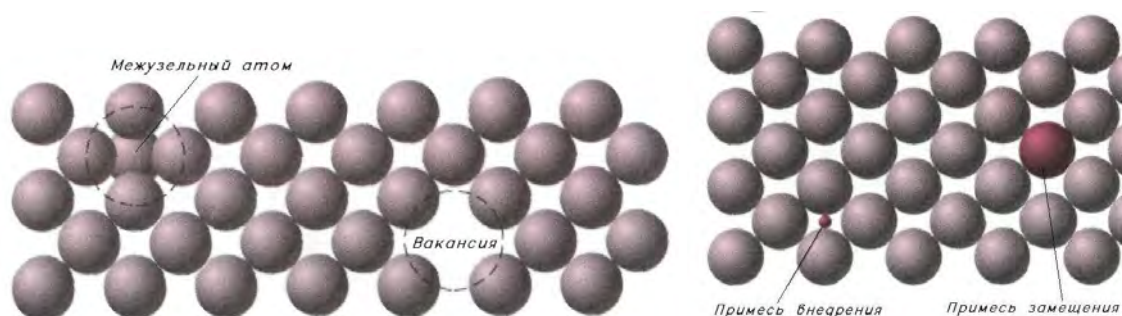


Рисунок 1.9 – Точечные дефекты

Вакансии – отсутствие атомов в узлах кристаллической решетки.

Дислоцированный атом – это атом, вышедший из узла решётки и занявший место в междоузлии. Концентрация дислоцированных атомов значительно меньше, чем вакансий, так как для их образования требуются существенные затраты энергии. При этом на месте переместившегося атома образуется вакансия.

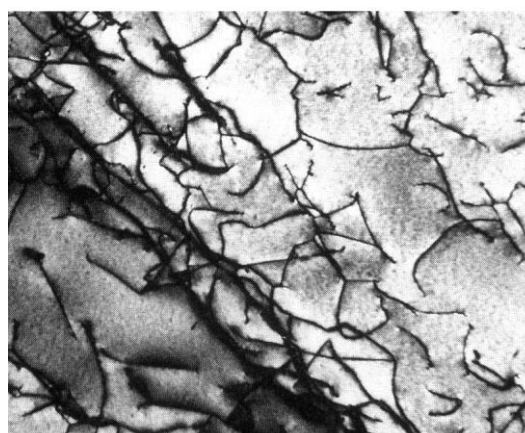
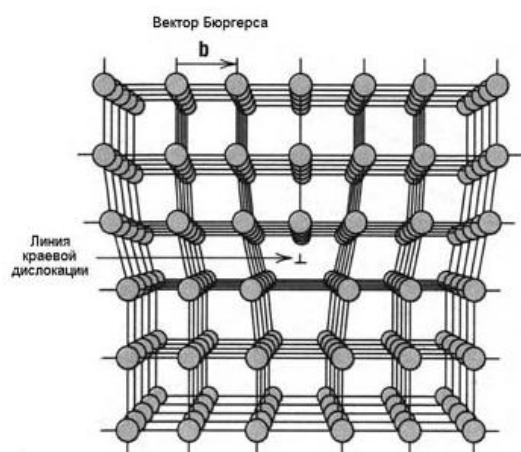
Примесные атомы всегда присутствуют в металле, так как практически невозможно выплавить химически чистый металл. Они могут иметь размеры больше или меньше размеров основных атомов и располагаются в узлах решётки или междоузлиях.

Линейные дефекты

Наиболее важным видом линейных дефектов являются дислокации, среди которых обычно различают краевые и винтовые дислокации (рис. 1.10).

Краевую дислокацию можно представить в виде края оборванной полуплоскости, которая расположена в верхней части идеального кристалла.

Винтовая дислокация возникает при сдвиге на период решетки одной части кристалла относительно другой вдоль некоторой полуплоскости. Эта полуплоскость обозначена в виде закрашенной части кристалла. Перемещение от атома к атому вокруг линии дислокации происходит вдоль винтовой линии, что указывает на происхождение термина винтовой дислокации.



Границы зерен определяются точками соприкосновения смежных кристаллов. Границы зёрен – препятствия для развития деформации (рис.1.12).

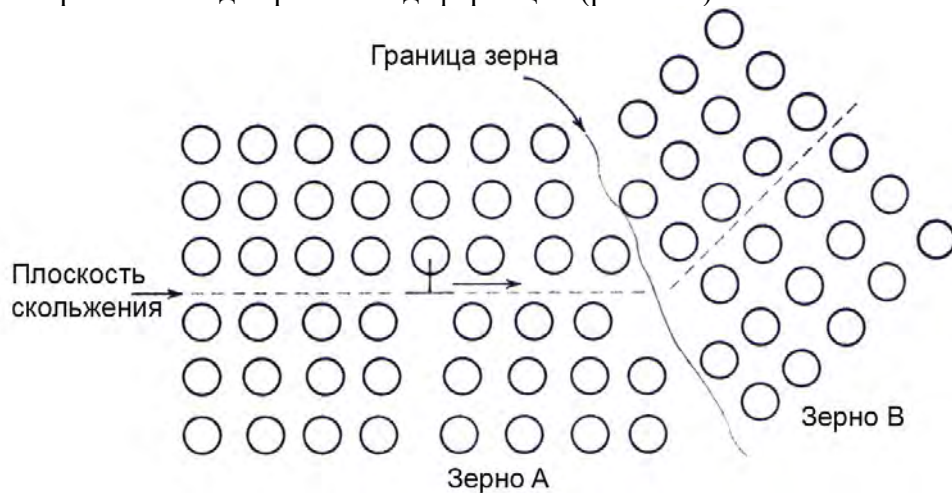


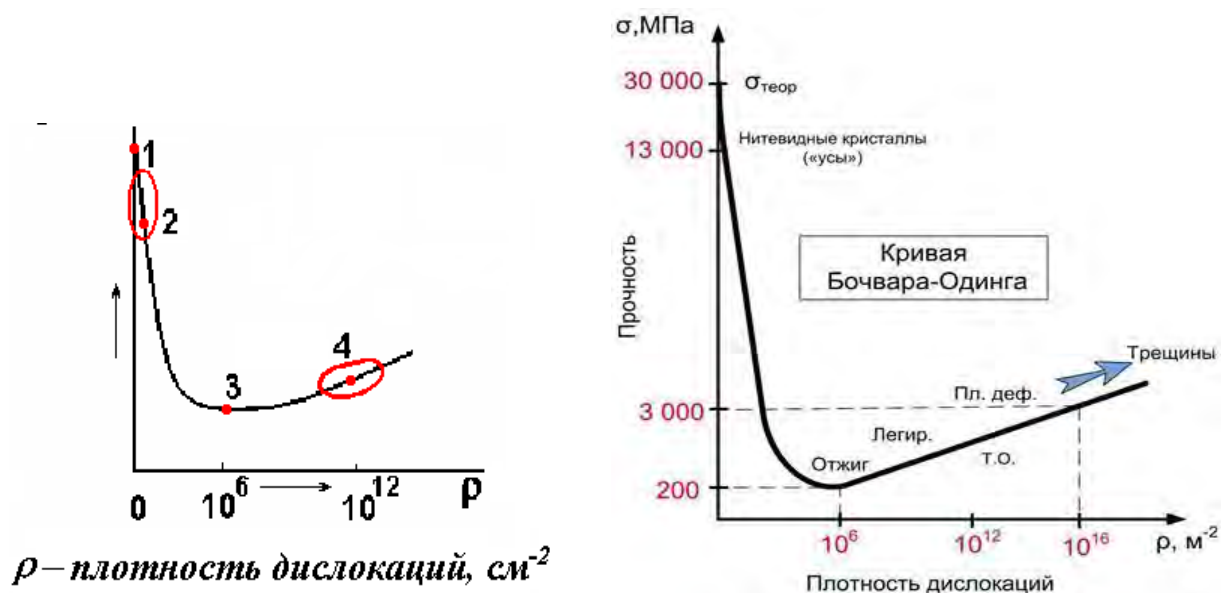
Рисунок 1.12 – Поверхностные дефекты

На границах между зёрнами атомы не имеют правильного расположения. Существует переходная область шириной в несколько атомных диаметров, в которой решётка одного зёрна переходит в решётку другого зёрна с иной ориентацией. Строение переходного слоя (границы) способствует скоплению в нем дислокаций.

Плотность дислокаций ρ – это суммарная их длина в единице объёма:

$$\rho = \frac{\sum l}{V} [\text{см}^{-2}]$$

Как следует из рисунка 1.13 материалы в зависимости от плотности дислокаций могут иметь разную прочность, при этом **повысить прочность относительно минимального уровня можно двумя путями: увеличивая или уменьшая плотность дислокаций**. Уменьшения плотности дислокаций можно добиться рафинируя (очищая) металлы и используя специальные способы получения. В большинстве случаев в промышленном производстве используют второй более удобный (дешевый) путь, заключающийся в увеличении плотности дислокаций, заключающийся в таких воздействиях как легирование, термическая обработка или пластическая деформация, хотя эти воздействия и дают менее значительный эффект.



ρ – плотность дислокаций, см^{-2}

1 – идеальный кристалл, 2 – «усы» (монокристаллы), 3 – отожжённые металлы (поликристаллы), 4 – деформированные металлы

Рисунок 1.13 – Влияние плотности дислокаций на прочность (кривая Бочвара-Одинга)

Полиморфизм

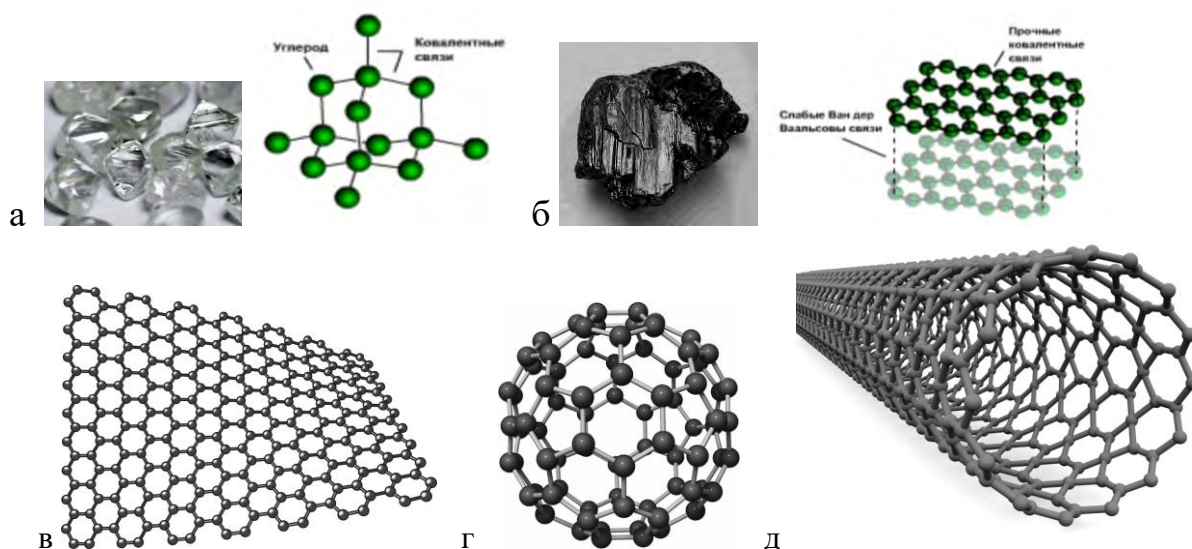
Полиморфизм – (от греч. «поли» – много, «морфэ» – форма) – свойство соединений и простых веществ в зависимости от внешних условий (T , P , x – концентрация растворов) кристаллизоваться в различных структурных типах.

Полиморфизм кристаллов – способность вещества существовать в различных кристаллических структурах, называемых *полиморфными модификациями* (их принято обозначать греческими буквами α , β , γ и т. д.).

Полиморфизм для простых веществ называют аллотропией, но понятие полиморфизма не относят к некристаллическим аллотропным формам (таким, как газообразные O_2 и O_3).

Примеры полиморфизма

Некоторые полиморфные формы углерода представлены на рис. 1.14.



а – алмаз; б – графит; в – графен; г – фуллерен; д – углеродная нанотрубка
Рисунок 1.14 – Примеры аллотропных (полиморфных) форм углерода

Полиморфные модификации железа представлены на рис. 1.15.

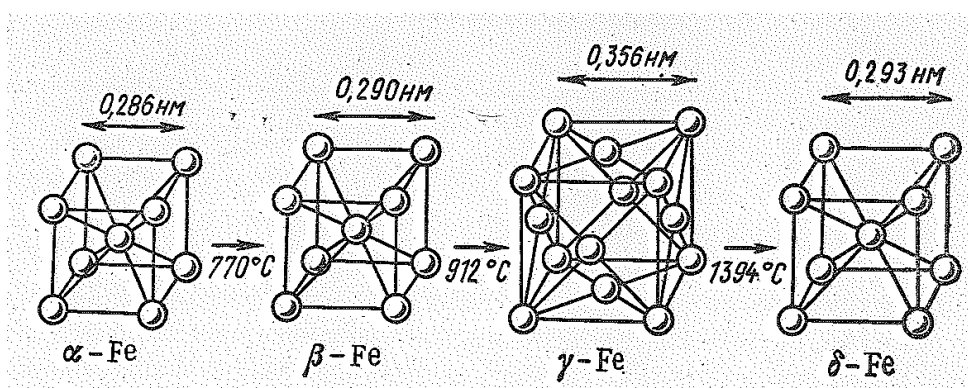


Рисунок 1.15 – Полиморфные модификации железа

Растворимость углерода в α -Fe составляет до 0,02%, а в γ -Fe до 2,14%, т.е. в 100 раз больше.

Полиморфные превращения железа используют при термической обработке железоуглеродистых сплавов.

Как уже было указано в таблице 1.2 кристаллическая структура титана Ti при температуре окружающей среды и давлении, близком к атмосферному, представляет собой α -фазу Ti_α (с гексагональной плотноупакованной решеткой ГПУ. При температуре около 890 °C титан подвергается полиморфному (аллотропическому) превращению в объемно-центрированную кубическую ОЦК β -фазу Ti_β , которая остается стабильной до температуры плавления.

Примером отрицательных последствий протекания полиморфных превращений является переход β -Sn (белое олово) устойчивое при температурах более 13 °C и имеющее тетрагональную решетку с металлической связью и плотностью $\rho=7280 \text{ кг/м}^3$ в α -Sn (серое олово) имеющее решетку с ковалентной связью и плотностью $\rho=5750 \text{ кг/м}^3$. При переходе белого олова в серое его удельный объем существенно увеличивается (на 25,6%) и металл рассыпается (рисунок 1.16). Это явление получило название оловянная чума. Одна модификация переходит в другую тем быстрее, чем ниже температура окружающей среды (максимальная скорость наблюдается при температурах ниже (-33) °C. Исторически известны примеры

негативных последствий этого процесса, например, гибель экспедиции Скотта к Южному полюсу из-за разгерметизации емкостей с топливом паянных оловом, а также разрушение оловянных пуговиц в морозы на военной амуниции и др.

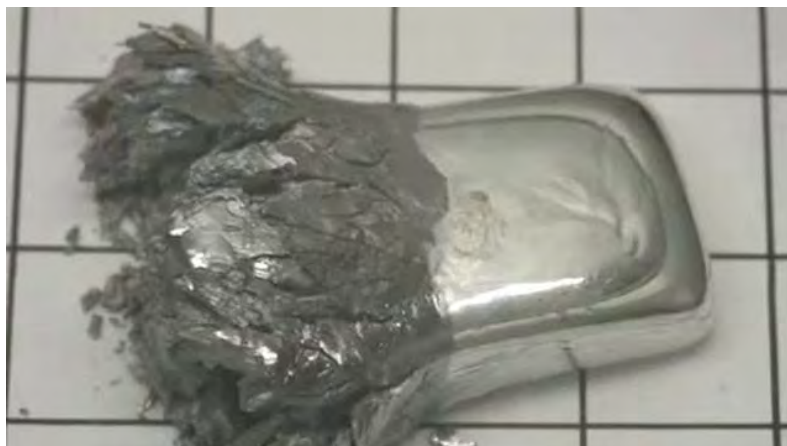


Рисунок 1.16 – Переход белого олова β -Sn в серое α -Sn

Тема 1.2. Методы изучения строения материалов

Внутреннее строение, или структуру, металлов и их дефекты изучают с помощью макро-структурного, микроструктурного, магнитного, люминесцентного, ультразвукового, рентгеновского и γ -дефектоскопического методов анализа.

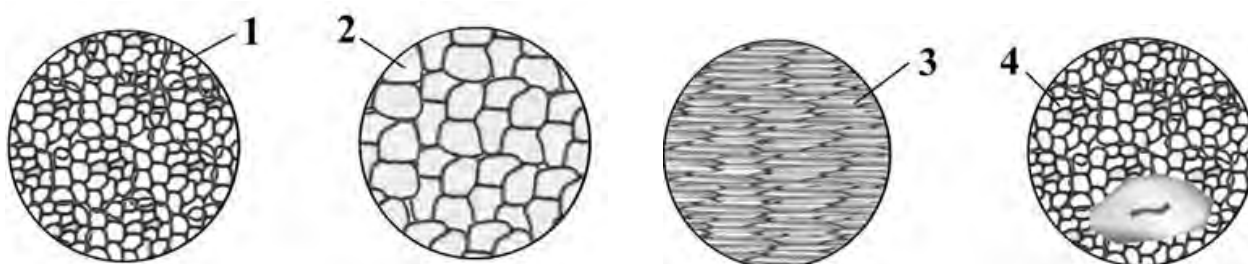
Макроструктура – это строение металла, видимое невооруженным глазом или при небольшом увеличении (до 30...40 раз) с помощью линзы, лупы, окуляра.

Простейшим способом выявления структуры материала является исследование излома.

Фрактография – это наука, изучающая строение изломов.

Виды изломов (рис. 1.17):

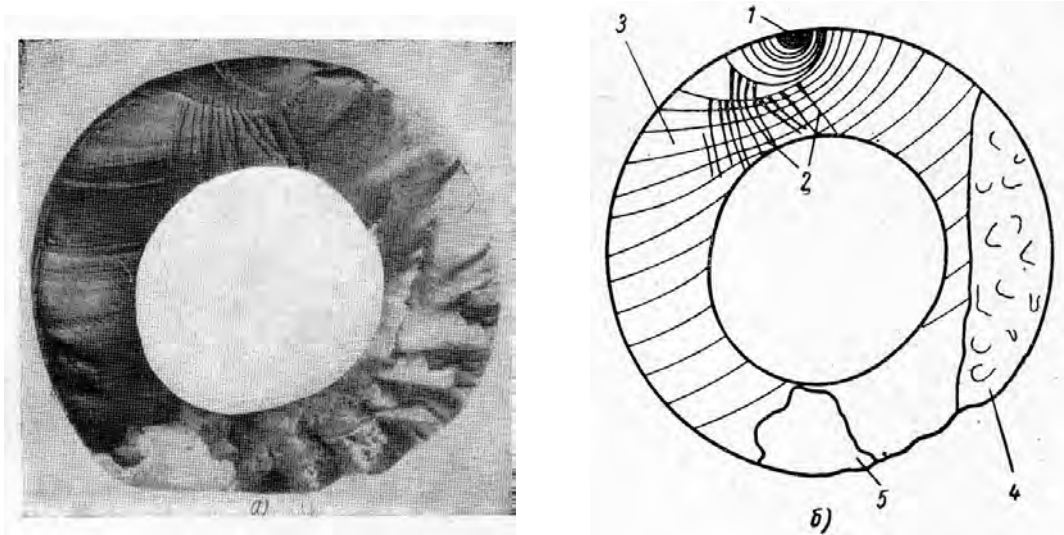
- хрупкий – структура излома зернистая, чем мельче зерно, тем материал прочнее;
- вязкий (пластичный) – структура волокнистая, чем длиннее волокно, тем мягче материал;
- усталостный – там, где зародилась микротрещина, кромки детали, соприкасаясь зашлифовывают друг друга, образуется светлое пятно. В зоне окончательного разрушения структура зернистая или волокнистая.



1,2 – хрупкий излом; 3 – вязкий; 4 – усталостный

Рисунок 1.17 – Виды изломов

Усталостный излом шатунной шейки коленчатого вала показан на рисунке 1.18.

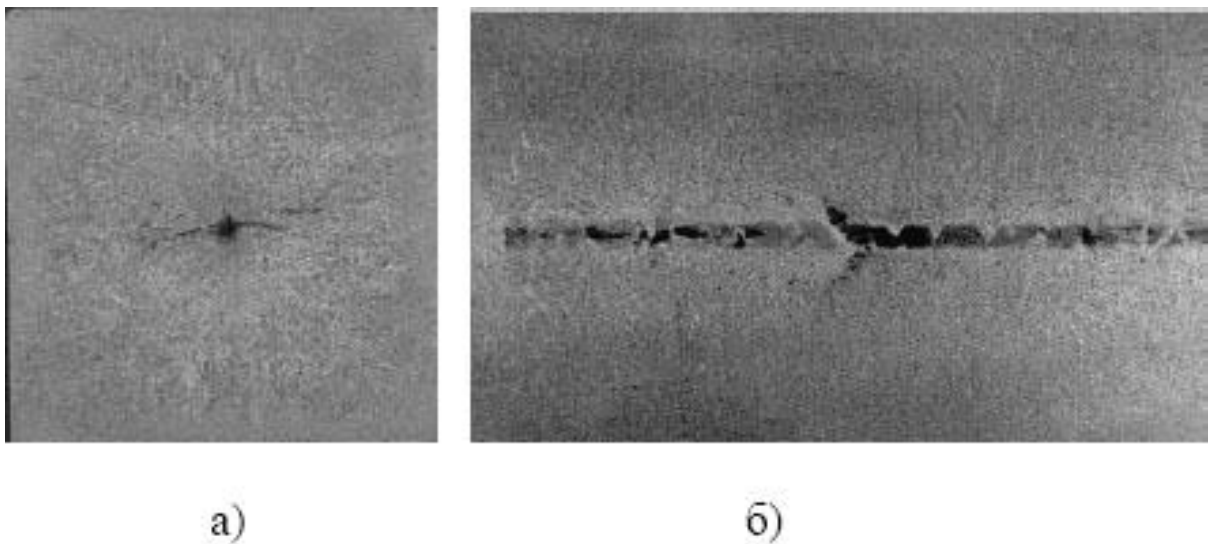


1 – фокус излома и зона очага разрушения; 2 – вторичные ступеньки и рубцы; 3 – усталостные линии; 4 – зона ускоренного развития излома; 5 – зона долома

Рисунок 1.18 – Усталостный излом (а) и схема излома (б) шатунной шейки коленчатого вала с типичными знаками (сталь 40ХНМА)

При литье металлов и сплавов возможны такие макродефекты как усадочные раковины, поры, газовые пузыри, трещины, неметаллические включения и структурная неоднородность. Данные дефекты можно выявить, используя макроанализ. Для анализа делают разрезы заготовок и деталей и изготавливают макрошлифы.

На рисунках 1.19-1.21 показаны дефекты непрерывнолитых заготовок квадратного сечения, являющихся продукцией металлургического производства для дальнейшего получения сортового проката и проволоки.



а)

б)

а - поперечный темплет; б - продольный темплет

Рисунок 1.19 – Центральная пористость в непрерывнолитой сортовой заготовке

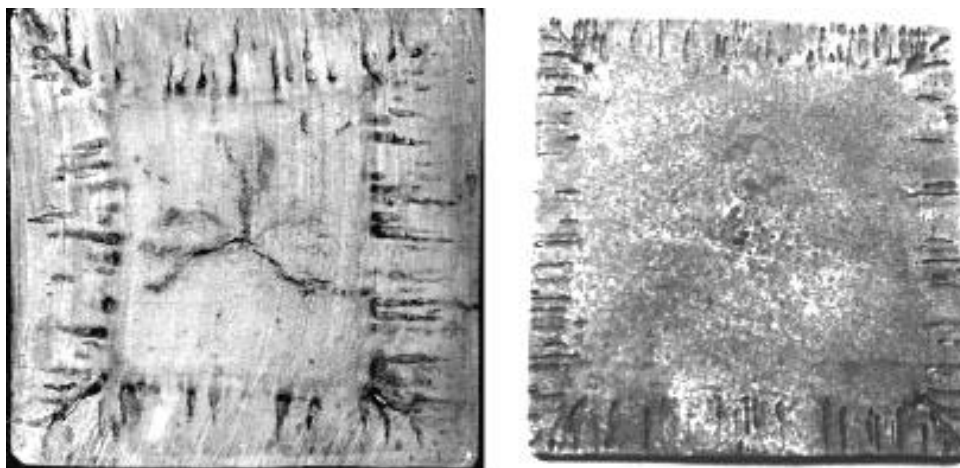


Рисунок 1.20 – Пузыри в подкорковой зоне непрерывнолитой заготовки (поперечный темплет)

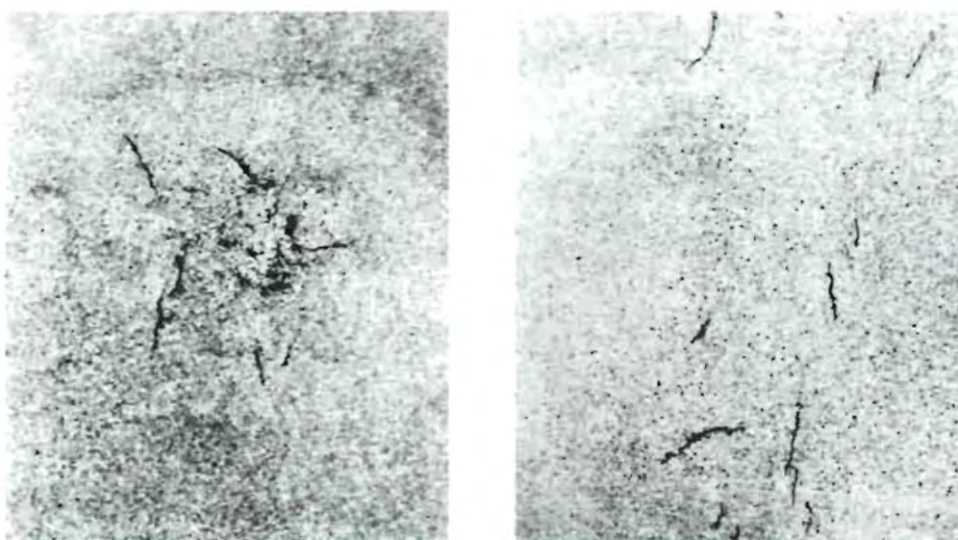
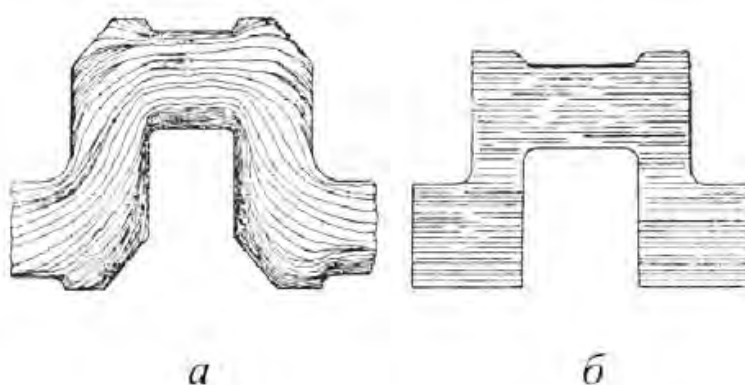


Рисунок 1.21 – Макрошлиф с флокамими

При помощи макроанализа исследуют структуру деформированных металлов и сплавов (рис. 1.22).



а – штампованный вал; б – вал вырезан из проката

Рисунок 1.22 – Влияние деформации на макроструктуру и свойства металлов и сплавов

В результате химико-термической обработки меняется структура детали на определенную глубину, что также выявляется в результате макроструктурного анализа (рис. 1.23).

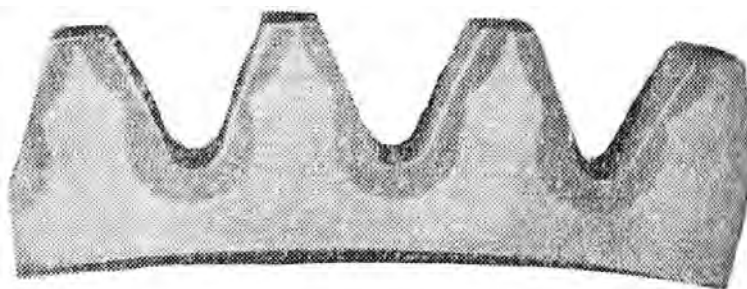
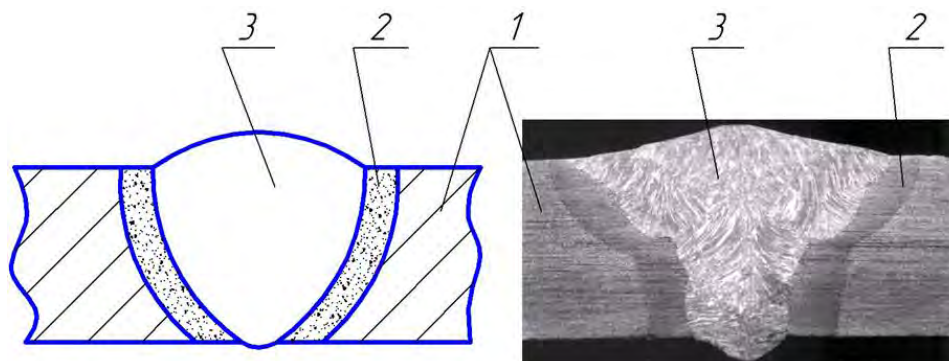


Рисунок 1.23 – Макроструктура деталей, прошедших химико-термическую обработку

В результате макроструктурного анализа можно определить качество сварных швов (рис. 1.24).



1 – свариваемые детали, 2 – зона термического влияния (ЗТВ), 3 – сварной шов

Рисунок 1.24 – Макроструктура сварного шва

Микроструктуру изучают с помощью светового ($d = 0,1 \dots 0,2$ мкм, а максимальное увеличение 2500 крат) или электронного ($d \geq 0,2$ нм) микроскопов.

Под разрешающей способностью (РС) понимают способность прибора или аппарата наблюдения (микроскопа, человеческого глаза, др.) отчетливо различать минимальные размеры объекта или деталей структуры.

Разрешающая способность любого прибора наблюдения зависит от длины волны излучения (светового, электронного, рентгеновского и др. потоков), которое в нем используется для изучения объекта исследования (структуры). Чем меньше длина волны излучения λ , тем больше разрешающая способность РС. Учитывая длины волн видимого света в 380-780 нм, полезное увеличение светового микроскопа не превышает 2500 раз.

Общее увеличение светового микроскопа $M_{см}$ рассчитывается, как произведение увеличений объектива $M_{об}$ и окуляра $M_{ок}$: $M_{см} = M_{об} \cdot M_{ок}$. Объектив находится под объектом, который в свою очередь располагается на предметном столике, а окуляр связан с глазом (око). Поверхность объекта исследуется в отраженном свете, который от источника света (лампы), попадает через оптическую систему на поверхность, отражается от нее и через оптическую систему попадает в глаз или в цифровую камеру.

Увеличение светового микроскопа и его оптических элементов (объектива, окуляра) обозначают символом X, например, увеличение микроскопа – 1500 X, окуляра – 10 X, объектива – 150 X.

У световых микроскопов как правило имеется несколько объективов с различными увеличениями, поэтому общее увеличение светового микроскопа, например, с объективом 100X и окуляром 10X будет равно 1000X.

Для исследования макро- и микроструктуры необходимо предварительно подготовить сам образец, а также его поверхность.

Этапы процесса металлографии представлены на рис. 1.25. Основными из них являются вырезка образца, шлифование и полирование исследуемой поверхности и травление по-

верхности (обработка поверхности реактивами, например, 5% раствором азотной кислоты в спирте), а уже потом следует **исследование структуры** на микроскопе.



Рисунок 1.25 – Этапы процесса металлографии

При необходимости исследовать микроструктуру (или тонкую структуру) с увеличени-
ями более 2500X, например, 10000X, 100000X или 1000000X световые микроскопы не ис-
пользуют в связи с физической невозможностью рассмотреть детали микроструктуры с та-
кими увеличениями (**замена линз не поможет, так как ограничение связано с длиной
волны света**). В этом случае исследования проводят с помощью электронных микроскопов
(вместо фотонов света в них используется пучок электронов, а электроны могут иметь зна-
чительно меньшую длину волны в зависимости от используемого ускоряющего их напря-
жения).

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

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

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

Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) основана на формировании увеличенного изображения объекта потоком электронов, прошедших сквозь объект (рис. 1.26). Электронный просвечивающий микроскоп может также работать в режиме электронографа – прибора, позволяющего исследовать атомно-кристаллическое строение твердых тел (например, определять тип кристаллической решетки) на основе дифракции (рассеяния) образцом электронов.

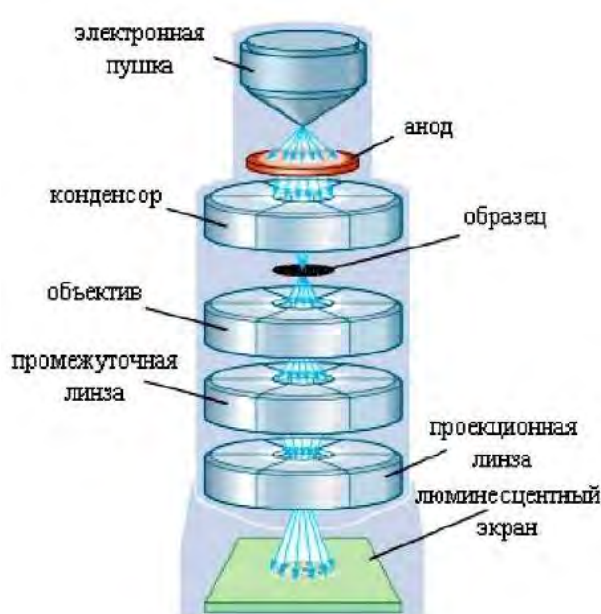
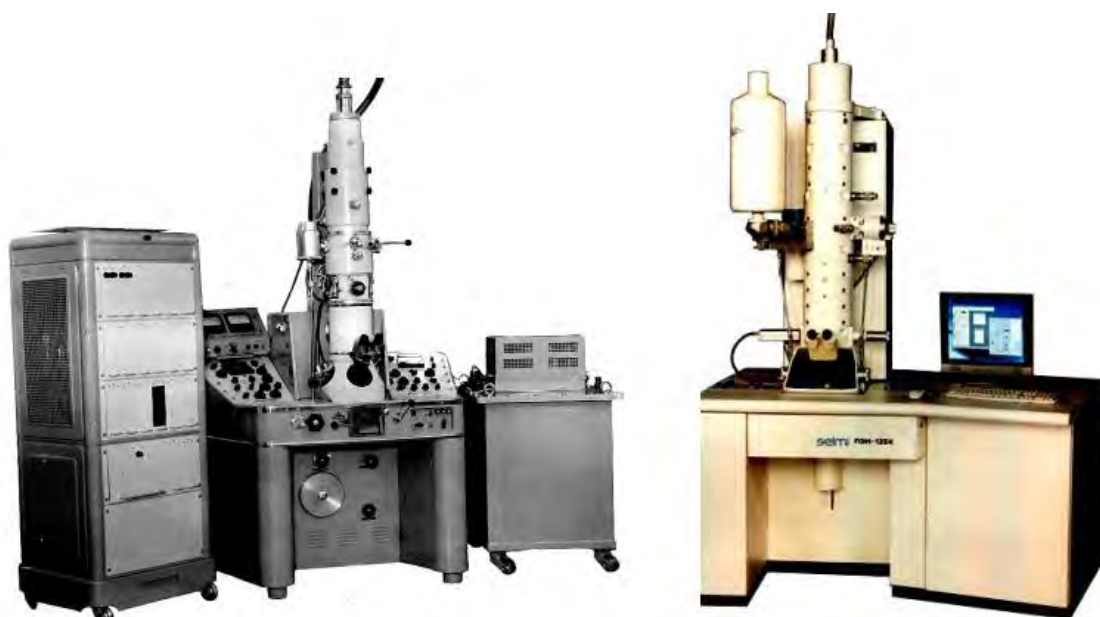


Рисунок 1.26 – Схема просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ)

Электроны эмитируются из электронной пушки посредством термоэлектронной эмиссии из нити накаливания, либо посредством полевой эмиссии. Далее электроны ускоряются высокой разностью потенциалов (от 100000 В) и фокусируются на образце электромагнитными или электростатическими линзами.

При исследовании объектов с помощью ПЭМ в колонне микроскопа, рис. 1.26-1.27, создается «высокий» вакуум ($10^{-3} \dots 10^{-5}$ Па), поскольку наличие газа в камере приводит к рассеянию и ослаблению электронного пучка. Создание вакуума осуществляется системой вакуумных насосов (предварительного вакуума – с помощью форвакуумного насоса и окончательного – с помощью высоковакуумного насоса).



а – УЭМВ-100К; б – ПЭМ -125К

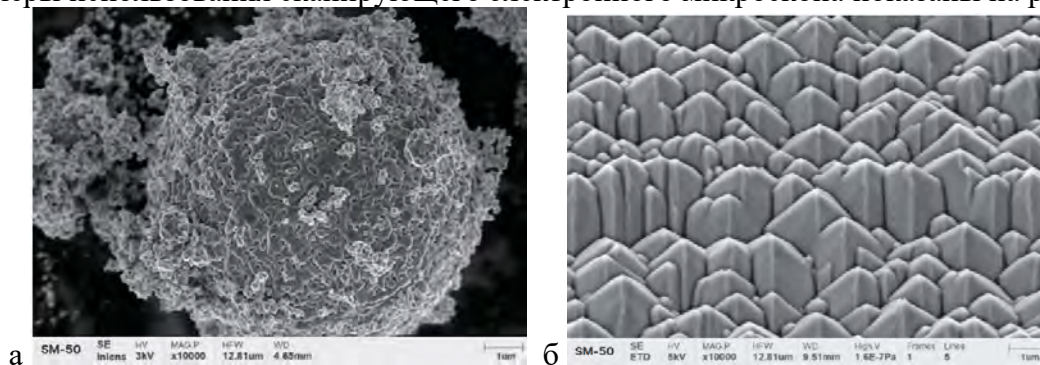
Рисунок 1.27 – Общий вид просвечивающих электронных микроскопов

Сканирующие электронные микроскопы представлены на рис. 1.28.



Рисунок 1.28 – Сканирующие электронные микроскопы

Примеры использования сканирующего электронного микроскопа показаны на рис. 1.29.



а) Медный порошок (ускоряющее напряжение: 3 кВ, увеличение: 10 000х)

б) Фотоэлектрическая кремниевая пластина

(ускоряющее напряжение: 5 кВ, увеличение: 10 000х)

Рисунок 1.29 – Примеры использования сканирующего электронного микроскопа

Сканирование поверхности чувствительными элементами с преобразованием информации о рельефе в изображение положено в основу работы сканирующих туннельных и атомно-силовых микроскопов.

Схемы сканирующего туннельного и атомно-силового микроскопов представлены на рисунке 1.30.

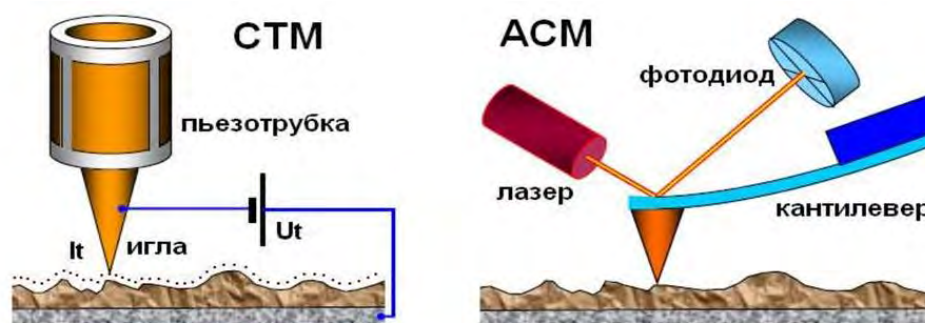


Рисунок 1.30 – Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) и атомно-силовой микроскоп (АСМ)

Перечисленные выше исследования проводят, используя стандартные методики, которые приводятся в соответствующих государственных стандартах. Примеры методов и стандартов представлены в табл. 1.3.

Таблица 1.3 – Методы и стандарты исследования структуры материалов

Методы исследования структуры материалов	Стандарты
Металлографические исследования	ГОСТ 8233-56
Определение количества неметаллических включений	ГОСТ Р ИСО 4967-2015; ГОСТ 1778-70
Определение балла зерна	ГОСТ 5639-82; ГОСТ 21073.0-75; ГОСТ 21073.1-75; ГОСТ 21073.2-75; ГОСТ 21073.3-75; ГОСТ 21073.4-75
Определение глубины обезуглероженного слоя	ГОСТ 1763-68
Определение содержания ферритной фазы	ГОСТ Р 53686-2009; ГОСТ 11878-66
Определение степени графитизации	СТО 70238424.27.100.005-2008 СО 153-34.17.456-2003
Определение степени сфероидизации перлита	СТО 70238424.27.100.005-2008 СО 153-34.17.456-2003
Макроскопический и микроскопический анализ, в том числе анализ изломов сварных соединений	РД 24.200.04-90; РД 03-495-02; ГОСТ 10243-75; ГОСТ 5640-68
Определение структуры чугуна	ГОСТ 3443-87
Определение величины зерна цветных металлов	ГОСТ 21073.0-75; ГОСТ 21073.1-75; ГОСТ 21073.2-75; ГОСТ 21073.3-75; ГОСТ 21073.4-75
Анализ изломов методом стереоскопической фрактографии	Р 50-54-22-87
Рентгеноструктурный анализ для определения глубины зон пластической деформации под поверхностью разрушения	Р 50-54-52-88

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

Дифракционная картина – рентгенограмма вещества позволяет определить кристаллическую структуру вещества. Ее получают, направляя на исследуемый объект пучок рентгеновских лучей (рис. 1.31).

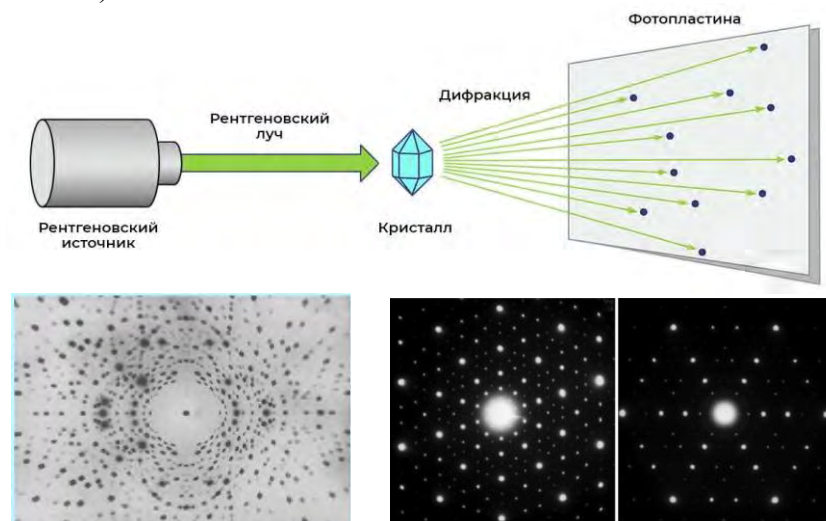


Рисунок 1.31 – Схема рентгеноструктурного анализа и изображение рентгенограмм

Используя рентгенограммы можно восстановить структуру решетки кристалла и получить ее параметры. Оборудование для рентгеноструктурного анализа представлено на рис. 1.32.



Рисунок 1.32 – Оборудование для рентгеноструктурного анализа

Рентгеновское излучение можно использовать и другим способом уже для анализа макроструктуры.

Рентгеновский метод применяется для контроля литых, кованных и штампованных деталей, а также сварных соединений. Он заключается в просвечивании деталей рентгеновским излучением и фиксировании выходящего излучения на специальной светочувствительной пленке или на специальной матрице. При этом темные места на пленке свидетельствуют о наличии дефектов в исследуемых деталях (рис. 1.33). Разновидностью рентгеновского метода является γ -дефектоскопия.

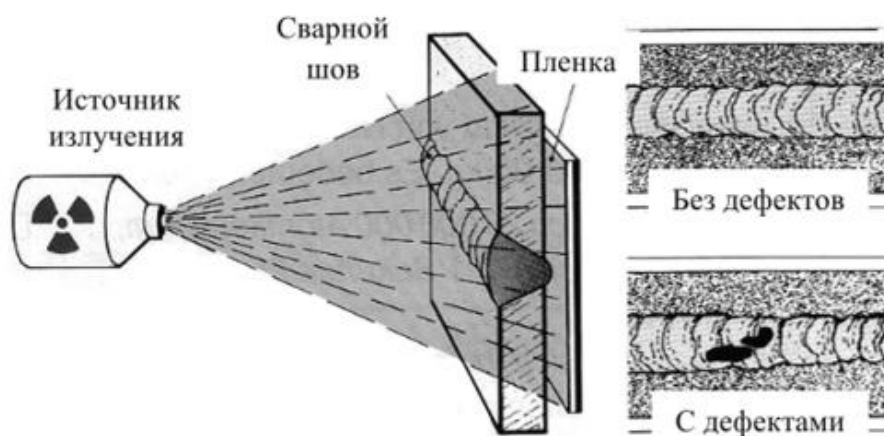


Рисунок 1.33 – Рентгеновский метод дефектоскопии

С помощью **ультразвукового метода** выявляют дефекты, расположенные глубоко в объеме металла. Для этого используются ультразвуковые дефектоскопы, с помощью которых через металл пропускают пучок ультразвуковых волн и контролируют их прохождение (рис. 1.34). Любая несплошность металла нарушает нормальное распространение волн, что можно увидеть на экране имеющегося в приборе осциллографа.

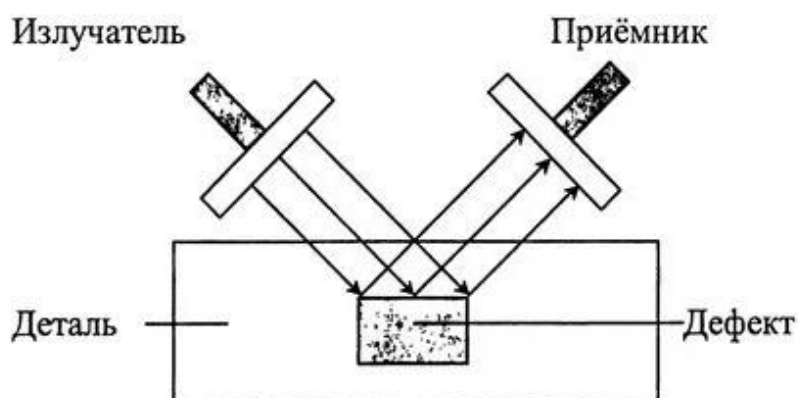


Рисунок 1.34 – Схема обнаружения дефекта отражением ультразвука

Сканирующая акустическая микроскопия позволяет визуализировать структуру внутри образцов используя звуковое излучение (рис. 1.35).



Рисунок 1.35 – Сканирующая акустическая микроскопия

Магнитный метод применяется для выявления трещин, волосовин, раковин и других дефектов, находящихся на поверхности (или близко около нее) изделий из ферромагнитных материалов. Сущность метода заключается в намагничивании изделия. Затем на поверхность наносится магнитный порошок окиси железа или его суспензия в керосине. Частицы порошка под действием магнитного потока, рассеивающегося в месте расположения дефекта, ориентируются по силовым линиям. В результате отчетливо выделяются даже самые мелкие дефекты (рис. 1.36).



Рисунок 1.36 – Использование магнитопорошкового метода

Люминесцентный метод используется для выявления поверхностных дефектов изделий (микротрещин). Он основывается на свойстве некоторых веществ светиться под действием ультрафиолетовых лучей. Сущность метода заключается в нанесении на поверхность изделия специального флуоресцирующего раствора и ее освещении ультрафиолетовым светом. Проникающий в микротрещины раствор под действием лучей светится, тем самым позволяя их выявить.

Тема 1.3. Механические свойства материалов и методы их изучения

Механические свойства являются важнейшими характеристиками металлов и сплавов.

Механические свойства характеризуют поведение тел под действием механических напряжений. Эти напряжения возникают при эксплуатации металлических изделий, а также в процессе их изготовления (при литье, обработке давлением, сварке и т. п.).

Механические свойства определяют с помощью механических испытаний специально изготовленных образцов. Механические свойства являются еще менее постоянными для материалов, чем физические. Они зависят не только от химического состава и структуры материала, но и от условий испытаний: формы и размеров образца, скорости нагружения и других факторов. Большинство механических свойств очень сильно зависят от структуры, например, от размера зерна и плотности дислокаций, т.е. относятся к разряду структурно-чувствительных свойств.

Для определения механических свойств проводят испытания по определённым методикам. Статическими называют испытания, при которых прилагаемая к образцу нагрузка возрастает медленно и плавно и производится выдержка при нагружении.

Методы измерения твердости

Методы измерения твердости могут базироваться на совершенно разных принципах, числа твердости имеют разную размерность. Твердость материала не является его фундаментальным физическим свойством и зависит помимо прочего от метода измерения.

Если для бытового понимания достаточно качественных характеристик твердости материалов (очень мягкий, мягкий, твердый и т.д.), то для промышленного применения материалов необходимы количественные характеристики, а, следовательно, необходимы методы изме-

рения и шкалы. Исторически разными исследователями предлагались свои методы измерения твердости некоторые из которых используются и в настоящее время. В качестве одного из методов определения относительной твердости можно привести метод царапания и шкалу Мооса (минералогическая шкала твердости).

Пример соотношения шкал твердости приведен на рисунке 1.37.

твердость по Моосу									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
тальк	гипс	кальцит	флюорит	апатит	ортоклаз	кварц	топаз	корунд	алмаз
3	60	120	200	520	800	1150	1450	2100	10000
микротвердость, кг/мм ²									

Рисунок 1.37 – Пример соотношения шкал твердости

Для количественной оценки твердости наиболее широко применяют статическое вдавливание по нормали к испытываемой поверхности под заданной нагрузкой **очень твердого накопечника – индентора**.

Число твердости характеризует сопротивление материалов местной пластической деформации, возникающей при вдавливании индентора.

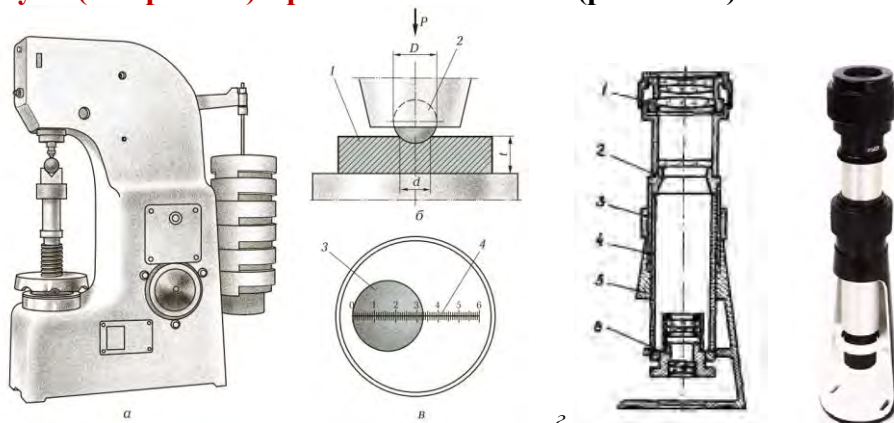
Твердость по Бринеллю (ГОСТ 9012-59)

Шарик из закаленной стали диаметром D вдавливается в образец (изделие) под действием нагрузки P , после снятия которой измеряют диаметр отпечатка d (рис. 1.38).

Все числа твердости обозначают буквой H (от англ. Hardness – твердость). Число твердости по Бринеллю $HВ$ равно отношению нагрузки P (кгс) к **площади шаровой поверхности отпечатка F (мм²)**:

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

Отпечаток очень маленький поэтому для измерения его диаметра необходима специальная лупа (микроскоп) Бринелля со шкалой (рис. 1.38в).



а – твердомер Бринелля; б – схема измерения твердости (1 – образец; 2 – индентор); в – измерение диаметра отпечатка (3 – отпечаток; 4 – размерная шкала); г – микроскоп МПБ-3 (1 – окуляр; 2 – сетка; 3 – установочное кольцо; 4 – тубус; 5 – колонка; 6 – объектив)

Рисунок 1.38 – Твердомер Бринелля и схема измерения

Твердость по Бринеллю имеет размерность напряжения кгс/мм². В целях преемственности эта размерность не заменена на МПа, как это требует современная система международных единиц (СИ). Рядом с числом твердости размерность не указывают. Например, твердость по Бринеллю, равную 185 кгс/мм², записывают как 185 $HВ$, что означает 185 единиц Бринелля.

Методом Бринелля можно испытывать материалы с твердостью не более 450 HB, так как при большей твердости материала шарик из закаленной стали сам недопустимо деформируется.

Можно выбрать шарик диаметром 1; 2; 2,5; 5 или 10 мм и нагрузку от 1 до 3000 кгс.

Расчет по формуле не производят, а по измеренному отпечатку d при выбранных D и P по таблице находят значение HB.

Временное сопротивление (предел прочности) и числа твердости по Бринеллю приблизительно связаны между собой:

- для стали $\sigma_b = 0,34 \text{ HB}$,
- для медных сплавов $\sigma_b = 0,45 \text{ HB}$,
- для алюминиевых сплавов $\sigma_b = 0,35 \text{ HB}$.

Твердость по Роквеллу (ГОСТ 9013-59)

Стандартом ISO 6508-1:2005 нормировано 11 шкал определения твердости по методу Роквелла (A; B; C; D; E; F; G; H; K; N; T), эти шкалы различаются типом индентора, испытательной нагрузкой и константами в формуле для вычисления твердости по результатам измерения. Наиболее широко используемые шкалы твердости по Роквеллу представлены в табл. 1.4.

Таблица 1.4 – Наиболее широко используемые шкалы твердости по Роквеллу

шкала	обозначение	Область применения	Вид индентора	Нагрузка		
				P_0	P_1	P_2
A	HRA	Для особо твердых материалов	Алмазный конус	10	50	60
B	HRB	Для относительно мягких материалов	Стальной закаленный шарик	10	90	100
C	HRC	Для относительно твердых материалов	Алмазный конус	10	140	150

Индентором служит алмазный конус с углом при вершине 120° и радиусом закругления 0,2 мм или шарик из закаленной стали диаметром 1/16 дюйма (1,5875 мм). Величину твердости оценивают по глубине вдавливания индентора (рис. 1.39). Чтобы зафиксировать исходное положение индентора, его поджимают к испытываемой поверхности под предварительной нагрузкой $P_0=10$ кгс, после чего стрелку индикатора глубины вдавливания выводят на нуль. Затем прикладывают основную нагрузку – $P_1=140$ кгс при использовании алмазного конуса и $P_1 = 90$ кгс при использовании шарикового индентора.

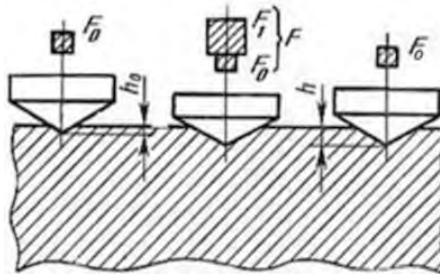


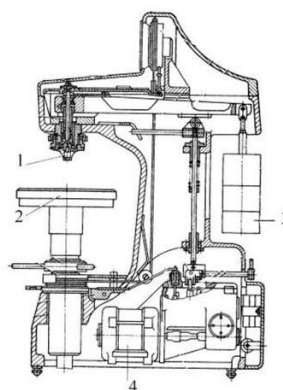
Рисунок 1.39 – Схема измерения по методу Роквелла

После снятия основной нагрузки P_1 (нагрузка P_0 остается) индикатор глубины вдавливания прямо показывает число твердости по Роквеллу.

Число твердости по Роквеллу при использовании алмазного конуса обозначают символом HRC (англ. – конус), при использовании шарикового индентора – символом HRB.

Числа твердости по Роквеллу являются безразмерными величинами.

Конструкции и разновидности твердомеров по методу Роквелла представлены на рис. 1.40-1.42.



1 – оправка с индентором; 2 – предметный стол; 3 – грузы; 4 – электродвигатель
Рисунок 1.40 – Схема твердомера Роквелла

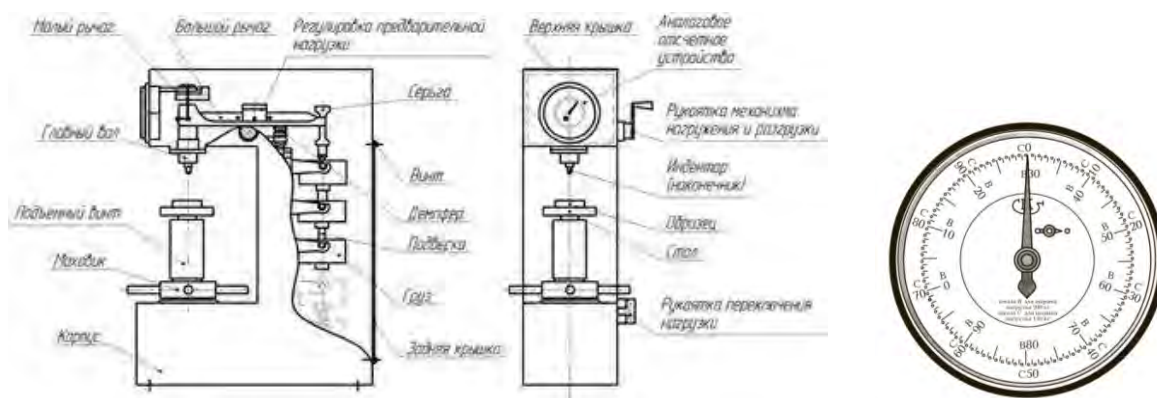


Рисунок 1.41 – Конструкция твердомера с аналоговым индикатором



а – ALPA LB060AR; б – KB150R; в – TP-5018 ПА Tochtline

Рисунок 1.42 – Некоторые разновидности твердомеров по методу Роквелла

Имеются также и другие, как правило, менее точные приборы использующие шкалы по методу Роквелла. На рис. 1.43 представлены портативные переносные твердомеры, позволяющие проводить измерение твердости некоторых габаритных изделий.



а –твёрдомер ТРП 5011 б –твёрдомер ТКП-1

Рисунок 1.43 – Портативные переносные твёрдомеры

Твёрдость по Виккерсу (ГОСТ 2999-75)

Индентором является правильная четырехгранная алмазная пирамида с углом между противоположными гранями 136° .

Число твердости по Виккерсу HV равно отношению нагрузки P (кгс), к площади поверхности пирамидального отпечатка F , мм²:

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

где d – среднее арифметическое длин обеих диагоналей отпечатка в плоскости испытуемой поверхности после снятия нагрузки (мм).

В соответствии с ГОСТом размерность твердости по Виккерсу кгс/мм², размерность у числа твердости не указывается.

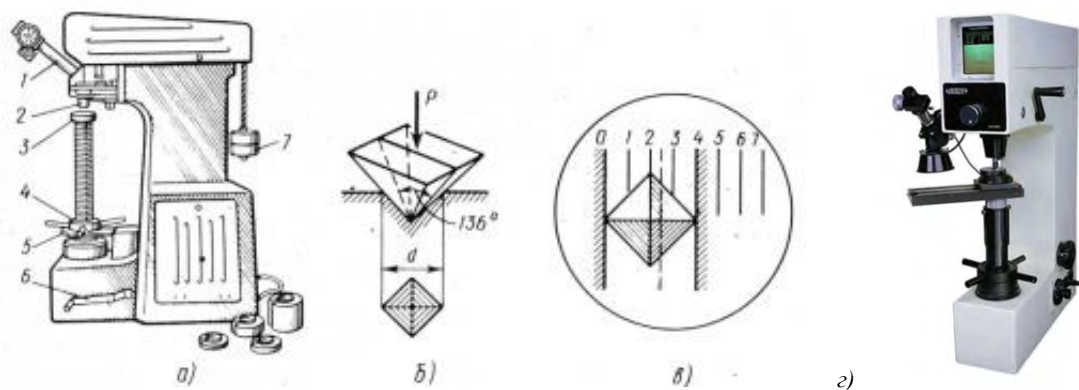
Например, твердость по Виккерсу, равную 550 кгс/мм², записывают как 550 HV.

При увеличении глубины вдавливания пирамидального индентора, в отличие от шарика, получают геометрически подобные отпечатки, и значение HV не зависит от величины нагрузки.

Угол 136° выбран из расчета, чтобы числа твердости HB и HV были близкими (до значений 300 они в точности совпадают).

Благодаря алмазному индентору можно испытывать очень твердые материалы – с твердостью до 2500 HV. Нагрузки могут быть от 1 до 100 кгс.

Расчеты по формуле не производят, а по измеренному значению d (рис. 1.43а) при выбранной нагрузке в таблице находят значение HV.



1 – микроскоп; 2 – алмазная пирамида; 3 – столик; 4 – маховик; 5 – спусковой рычаг; 6 – рукоятка взвода; 7 – груз

Рисунок 1.43а – Прибор типа ТП (а), индентор - алмазная пирамида (б) и шкала, по которой измеряют твердость методом Виккерса (в) и универсальный прибор для измерения по методам Роквелла, Бринелля и Виккерса (г).

Сравнительная схема измерения твердости методами Бринелля, Роквелла и Виккерса представлена на рис. 1.44.

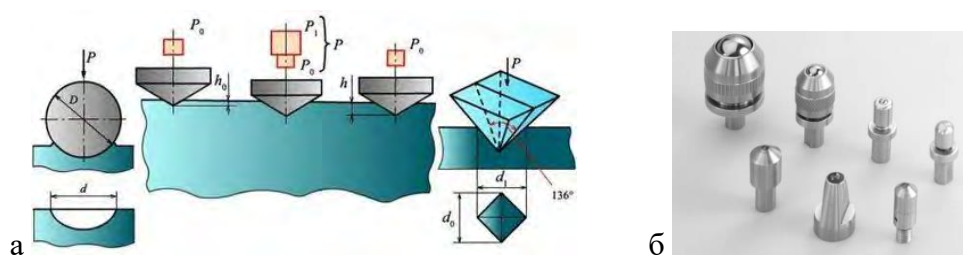


Рисунок 1.44 – Сравнительная схема измерения твердости методами Бринелля, Роквелла и Виккерса (а) и разновидности инденторов (б)

Простота метода Роквелла (главным образом, отсутствие необходимости измерять диаметр отпечатка) привела к его широкому применению в промышленности для проверки твёрдости. Также не требуется высокая чистота измеряемой поверхности, например, недостаток методов Бринелля и Виккерса – необходимость измерения размеров отпечатка с помощью микроскопа и требуют полировки поверхности.

К недостатку метода Роквелла относится меньшая точность по сравнению с методами Бринелля и Виккерса.

Микротвердость (ГОСТ 9450-76)

В рассмотренных выше методах измерения твердости размер отпечатка значительно больше размера отдельных структурных составляющих.

Для измерения твердости отдельных структурных составляющих используют метод микротвердости, являющийся разновидностью метода Виккерса и отличающийся от последнего меньшей нагрузкой на алмазную пирамиду ($P = 1 \dots 500$ гс).

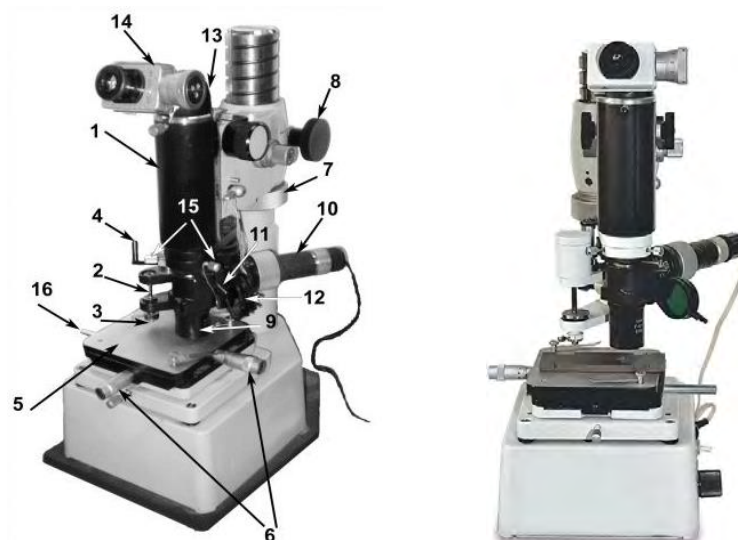
Нагрузку подбирают так, чтобы размер отпечатка был меньше размера соответствующей структурной составляющей

Образцом для измерения микротвердости является микрошлиф, и нагружение производят под специальным микроскопом, чтобы вдавливать индентор в выбранный микроучасток.

Измерения отпечатка микронных размеров также производят под микроскопом (рис. 1.45-1.46).



Рисунок 1.45 – Микротвердомер FM-800 (Future-Tech)



1 – тубус; 2 – шток; 3 – алмазная пирамида (индентор); 4 – рукоятка подъема штока; 5 – столик; 6 – микровинты; 7 – гайка; 8 – винт; 9 – эпиобъектив; 10 – осветитель; 11 – рукоятка смены светлого/темного поля; 12 – светофильтры; 13 – наклонная насадка; 14 – винтовой окуляр-микрометр; 15 – центрировочные винты; 16 – рукоятка поворота столика

Рисунок 1.46 – Микротвердомер ПМТ-3

Наноиндентирование – испытание материала методом индентирования, применяемое к нанообъемам материала (тонкие плёнки и покрытия, микро- и наноструктуры). Кроме твердости метод позволяет снимать кривые нагрузка-разгрузка (определение пластических и реологических свойств материала). Для измерения твердости, а также снятия кривых «нагрузка-разгрузка» используются соответствующие системы наноиндентирования (рис. 1.47).

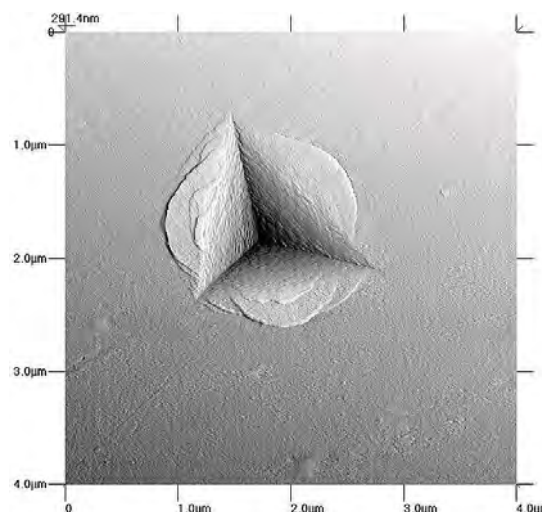
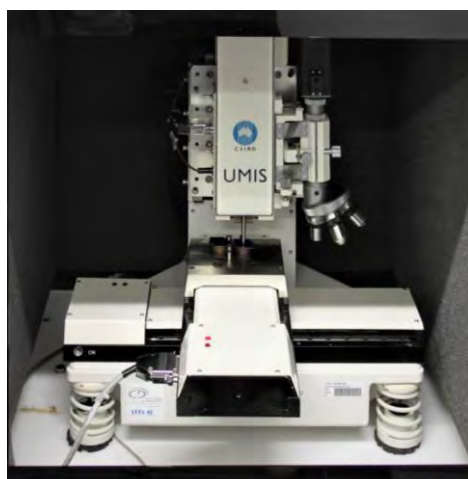


Рисунок 1.47 – Система наноиндентирования CSIRO UMIS

В зависимости от различных параметров заготовки, например, размеров, конструкции, свойств материала, для контроля твердости могут быть использованы твёрдомеры двух основных типов – стационарные (классические) и переносные (портативные, электронные) твёрдомеры. Портативные модели используют в тех случаях, когда невозможно применение стационарных вариантов, например, если детали заготовки слишком велики, либо же из-за их большой массы, когда объект исследования невозможно транспортировать в лабораторию. Портативные твёрдомеры по принципу работы классифицируются на следующие виды: твёрдомеры, работающие по динамическому методу и твёрдомеры, работающие по ультразвуковому контактному импедансу.

Работа ультразвуковых твердомеров основана на внедрении датчика в поверхность материала с последующим измерением частоты колебаний индентора. На конце металлического стержня, входящего в состав датчика твердомера, закреплен алмазный наконечник. Стержень колеблется на собственной резонансной частоте. При создании нагрузки рукой пользователя алмазный наконечник вжимается в материал и изменяет резонансную частоту стержня. Изменение собственной резонансной частоты стержня пропорционально твердости материала. Ультразвуковые твердомеры представлены на рис. 1.48.



а – MET U1A; б – ТКМ-459С; в – TIV
Рисунок 1.48 – Ультразвуковые твердомеры

Динамические твердомеры работают по методу отскока. Метод заключается в определении скорости отскока твердосплавного индентора от поверхности контролируемого изделия. Датчик прибора устанавливается на изделие, твердость которого нужно измерить. Основными частями датчика являются индентор и электромагнитная катушка. При отскоке индентора от испытуемого изделия в катушке наводится ЭДС, пропорциональная скорости отскока от поверхности изделия. Поскольку скорость отскока индентора является показателем твердости, то существует функциональная зависимость между скоростью отскока и твердостью материала. Динамические твердомеры представлены на рис. 1.49.



Рисунок 1.49 – Динамические твердомеры

Комбинированный твердомер – это прибор, который может измерять твердость обоими методами (динамическим и ультразвуковым) заменой датчика, который используется. Это самый функциональный вариант, если рассматривать переносные приборы.

Сравнительная шкала твердости по методам Роквелла и Бринелля и примеры изделий с различной твердостью представлены на рис. 1.50-1.51.



Рисунок 1.50 – Сравнительная шкала твердости по методам Роквелла и Бринелля и примеры изделий с различной твердостью

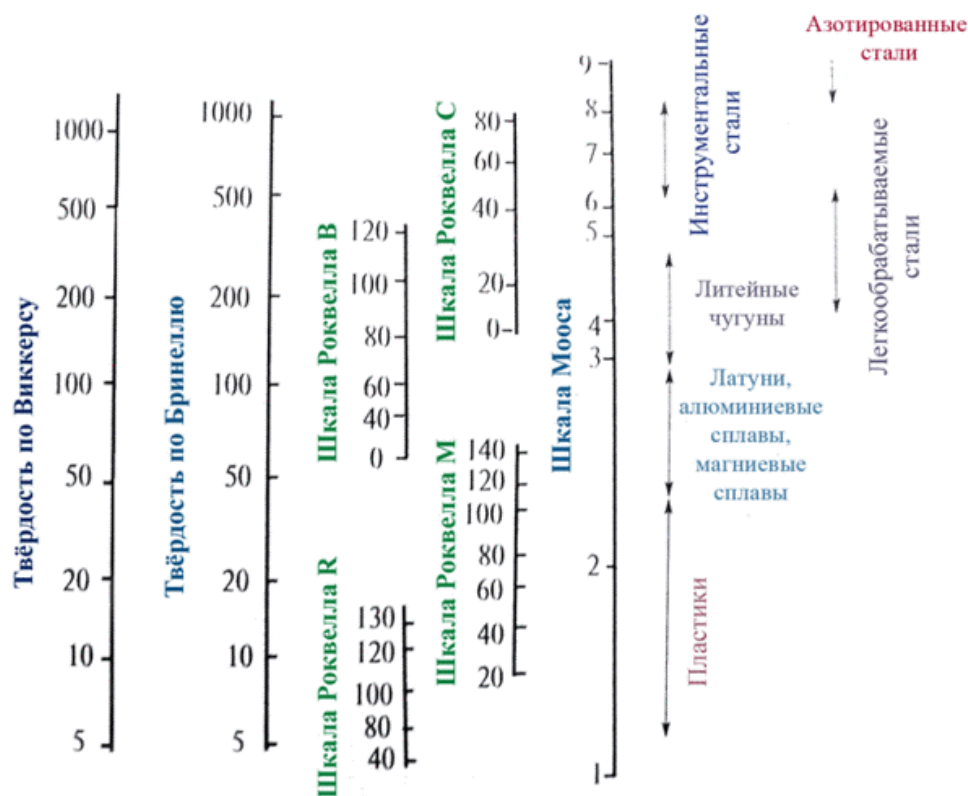


Рисунок 1.51 – Сравнительная шкала твердости по методам Виккерса, Роквелла, Бринелля и шкала Мооса с примерами машиностроительных материалов

Сравнительными таблицами и диаграммами, в которых приводятся числа твердости, полученные различными методами, следует пользоваться осмотрительно, так как измерения твердости выполняются в различных условиях.

Прочностные характеристики материалов

Прочность определяется сопротивлением материала пластическому деформированию, т.е. характеризуется напряжением, необходимым для сдвига одной части кристаллической решетки относительно другой. В бездефектном кристалле при отсутствии дислокаций сдвиг происходит за счет одновременного смещения всех атомов, и прочность такого металла будет близка к теоретической. При увеличении плотности дислокаций сдвиг будет происходить легче и прочность окажется ниже теоретической. Дальнейшее увеличение плотности дислокаций приводит к повышению прочности.

Следовательно, основной принцип повышения прочности реальных металлов связан с созданием препятствий или барьеров на пути движущихся дислокаций. Этими барьерами могут быть примесные атомы, дислокации, границы зерен и субзерен, вторичные диспер-

ные фазы. В связи с этим для упрочнения металлов и сплавов применяются широко известные способы воздействия на структуру: введение в решетку посторонних атомов путем легирования или химико-термической обработки, увеличение плотности дислокаций путем наклепа, измельчение зерна и создание ячеистой субструктуры, выделение упрочняющих фаз (дисперсионное твердение) в результате термической обработки.

Механические напряжения

Механическое напряжение – физическая величина, характеризующая интенсивность воздействия силы на единицу площади поверхности. Для образца, испытывающего растяжение механическое напряжение определяется по формуле

$$\sigma = \frac{F}{S},$$

где F – сила;

S – площадь поперечного сечения образца.

В системе СИ единицей механического напряжения является паскаль.

$$Па = \frac{Н}{м^2}$$

Также применяется единица $\frac{кгс}{мм^2} = 9,81 \text{ МПа}$

ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Испытание на одноосное растяжение (ГОСТ 1497-84) является основным источником информации о характеристиках прочности и пластичности металлических материалов.

Используют цилиндрические (чаще всего) и плоские образцы, головки которых вставляются в захваты разрывной машины (рис. 1.52, 1.53). Плоские образцы применяют главным образом для оценки свойств листового материала.



Рисунок 1.52 – Испытательные машины

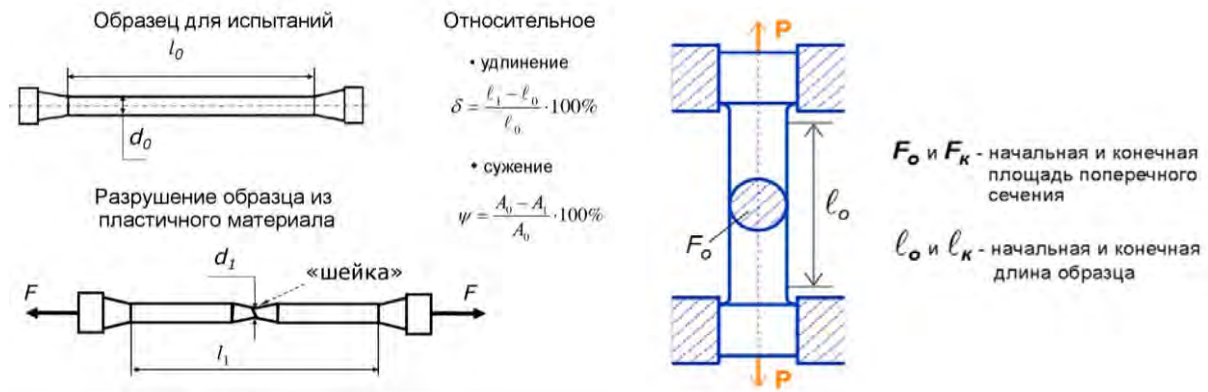


Рисунок 1.53 – Характеристики образцов для испытаний

Цилиндрический образец характеризуется диаметром рабочей части d_0 , длиной рабочей части l , начальной расчетной длиной l_0 . Расчетную длину l_0 , которая меньше l , выбирают так, чтобы исключить влияние головок образца на результаты испытаний.

Размеры образца не влияют на результат определения относительного удлинения после разрыва, если соблюдается условие геометрического подобия образцов:

$$l_0/F_0 = \text{const},$$

где F_0 – площадь поперечного сечения в рабочей части образца.

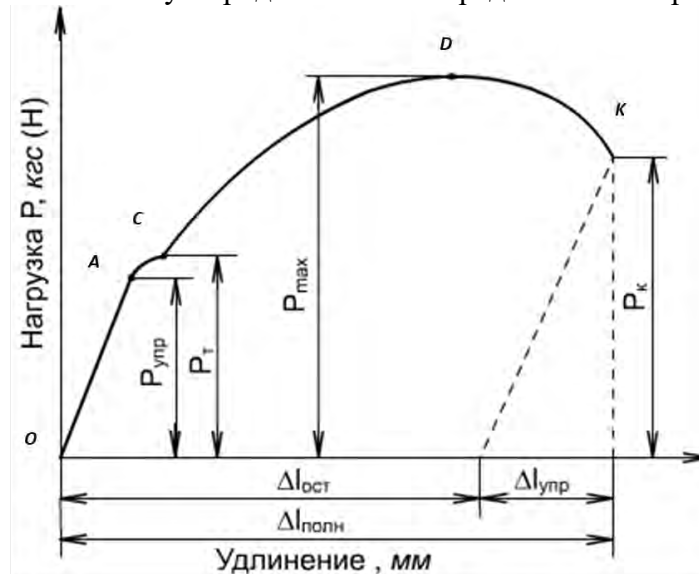
В соответствии с ГОСТом используются соотношения $l_0 = 10d_0$ и $l_0 = 5d_0$ (так называемые десяти- и пятикратные образцы).

Для литых сплавов допускается $l_0 = 2,5d_0$.

При испытании к образцу прикладывают растягивающую его силу (нагрузку) и одновременно фиксируют его удлинение Δl , в результате получая диаграмму растяжения.

На диаграмме имеются характерные участки, характеризующие поведение материала. В зоне упругости при снятии нагрузки материал как пружина возвращается в первоначальное состояние, не имея остаточного удлинения. При дальнейшем увеличении нагрузки образец переходит в зону пластической деформации и при определенном удлинении нагрузка становится максимальной и далее падает. Падение нагрузки связано с уменьшением сечения образца в зоне образования шейки. Далее происходит разрыв образца.

Диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали представлена на рис. 1.54.



ОА – область упругой деформации,

АД – область пластической деформации,

DK – область сосредоточенной пластической деформации

Рисунок 1.54 – Диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали

Иллюстрация нагружения и деформации образца при испытании металлов на растяжение представлена на рис. 1.55.

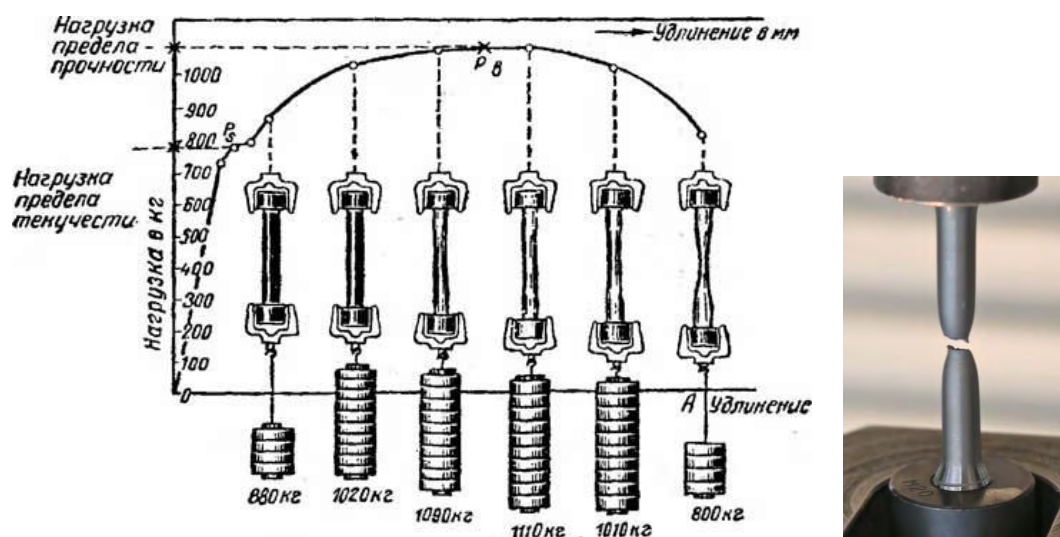


Рисунок 1.55 – Иллюстрация нагружения и деформации образца при испытании металлов на растяжение

Для получения характеристик, относящихся не к конкретному образцу, а непосредственно к материалу нагрузку P необходимо разделить на площадь сечения образца до испытаний F_0 и получить напряжения σ (характерные точки диаграммы при этом называются пределами: пропорциональности $\sigma_{пл}$, упругости σ_y , текучести σ_T , прочности σ_B). Напряжения как правило измеряют в МПа. Вместо конкретного удлинения Δl на диаграмме указывается относительное удлинение δ .

Диаграмма условных напряжений низкоуглеродистой стали представлена на рис. 1.56.

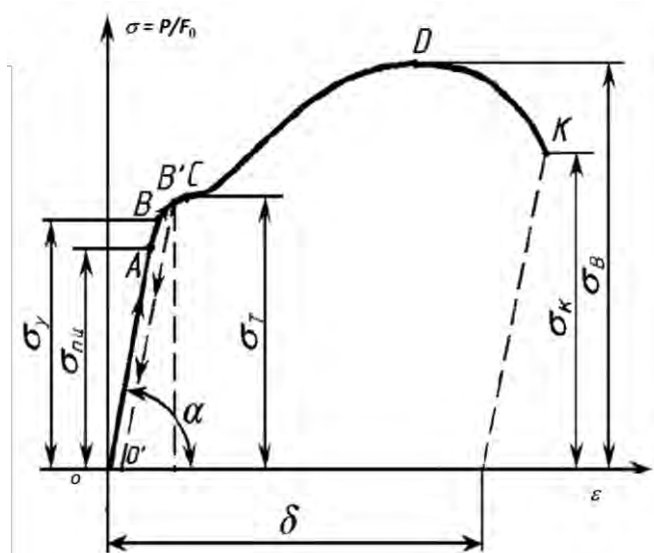
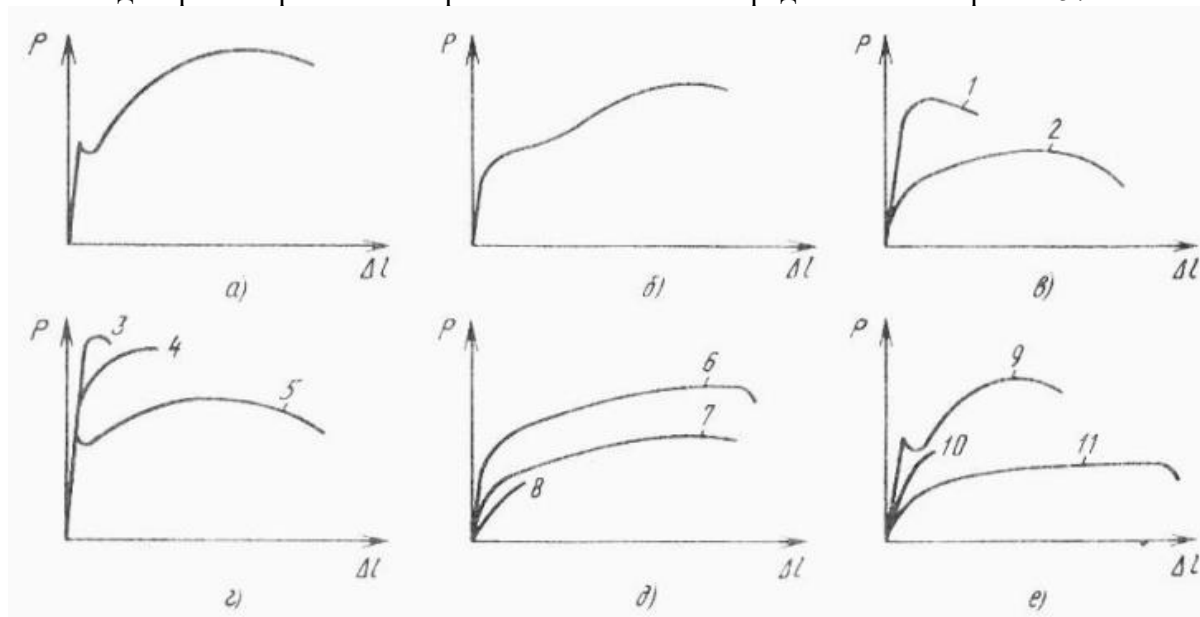


Рисунок 1.56 – Диаграмма условных напряжений низкоуглеродистой стали

Условные напряжения σ_T , σ_B и др. даются в справочниках (марочниках) для материалов в определенном состоянии (отожженном, нормализованном, закаленном) при комнатной температуре, а также, например, при повышенных температурах.

В дальнейшем при конструировании рассчитываются напряжения, возникающие в конструкциях и деталях и сравниваются с допустимыми для выбранного материала, которые берут из справочников.

Типовые диаграммы растяжения различных металлов представлены на рис. 1.57.



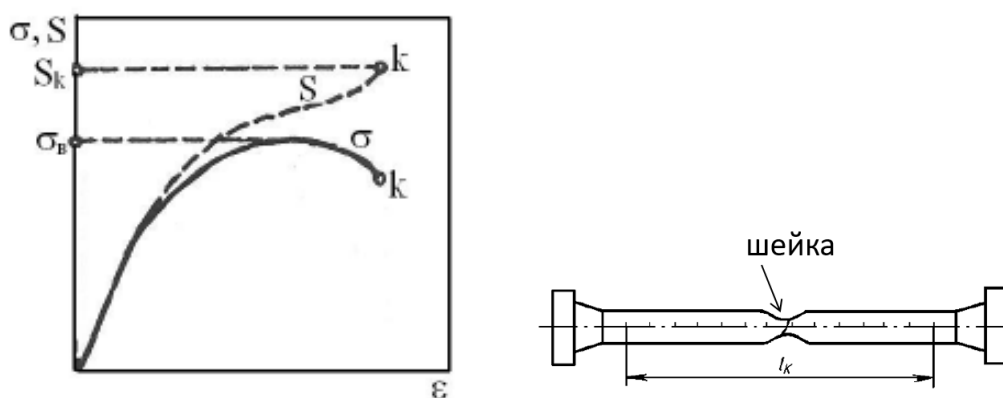
а – углеродистая сталь; б – аустенитная сталь; в – медь холоднодеформированная (1) и рекристаллизационная (2); г – углеродистая закаленная сталь (3), улучшенная (4) и отожженная (5); д – чугун с шаровидным графитом (6), с пластинчатым графитом (8), ферритный ковкий чугун (7); е – высокоуглеродистая сталь (9), серый чугун (10), алюминий (11)

Рисунок 1.57 – Типовые диаграммы растяжения различных металлов

На рисунке 1.57 можно увидеть различие в свойствах разных металлов, например, стали, чугуна и алюминия, а также различных состояний одного металла. Медь рекристаллизационная (отожженная) более пластичная (удлинение Δl больше) и менее прочная (нагрузка или сила P меньше), а холоднодеформированная медь более прочная и менее пластичная (рис. 1.57в). Такая же картина наблюдается и для стали (рис. 1.57г), т.е. углеродистая закаленная сталь более прочная и менее пластичная чем отожженная.

Анализируя диаграммы условных напряжений, можно видеть, что в большинстве случаев разрыв образца происходит не при максимальных напряжениях, т.е. пройдя пик (предел прочности) образец продолжает удлиняться и напряжения падают. Однако в действительности истинные напряжения продолжают увеличиваться до момента разрыва, а падение условных напряжений связано с тем, что при расчете напряжений прикладываемая нагрузка делится на площадь начального поперечного сечения образца.

Если для каждого текущего значения P_i на первичной кривой растяжения рассчитать значения условного (P_i/F_0) и истинного растягивающего напряжения (P_i/F_i), то можно построить графики зависимости условных и истинных напряжений от относительного удлинения $\delta = \Delta l/l_0$ (рис. 1.58).



σ – условные напряжения, S – истинные напряжения, ε – относительное удлинение

Рисунок 1.58 – Зависимость условных и истинных напряжений от относительного удлинения

Химический состав стали 45 приведен в табл. 1.5, а механические свойства в табл. 1.6.

Таблица 1.5 – Химический состав стали 45

Марка стали	Содержание элементов, %								
	C	Si	Mn	Cr	S	P	Ni	Cu	As
	не более								
Сталь 45	0,42-0,5	0,17-0,37	0,5-0,8	0,025	0,04	0,035	0,25	0,25	0,08

Таблица 1.6 – Механические свойства стали 45

Марка стали	Предел текучести σ_T , Н/мм ² (кгс/мм ²)	Временное сопротивление разрыву σ_B , Н/мм ² (кгс/мм ²)	Относительное удлинение δ , %	Ударная вязкость КСЧ, кДж/м ²	Относительное сужение площади поперечного сечения ψ , %
Сталь 45	355 (36)	600 (61)	16	5	40

$$\text{Н/мм}^2 = 10^6 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ МПа}$$

Изменение механических свойств углеродистых литейных сталей в зависимости от содержания углерода показано в табл. 1.7.

Таблица 1.7 – Химический состав и механические свойства углеродистой стали (содержание Mn в стали 15Л, 20Л 0,35-0,65, в остальных 0,5-0,8; содержание Si 0,17-0,37)

Марка стали	Содержание углерода, %	Механические свойства			
		σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
15Л	0,12-0,20	200	400	24	35
20Л	0,17-0,25	220	420	23	35
25Л	0,22-0,30	240	450	19	30
35Л	0,32-0,40	280	500	15	25
45Л	0,42-0,50	320	550	12	20
55Л	0,52-0,60	350	600	10	18

Как видно из таблицы 1.7 если углерода в стали больше, то прочностные свойства σ_B ее выше (зависимость сохраняется приблизительно до 1,0% C, свыше 1,1 % углерода при

дальнейшем его увеличении прочность стали постепенно падает, см. рис. 2.1), а пластические свойства δ и ψ ниже.

Механические свойства стали также различаются в зависимости от технологии ее производства и последующего режима термообработки (табл. 1.8).

Таблица 1.8 – Механические свойства стали 25Л

Состояние поставки, режим термообработки	Сечение, мм	$\sigma_{0,2}$ (МПа)	σ_B (МПа)	δ_5 (%)	ψ %	КСУ (Дж / см ²)
		не менее				
Нормализация 880-900 °С. Отпуск 610-630 °С	До 100	240	450	19	30	40
Закалка 870-890 °С, вода. Отпуск 610-630 °С		300	500	22	33	35
Нормализация 900 °С, воздух	До 400	305-315	520-530	21-23	27-	62-64
Нормализация 900 °С, воздух. Закалка 880 °С. Отпуск 580 °С		365	580	22	28-44	88

С уменьшением размера зерен (или субзерен) d увеличивается число барьеров на пути скользящих дислокаций и физический предел текучести возрастает в соответствии с соотношением Холла–Петча:

$$\sigma_T = \sigma_0 + k d^{-1/2},$$

где σ_0 и k – константы.

Точно так же влияет размер зерна на величину $\sigma_{0,2}$ (рис. 1.59).

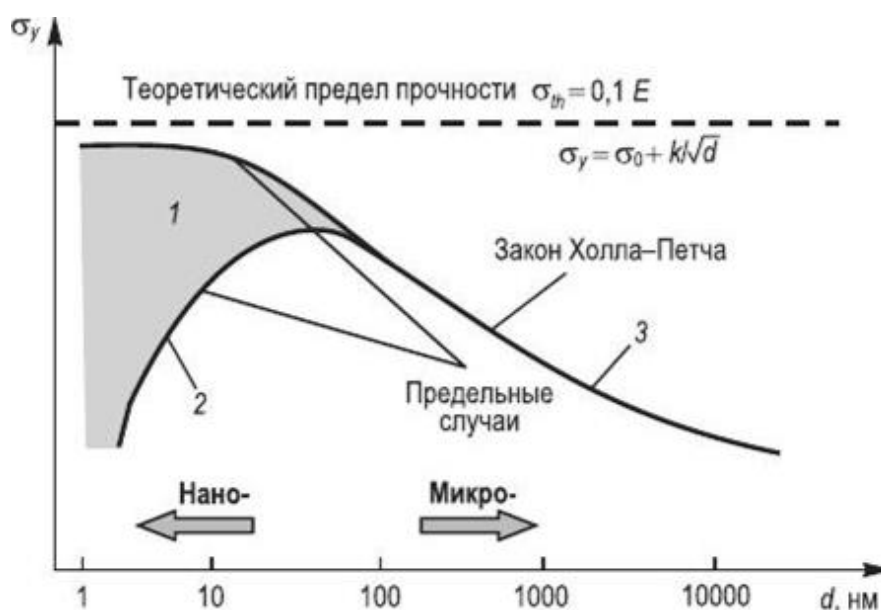


Рисунок 1.59 – Влияние размеров зерен и субзерен на прочность металлов

Прочностные свойства стали при повышенных температурах ухудшаются (табл. 1.9), что нужно учитывать при выборе материалов для работы в условиях повышенных температур.

Таблица 1.9 – Механические свойства стали 25Л при повышенных температурах

Температура испытаний, °С	$\sigma_{0,2}$ (МПа)	σ_B (МПа)	δ_5 (%)	ψ %	КСУ (Дж / см ²)
Отжиг 900 °С, охлаждение в печи					
20	205-255	420-480	22-33	37-51	54-108
100	195-225	400-450	15-27	36-46	88-127
200	165-195	360-420	16-28	40-58	98-157
300	155-195	370-450	14-26	34-43	88-137
400	155-195	340-450	15-28	30-60	68-98
500	125-160	225-295	26-34	60-75	54-83
600	80-120	110-160	24-36	59-73	59-117
Нормализация 900 °С, воздух. Отпуск 620-680 °С, воздух					
20	235-265	490	22-26	37-51	54-68
200	225	460	16-20	40-45	108-117
300	225	470	14-17	24-31	98-127
400	225	430	18-21	54-62	78
500	185	245	22	70	54
600	130	145	22-27	73	59

Диаграмма растяжения и сжатия пластичных материалов представлена на рис. 1.60.



Рисунок 1.60 – Диаграмма растяжения и сжатия пластичных материалов

При испытании на сжатие хрупкие материалы не образуют площадки текучести и разрушаются по достижении предела прочности (рис. 1.61, 1.62).

При испытании на сжатие пластичных материалов невозможно зафиксировать предел текучести и предел прочности. Предел текучести принимается равным условному.

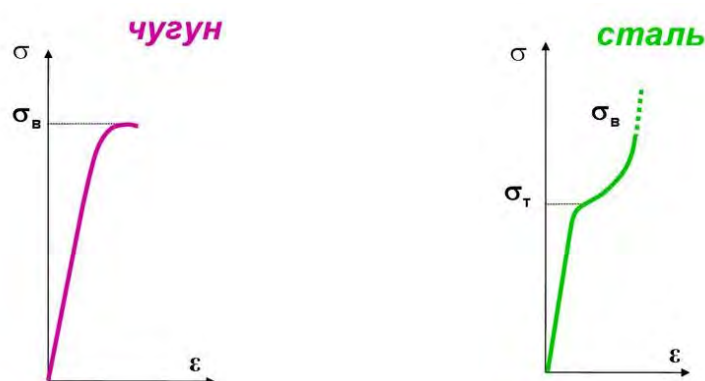


Рисунок 1.61 – Диаграммы сжатия хрупких и пластичных материалов



Рисунок 1.62 – Испытание на сжатие

При получении металлов литьем при равномерном теплоотводе от отливки материал получается изотропным (зерна ориентированы относительно беспорядочно). Пластическая деформация металла может приводить к его анизотропии, т.е. механические свойства при приложении силы по различным направлениям будут несколько отличаться. Некоторые анизотропные материалы (дерево, композиционные материалы с армирующими волокнами и др.) характеризуются сильным различием механических свойств вдоль и поперек волокон. Диаграммы сжатия изотропных хрупких (чугун) и пластичных (медь) материалов и диаграммы сжатия анизотропного материала (дерево) представлены на рис. 1.63. Многие композиционные материалы, армированные волокнами, также являются анизотропными материалами.

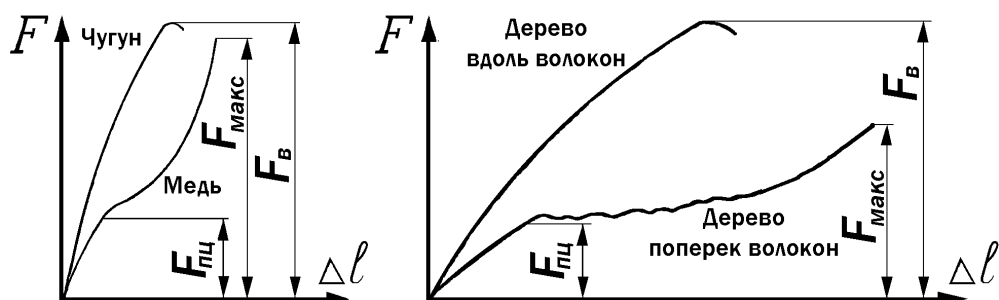


Рисунок 1.63 – Диаграммы сжатия изотропных хрупких (чугун) и пластичных (медь) материалов и диаграммы сжатия анизотропного материала (дерево)

ИСПЫТАНИЯ НА ИЗГИБ

При испытаниях на изгиб в образце возникают как растягивающие, так и сжимающие напряжения, поэтому изгиб более мягкий способ нагружения, чем растяжение.

На изгиб испытывают малопластичные материалы с высокой твердостью: чугуны, инструментальные стали, стали после поверхностного упрочнения, керамику. Схема испытания на изгиб представлена на рис. 1.64.

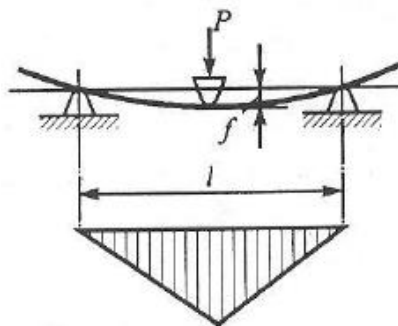


Рисунок 1.64 – Схема испытания на изгиб

ИСПЫТАНИЯ НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ

Ударная вязкость (обозначается символом KC) – это работа удара, отнесенная к начальной площади поперечного сечения образца в месте расположения концентратора.

$$KC = \frac{A}{F_0},$$

где A – энергия удара, Дж;

F_0 – начальная площадь поперечного сечения в месте расположения концентратора, см^2 . Наиболее распространенные образцы для испытаний имеют форму стержня длиной 55 мм с квадратным сечением 10x10 мм. В соответствии с формой нанесенного посередине надреза – концентратора напряжений – образцы подразделяют на три типа: U, V и T (рис. 1.65).

Образцы с концентраторами типа V используют при испытаниях материалов для конструкций повышенной степени надежности (летательные аппараты, трубопроводы и пр.), с концентраторами типа T – при испытании материалов особо ответственных конструкций, для которых первостепенное значение имеет сопротивление развитию трещины.

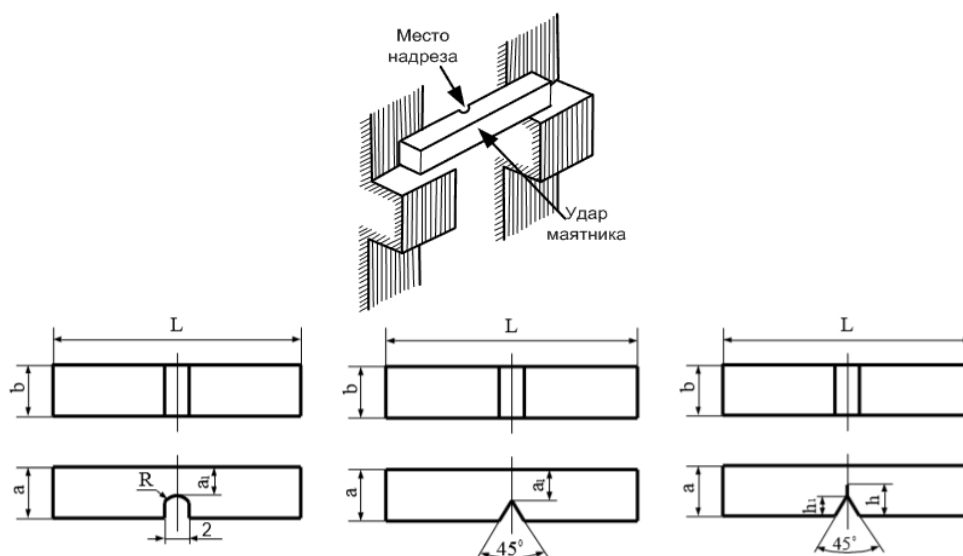


Рисунок 1.65 – Схема испытания на ударную вязкость и виды образцов

Испытания на ударную вязкость проводят на маятниковом копре при ударе маятника по образцу со стороны, противоположной концентратору напряжения (рис. 1.66). Энергию, затрачиваемую на деформацию и разрушение образца, называют работой удара и обозначают символом K с указанием вида концентратора (KU , KV , KT).

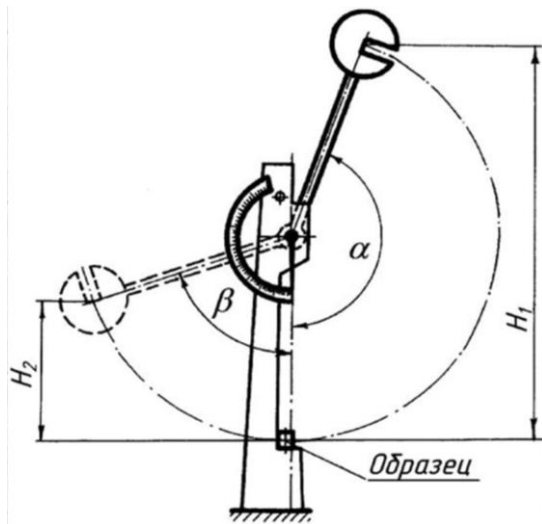
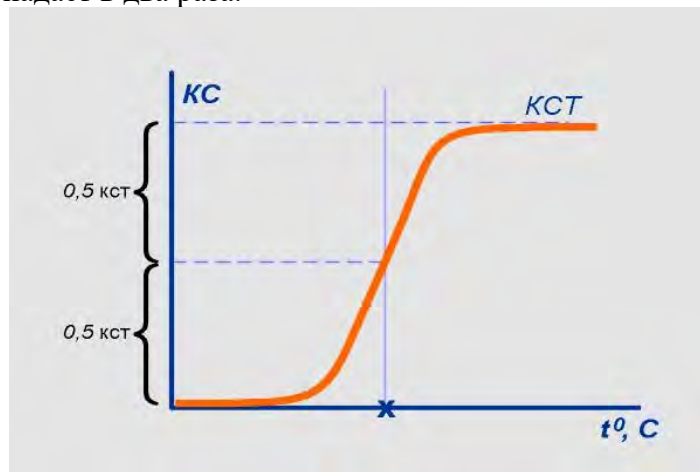


Рисунок 1.66 – Схема испытаний на маятничковом копре и современный вариант копра для испытаний

Порог хладноломкости – условный температурный интервал перехода от вязкого разрушения металла к хрупкому. Порог хладноломкости характеризуется, как правило, двумя температурами: T_v , выше которой излом полностью вязкий, и T_H , ниже которой излом полностью хрупкий.

Порог хладноломкости также может характеризоваться по 50% вязкой составляющей в изломе t_{50} . Рисунок 1.67 иллюстрирует температурный порог хладноломкости, когда значение ударной вязкости падает в два раза.



знаком «х» отмечен температурный порог хладноломкости

Рисунок 1.67 – Иллюстрация температурного порога хладноломкости

Детали, работающие в реальных условиях эксплуатации на срез, также испытывают по схеме на срез (рис. 1.68).

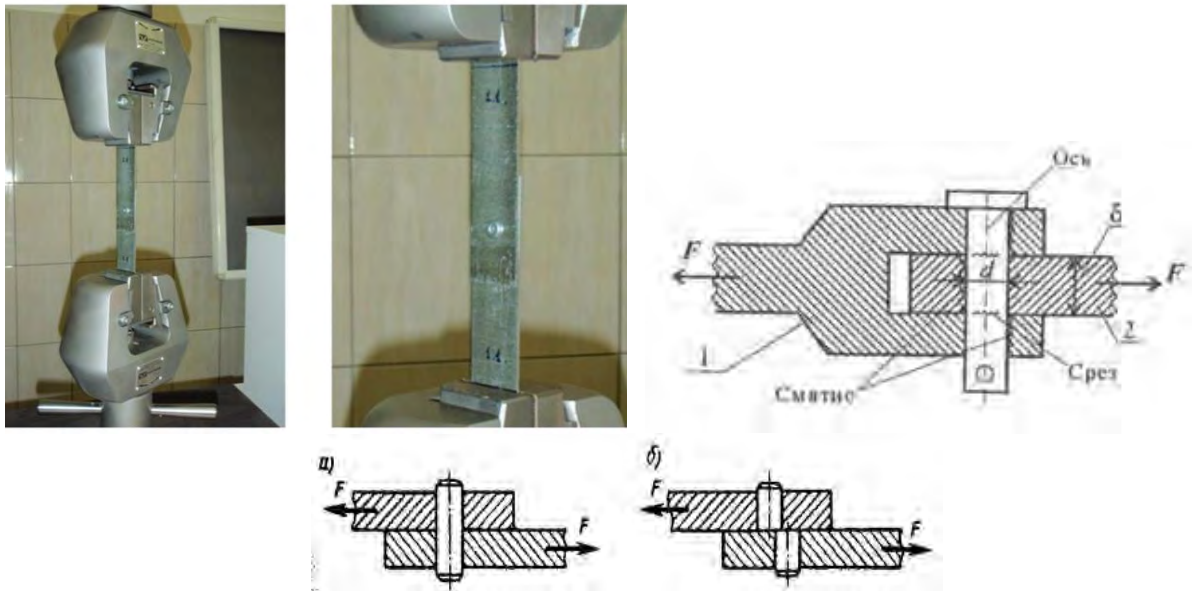


Рисунок 1.68 – Испытания на срез

Детали испытывающие знакопеременные нагрузки проходят циклические испытания на усталость (рис. 1.69).

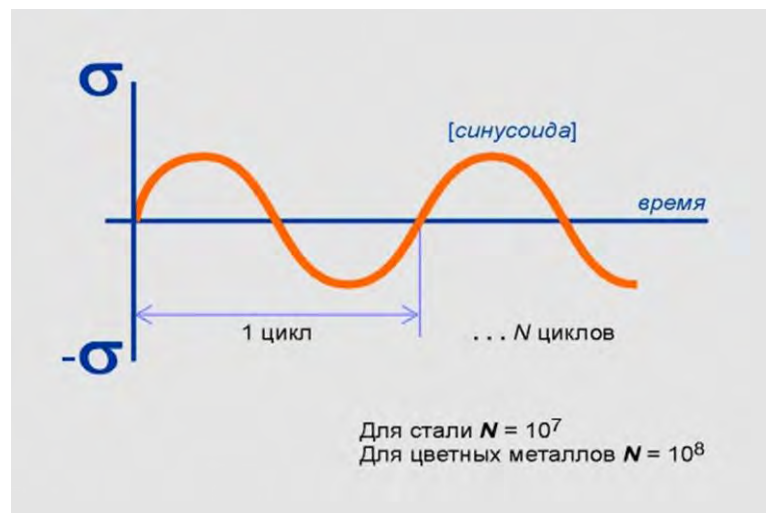


Рисунок 1.69 – Циклические испытания на усталость

Предел усталости (предел выносливости) – максимальное напряжение σ_r (σ_{-1}), при котором образец не разрушается при любом числе циклов нагружения N . Для черных металлов существует физический предел усталости. При этом кривая усталости имеет асимптоту (рис. 1.70).

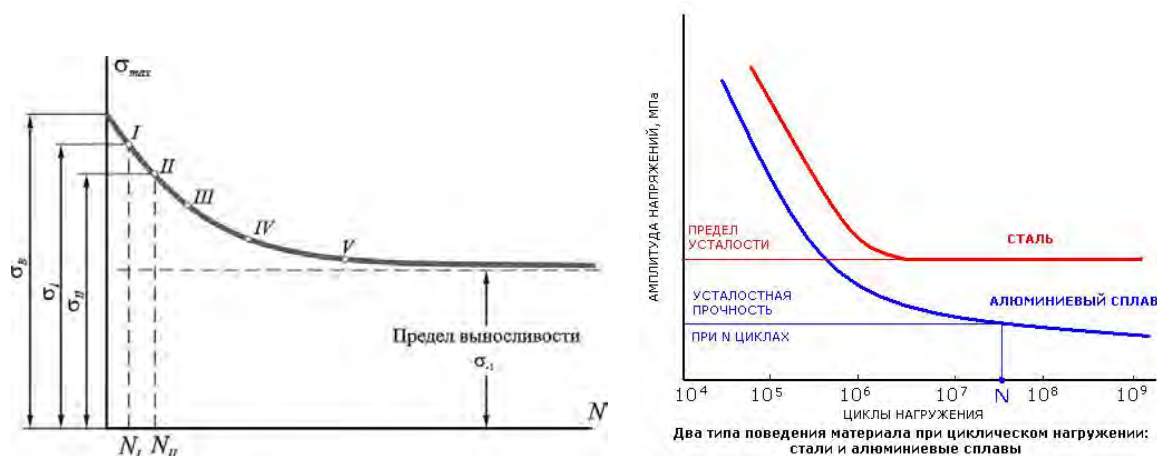


Рисунок 1.70 – Кривые усталости материалов

Для цветных металлов кривая усталости не выходит на асимптоту (рис. 1.70). Для них определяют условный предел усталости – напряжение σ_r , при котором образец выдерживает заданное число циклов нагружения, например $N=10^8$.

Существует корреляция между пределом прочности σ_b и пределом усталости σ_r :

- для сталей: $\sigma_r = (0,4-0,5) \cdot \sigma_b$
- для цветных металлов: $\sigma_r = (0,25-0,5) \cdot \sigma_b$

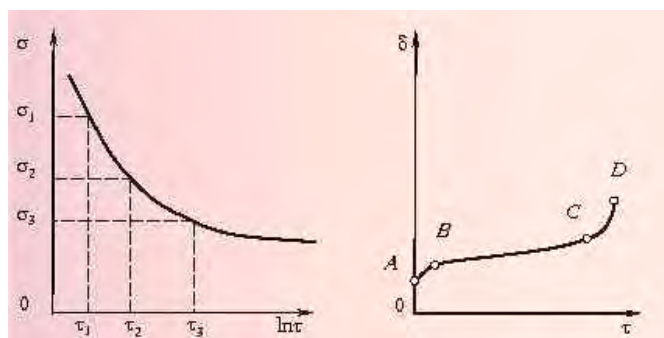
Испытание на ползучесть.

Ползучестью называют способность стали (и других материалов) медленно, непрерывно, пластически деформироваться под действием постоянной нагрузки при высоких температурах. Испытания на ползучесть проводят в специальных электропечах, где образец выдерживают длительное время при определенной температуре под действием постоянной нагрузки (рис. 1.71). Время испытания обычно составляет 2000 – 3000 ч, но может быть и больше.



Рисунок 1.71 – Испытания на ползучесть

Диаграммы длительной прочности и ползучести (относительное удлинение образца от времени) представлены на рис. 1.72.



σ – напряжения, δ – относительное удлинение, τ – время
Рисунок 1.72 – Диаграммы длительной прочности и ползучести

Тема 1.4. Кристаллизация. Поликристаллы, монокристаллы, аморфные материалы и наноматериалы

Любое вещество может находиться в трех агрегатных состояниях:

- твердом,
- жидком,
- газообразном.

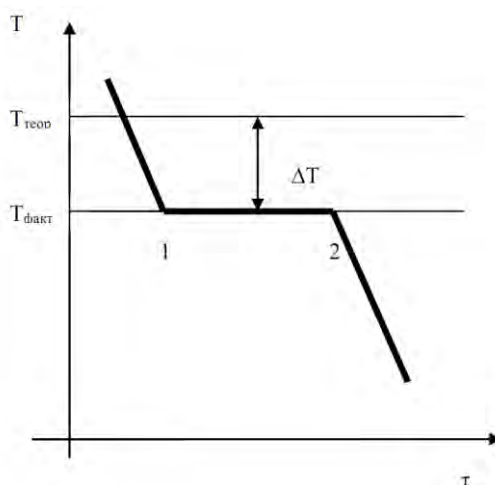
Кристаллизация – это процесс образования участков кристаллической решетки в жидкой фазе и рост кристаллов из образовавшихся центров.

Кристаллизация металлов состоит из 2-х этапов: первичной и вторичной.

Первичная кристаллизация

Первичная кристаллизация – это переход металла из жидкого в твердое состояние с образованием кристаллической структуры.

Чистые металлы имеют справочные значения температур кристаллизации, полученные при очень медленном теплоотводе (охлаждении). На кривых охлаждения (время-температура) наблюдается полка, соответствующая теоретической температуре. В реальных условиях охлаждения часто наблюдается переохлаждение металла перед кристаллизацией, а фактическая температура кристаллизации оказывается ниже (рис. 1.73). Отметим, что при быстром нагреве будет наблюдаться аналогичная картина, сопровождающаяся перегревом.



$T_{\text{теор}}$ – теоретическая температура кристаллизации; $T_{\text{факт}}$ – фактическая температура кристаллизации; ΔT – степень переохлаждения.

Рисунок 1.73 – Кривая охлаждения чистого металла

До точки 1 охлаждается металл находится в жидком состоянии, процесс сопровождается плавным понижением температуры. На участке 1 – 2 идет процесс кристаллизации, сопровождающийся выделением тепла, которое называется *скрытой теплотой кристаллизации*. Оно компенсирует рассеивание теплоты в пространство, и поэтому температура остается постоянной. После окончания кристаллизации в точке 2 температура снова начинает снижаться, металл охлаждается в твердом состоянии.

Как впервые установил Д.К. Чернов (1839–1921 гг.), процесс кристаллизации складывается из двух одновременно протекающих стадий: образования центров кристаллизации (зародышей) и роста кристаллов вокруг этих центров (рис. 1.74). Сначала каждый кристаллик в жидкости растет свободно, сохраняя правильную форму, но постепенно увеличиваясь, кристаллы начинают соприкасаться друг с другом, и правильная форма нарушается. Образовавшиеся таким образом кристаллы, напоминающие по форме зерна, называются *кристаллитами* или *зернами*. Чем больше центров кристаллизации и меньше скорость их роста, тем мельче получаются зерна. Размер зерен металла сказывается на механических свойствах металла: чем мельче зерна, тем выше прочность и особенно вязкость металла.

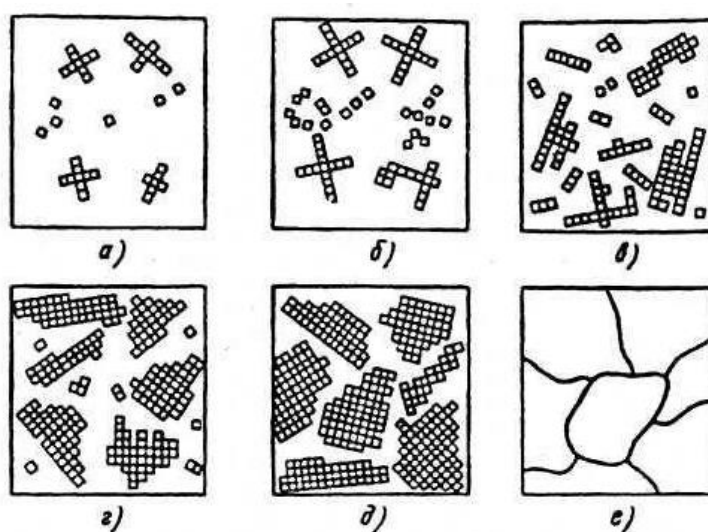


Рисунок 1.74 – Последовательные этапы процесса кристаллизации металла

Вторичная кристаллизация – образование новых кристаллов в твердом кристаллическом веществе. Кристаллы могут зарождаться самопроизвольно или расти на имеющихся готовых центрах кристаллизации (несамопроизвольная кристаллизация).

Как и при кристаллизации из жидкой фазы, чтобы полиморфное превращение протекало, нужно некоторое переохлаждение (или перегрев) относительно равновесной температуры. Полиморфные превращения в железе на уровне отдельной атомной решетки представлены на рис. 1.75.

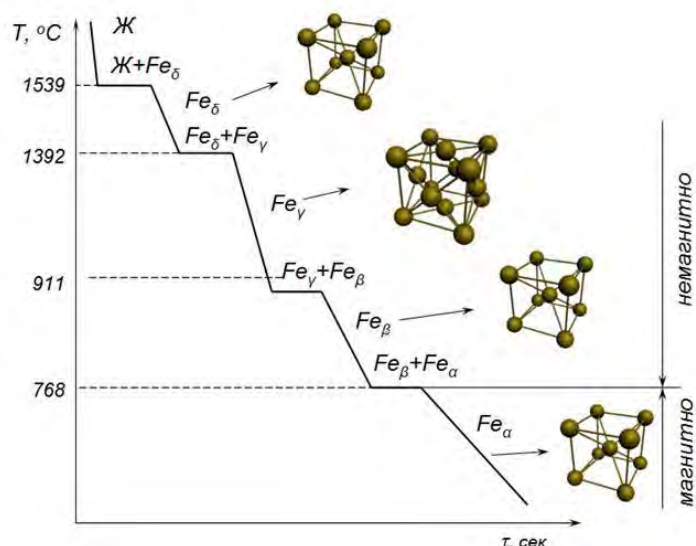


Рисунок 1.75 – Полиморфные превращения (перекристаллизация) в железе

Влияние степени переохлаждения на скорость зарождения (СЗ) и скорость роста (СР) кристаллов и соответственно размер зерна представлено на рис. 1.76.

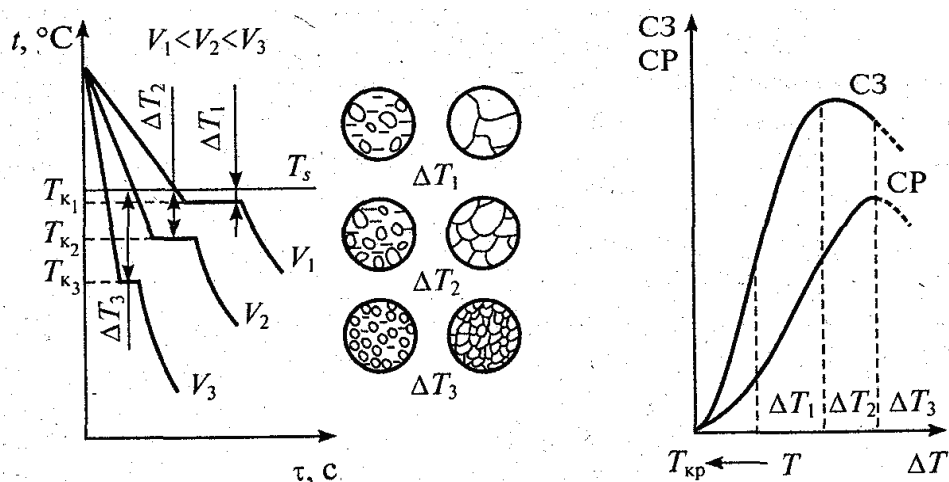


Рисунок 1.76 – Влияние степени переохлаждения на скорость зарождения (СЗ) и скорость роста (СР) кристаллов и соответственно размер зерна

Наличие интенсивного теплоотвода через стенки формы способствует увеличению степени переохлаждения. **Металлические формы охлаждают металл более интенсивно, чем песчано-глинистые и керамические. Наибольшая скорость достигается в водоохлаждаемых медных кристаллизаторах.**

Как правило для готовых изделий стремятся к получению мелкозернистой структуры. Оптимальными условиями для этого являются: максимальное число центров кристаллизации и малая скорость роста кристаллов.

Размер зерен при кристаллизации зависит и от числа частичек нерастворимых примесей, которые играют роль готовых центров кристаллизации – оксиды, нитриды, сульфиды.

Чем больше частичек, тем мельче зерна закристаллизовавшегося металла.

Ряд механических свойств металлов, таких как прочность, пластичность, выносливость, ударная вязкость тем выше, чем меньше размер зерен. Поэтому в практике изготовления отливок, особенно если они не подвергаются дальнейшей обработке давлением, применяют **модифицирование** – введение в расплав специальных добавок, которые, не изменяя

химического состава, создают дополнительные центры кристаллизации, тем самым способствуя измельчению структуры.

По механизму воздействия различают:

1) вещества, не растворяющиеся в жидком металле – выступают в качестве дополнительных центров кристаллизации.

2) поверхностно - активные вещества (ПАВ), которые растворяются в металле, и, осаждаясь на поверхности растущих кристаллов, препятствуют их росту.

Крупнозернистая структура кристаллов образуется при весьма медленном охлаждении преимущественно чистых металлов. В производственных условиях в процессе кристаллизации сплавов обычно образуются древовидные кристаллы-дендриты («дендрон» по-гречески дерево). Первоначально образуются длинные ветви – оси первого порядка, затем одновременное удлинением этих осей перпендикулярно к ним растут оси второго порядка; на осях второго порядка зарождаются оси третьего порядка и т.д. (рис. 1.77). В последнюю очередь затвердевает металл в междендритном пространстве.



Рисунок 1.77 – Дендритный способ кристаллизации

Строение металлического слитка. Выплавленный жидкий металл, затвердевая в специальной форме (изложнице), образует слиток (1.78).



Рисунок 1.78 – Затвердевание слитков в изложницах и их извлечение из изложниц

Изложницы изготавливают из чугуна. Затвердевание металла начинается у мест, от которых отводится тепло – у стенок, дна и с поверхности, а затем переходит на внутренние зоны слитка. В разных зонах объема металла скорость охлаждения неодинакова. Еще Д.К. Чернов в 1878 г. указал на наличие в слитке трех зон: 1-зоны мелких зерен, образовавшихся у поверхности слитка в результате очень быстрого охлаждения; 2-зоны крупных столбчатых кристаллов, вытянутых в направлении отвода тепла, т.е. перпендикулярно к стенке изложницы; 3-зоны различно ориентированных кристаллов, образовавшихся тогда, когда изложница нагрелась и направленный отвод тепла отсутствует (рис. 1.79). Столбчатые кристаллы (дендриты) нежелательны, так как они не обеспечивают высокой прочности, в том числе и потому, что в местах их соединения концентрируются пустоты и неметаллические включения.

При переходе из жидкого состояния в твердое происходит сокращение объема металла, называемое *усадкой*. В результате усадки в слитке образуется воронкообразная пустота – усадочная раковина, под которой находится зона усадочной рыхлости, т.е. место концентрации мелких усадочных раковин. Верхнюю часть слитка, в которой расположены усадочная раковина, зоны концентрированной рыхлости, как дефектную отделяют от качественной части слитка. Дефектная часть составляет 15–25% массы слитка. **Так как усадка связана с физическим процессом изменения объема, то избавиться от раковины сверху слитка невозможно, однако условиями охлаждения в верхней части слитка можно изменить форму усадочной раковины сделав ее менее глубокой, что позволяет отрезать меньше дефектного металла.**



Рисунок 1.79 – Схема строения металлического слитка

Подобная структура образуется и при получении крупных отливок в литейном производстве.

Отметим, что представленный выше способ получения металлических слитков в металлургическом производстве в настоящее время применяется все реже и реже. Вместо него используют непрерывную разливку заготовок (рис. 1.80). Металл подается в специальную изложницу из меди (для хорошего теплоотвода) без дна (дно формируют вначале разливки затравкой, вводимой снизу), далее слиток начинают вытягивать и после отделения затравки движение слитка осуществляется непрерывно при помощи роликов. В кристаллизаторе металл полностью не затвердевает, там формируется только стальная твердая оболочка (корка), а внутри находится жидкий металл, который кристаллизуется постепенно по мере движения слитка (охлаждение осуществляется в основном за счет подачи на поверхность заготовки воды с воздухом форсунками и за счет излучения и конвекции с поверхности). Так

как заготовка непрерывная, то ее разрезают на мерные длины в зависимости от размеров сечения и технологии прокатки. Например, заготовка сечением 250x300 мм имеет длину 7 метров, сечением 120x120 мм – 12 метров и др. Данный способ разливки позволяет повысить производительность разливки и качество слитков, получить экономию энергии и самого материала.



Рисунок 1.80 – Непрерывная разливка стали (4 ручья)

Условия кристаллизации металла отливок в литейном производстве также значительно различаются: отливки больших размеров в песчано-глинистых формах затвердевают очень медленно, так как в них находится большой запас энергии (кроме высокой температуры металла большую роль играет скрытая теплота кристаллизации, которая выделяется при затвердевании, при этом отношение площади поверхности отливки через которую идет теплообмен с формой и окружающей средой к ее массе меньше для крупных отливок, так как объем увеличивается в кубе, а площадь в квадрате при увеличении размеров отливок). Отливки небольших размеров охлаждаются и затвердевают быстрее, чем крупные, но и в этом случае отливки одинакового размера будут охлаждаться быстрее в металлических формах (в кокилях), чем в песчано-глинистых. При этом в структуре металла при более быстром охлаждении будет наблюдаться более мелкое зерно.

Как уже было сказано ранее размер зерна оценивают, сравнивая с эталонным изображением при определенном увеличении микроскопа, получая значения в баллах (рис. 1.81). При увеличении скорости охлаждения величина зерна уменьшается, а металл при этом имеет более высокие механические свойства.

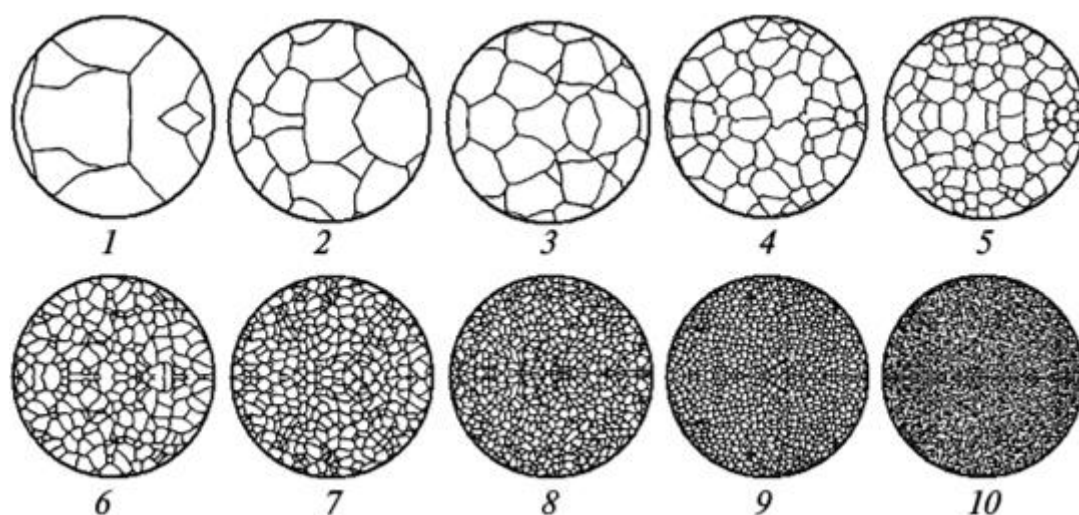


Рисунок 1.81 – Величина зерна

Рассмотрим предельные случаи по условиям охлаждения.

Если иметь только один центр кристаллизации и создать такие условия кристаллизации, чтобы перед фронтом кристаллизации не создавалось переохлаждение, которое могло бы привести к образованию зародышей новых кристаллов, можно получить монокристаллический слиток. На рис. 1.82 представлена иллюстрация метода Чохральского широко применяемого для получения монокристаллического кремния.

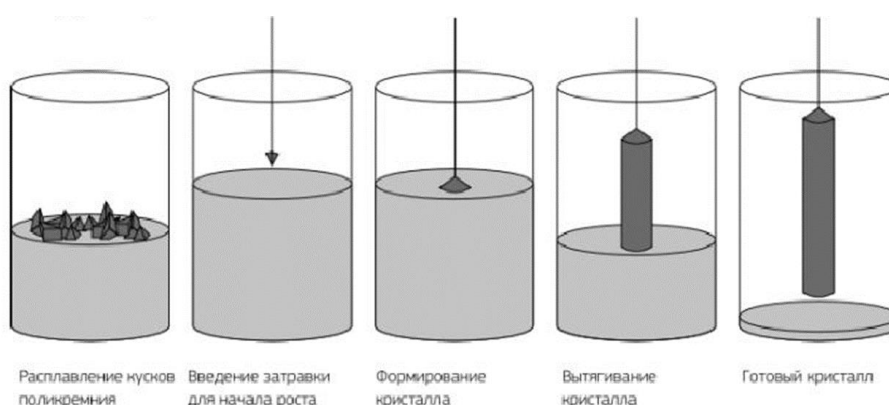


Рисунок 1.82 – Получение монокристалла кремния по методу Чохральского

Материалы имеют поликристаллическую структуру после их получения традиционными методами с относительно небольшими скоростями охлаждения. Однако можно получить аморфные (некристаллические) материалы, если в результате очень быстрого охлаждения полностью предотвращена кристаллизация расплава. Такие материалы также называют стекловидными. Ранее была рассмотрено влияние скорости зарождения центров кристаллизации и скорости роста кристаллов, которые зависят от степени переохлаждения на размер зерна, но если степень переохлаждения увеличивать дальше, то при определенном значении скорость зарождения центров кристаллизации станет равной нулю (рис. 1.83).

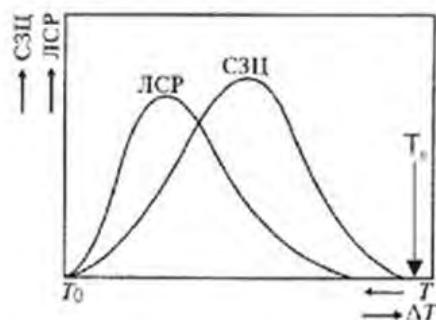


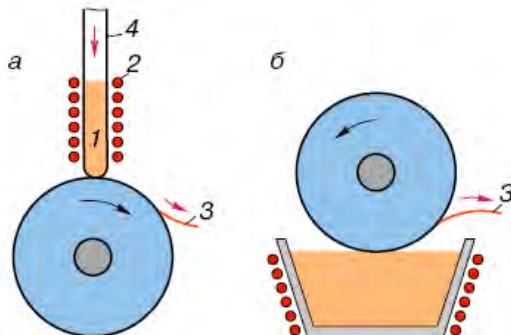
Рисунок 1.83 – Зависимость скорости зарождения центров кристаллизации (СЗЦ) и линейной скорости роста (ЛСР) кристаллов от степени переохлаждения ΔT

Величина степени реально достигаемого переохлаждения или перегрева зависит от природы металла. Она увеличивается с повышением его чистоты и скорости охлаждения. В обычных производственных условиях степень переохлаждения металлов при кристаллизации колеблется от 10 до 30°C; при больших скоростях охлаждения она может достигать сотен градусов. Чем больше скорость охлаждения, тем ниже температура, до которой может быть переохлажден жидкий металл до конца кристаллизации. Это имеет не только теоретическое обоснование, но и используется на практике. Оказалось, что с использованием специального оборудования можно достичь очень больших скоростей охлаждения ($10^6 - 10^9$ °C/с), при которых жидкий металл может быть переохлажден до твердого состояния практически без его кристаллизации. В результате металл оказывается в аморфном, или стеклообразном состоянии с необыкновенными механическими (например, сочетание высокой прочности и твердости с высокой пластичностью, высокая усталостная прочность и др.) и физическими или химическими свойствами (например, коррозионная стойкость, улучшенные магнитные характеристики сплавов и др.). Однако возможное широкое применение их в промышленности затруднено как нестабильностью характеристик при термических воздействиях (вплоть до потери аморфного состояния) и во времени, так и сложностью получения.

Сверхвысокие скорости охлаждения для получения аморфной структуры можно реализовать различными способами:

- распылением струи газом или жидкостью;
- центрифугированием капель или струи;
- нанесением расплава или извлечением расплава с использованием вращающихся дисков (рис. 1.84);
- сверхбыстрым охлаждением из газовой среды и др.

Этими способами можно получать ленту, проволоку или порошки.



а — нанесение расплава на вращающийся металлический диск или цилиндр; б — извлечение расплава вращающимся диском;

1 — расплав; 2 — нагревательное устройство; 3 — лента аморфного сплава; 4 — кварцевая трубка

Рисунок 1.84 – Схемы устройств для получения аморфных сплавов

Получено большое число аморфных сплавов на основе железа, никеля, титана, меди и других металлов, как правило, с аморфизирующими добавками (P, Si, B, C). В промышленности аморфные сплавы получили применение для изготовления магнитных головок записи, высокочастотных преобразователей, термодатчиков, магнитных фильтров, в качестве коррозионностойких деталей, для упрочнения режущих инструментов. Аморфные сплавы недостаточно термостабильны. При нагреве до температур 450...500 °С (редко до 600...700 °С) они начинают кристаллизоваться и свойства их начинают снижаться.

Другая группа металлических сплавов, близких по способу получения (закалкой из жидкого состояния) получила название микрокристаллических. Размер зерна в микрокристаллических сплавах составляет всего 10...30 нм. Как правило, получение таких сплавов вызвано необходимостью повышения пластичности.

Как было отмечено, ранее (закон Холла-Петча и др.) измельчение размеров зерен вплоть до наноуровня повышает механические характеристики материала. Оказалось, что многие свойства материала существенно изменяются для объектов, размеры элементов которых находятся в нанодиапазоне.

Понятие о наноматериалах и способах их получения

К наноматериалам относят объекты, один из характерных размеров которых лежит в интервале от 1 до 100 нм. Многие свойства наноматериалов существенно отличаются обычно в лучшую сторону от неструктурированных на наноуровне материалов.

Способы получения наноматериалов можно разделить на две группы:

- «сборка из атомов» («снизу-вверх» или «bottom-up»)
- «диспергирование макроскопических материалов» («сверху-вниз» или «up-bottom»).

На рисунке 1.85 представлена общая характеристика методов получения наноматериалов «снизу-вверх».

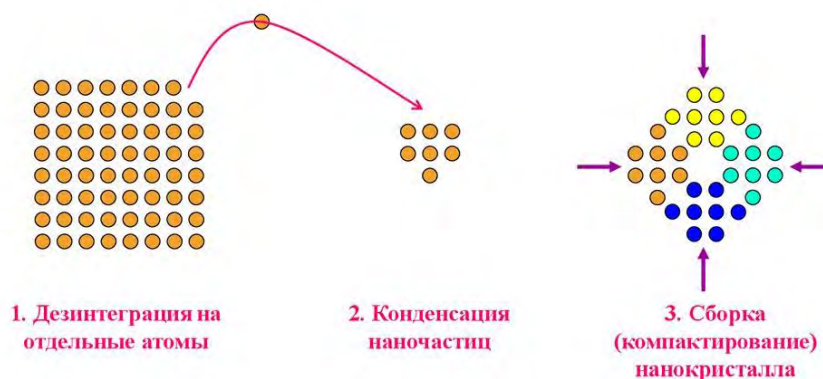


Рисунок 1.85 – Методы получения наноматериалов «снизу-вверх»

Дезинтеграция на отдельные атомы производится путем электродугового или лазерного испарения, магнетронного распыления, растворения и т.д.

Возможными недостатками методов (рис. 1.85) является пористость, загрязнения и большие энергозатраты.

На рисунке 1.86 представлена общая характеристика методов получения наноматериалов «сверху-вниз».

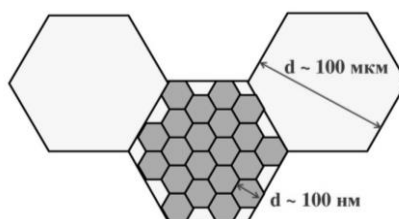


Рисунок 1.86 – Методы получения наноматериалов «сверху-вниз»

Деление зерен на субзерна наноразмеров производится например путем интенсивной пластической деформации (ИПД). Также применяются методы механического помола, ударного распыления расплава и др.

Наноматериалы могут применяться как в наноизделиях, микроизделиях, так и в массивных изделиях. Массивные наноматериалы могут быть однофазными и многофазными. Также применяются композиты с наноматериалами.

Тема 1.5. Диаграммы состояния: построение, фазы, виды диаграмм 1, 2, 3, 4 рода

Сплав – макроскопически однородный металлический материал, состоящий из двух или большего числа химических элементов с преобладанием металлических компонентов. Сплав – это многокомпонентная система.

Компоненты – вещества, образующие систему.

Фаза – однородная, обособленная часть металла или сплава, имеющая одинаковые состав, строение и свойства отделенная от других частей границей раздела.

Микроструктура может быть многофазная (гетерогенная, неоднородная) и однофазная (гомогенная, однородная).

Число степеней свободы системы (С) определяется по следующей формуле (правило фаз Гиббса)

$$C = K - \Phi + 2$$

Если давление постоянно, то формула выглядит следующим образом:

$$C = K - \Phi + 1$$

где С – число степеней свободы (вариантность) системы - число внешних и внутренних факторов (температура, давление и концентрация), которое можно изменять без изменения числа фаз;

К – число компонентов;

Φ – количество фаз;

1 – число переменных.

Критическими точками сплава называют значения температур, при которых происходят фазовые превращения.

При $C = 0$ фазовое превращение происходит изотермически, то есть при постоянной температуре. На кривой охлаждения возникает горизонтальная площадка.

При $C \neq 0$ фазовое превращение происходит в интервале температур. На кривой охлаждения наблюдается точка перегиба.

В сплавах могут образовываться следующие фазы:

- Жидкие растворы
- Твердые растворы
- Химические соединения

Твердый раствор – это фаза, в которой сохраняется решетка одного из компонентов сплава (растворителя), а атомы другого компонента (или компонентов) размещаются в этой кристаллической решетке.

Твёрдые растворы обозначают буквами α, β, γ

В зависимости от расположения атомов в кристаллической решетке различают следующие твердые растворы:

- твердые растворы **замещения**
- твердые растворы **внедрения**
- твердые растворы **вычитания**

При образовании **твёрдого раствора замещения** (например: Cu-Ni, Fe-Cr, Fe-Al) атомы растворенного компонента замещают часть атомов растворителя в его кристаллической решетке (рис. 1.87).

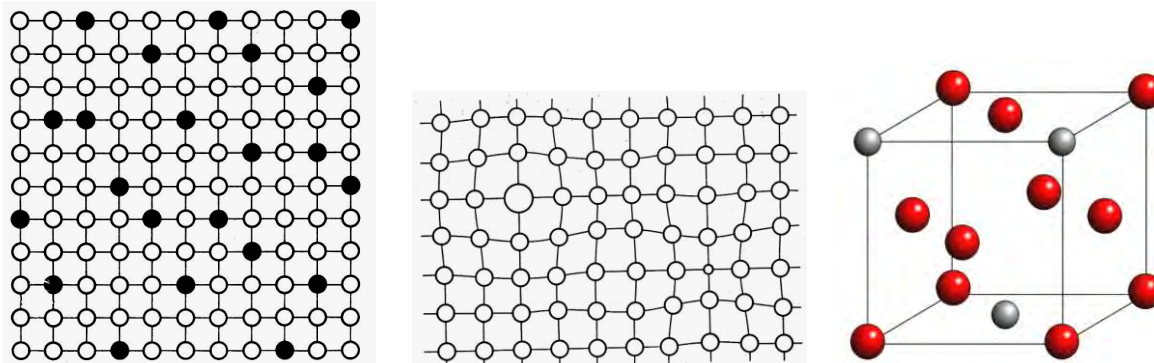


Рисунок 1.87 – Условные изображения твердых растворов замещения

В **твердых растворах внедрения** (например: Fe-C, Fe-H) атомы растворенного компонента размещаются в междоузлиях (пустотах) кристаллической решетки растворителя (рис. 1.88).

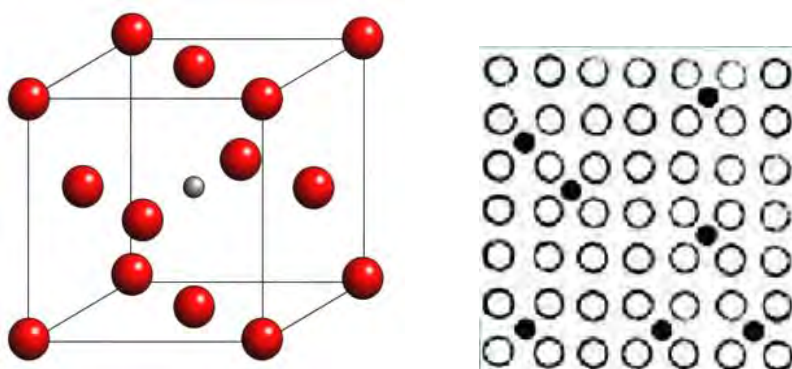


Рисунок 1.88 – Условные изображения твердых растворов внедрения

Упорядоченные твердые растворы (сверхструктуры) являются промежуточными фазами между твердыми растворами и химическими соединениями (рис. 1.89). Упорядоченные растворы образуют, например, Cu-Au, Fe-Si, Ni-Mn.

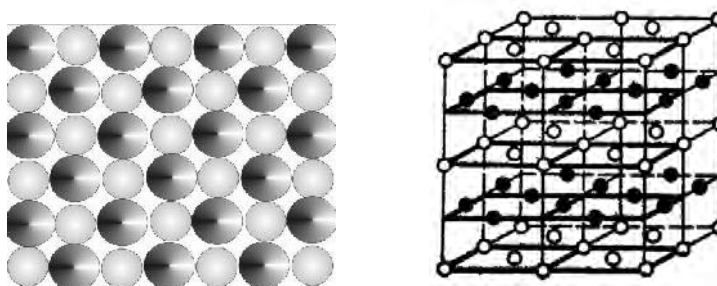


Рисунок 1.89 – Условные изображения упорядоченных твердых растворов

Твердый раствор вычитания возникает, если между компонентами сплава происходит химическое взаимодействие, а один из компонентов находится в недостаточном количестве. Тогда часть его мест в кристаллической решетке остается вакантными – как бы вычитенными.

Условия образования твердых растворов замещения с неограниченной растворимостью:

- 1) Одинаковый тип кристаллической решетки компонентов (изоморфизм)
- 2) Атомы компонентов близки по размерам (разница $\leq 10-15\%$)

Примеры:

Ag-Au, Ni-Cu, Mo-W, V-Ti и др.

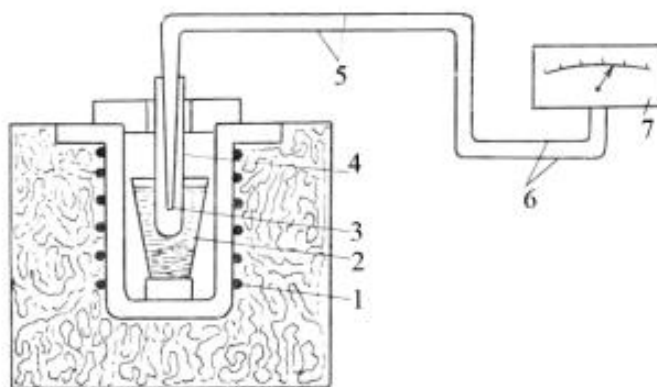
Механическая смесь - это сплав, состоящий из двух или нескольких веществ (компонентов), которые химически не взаимодействуют между собой и не растворяются друг в друге.

Диаграммы фазового равновесия

Диаграмма состояния показывает изменение состояния в зависимости от температуры и концентрации (давление постоянно для всех рассматриваемых случаев). Каждая точка на диаграмме состояния показывает состояние сплава данной концентрации при данной температуре.

Построение диаграмм состояния осуществляют экспериментально. Для построения диаграмм состояния пользуются результатами термического анализа: строят кривые охлаждения и по остановкам и перегибам на этих кривых, определяют температуры фазовых превращений, которые сопровождаются выделением теплоты при охлаждении (или ее поглощением при нагреве). Линиями соединяют точки аналогичных превращений.

Метод осуществляют следующим образом. Отбирают несколько сплавов данной системы с различным соотношением компонентов, входящих в их состав (от 0 до 100 %). Эти сплавы помещают в огнеупорные тигли 2 и нагревают в печи 1. После расплавления сплавов тигли медленно охлаждают и фиксируют с помощью термопары 3, 5 по показаниям прибора 7 температуру в конкретные моменты времени при охлаждении (рис. 1.89а).



1 – печь, 2 – тигель; 3 – горячий спай термопары; 4 – чехол термопары; 5 – холодные концы термопары; 6 – компенсационные провода; 7 – гальванометр
Рисунок 1.89а – Схема проведения метода термического анализа

По полученным данным строят кривые охлаждения в координатах «время-температура» (рис. 3.2, б). Если в сплаве при охлаждении происходят фазовые превращения, на кривой появляются горизонтальные (изотермические) участки или перегибы. Их длина тем больше, чем больше скрытая теплота превращения, масса вещества и меньше скорость охлаждения. Зафиксировать нужно температуры при которых появляются горизонтальные площадки или перегибы.

Вид диаграммы состояния определяется типом взаимодействия компонентов сплава.

I. Диаграмма состояния для сплавов, образующих механические смеси из чистых компонентов (1 рода)

Механическая смесь кристаллов возникает если компоненты не могут растворяться друг в друге и не вступают в химическую реакцию.

Компоненты: вещества А и В ($K=2$).

Фазы: жидкость Ж, кристаллы А и кристаллы В (максимальное значение $\Phi=3$).

Эвтектика – механическая смесь двух (или более) видов кристаллов, одновременно закристаллизовавшихся из жидкости.

Диаграмма состояния (с эвтектикой) для сплавов, образующих механические смеси представлена на рис. 1.90.

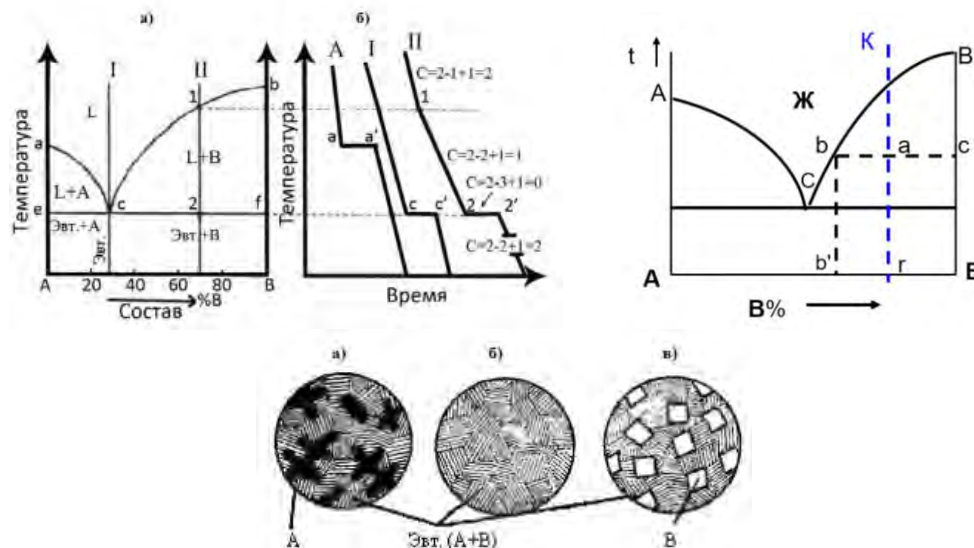


Рисунок 1.90 – Диаграмма состояния (с эвтектикой) для сплавов, образующих механические смеси с кривыми охлаждения и микроструктурами эвтектического, доэвтектического и заэвтектического сплавов

Ликвидус – линия температур начала кристаллизации всех сплавов системы (линия ACB на рис. 1.90).

Солидус – линия температур окончания кристаллизации всех сплавов системы.

Конода – линия, соединяющая составы фаз, находящихся в равновесии (b-c).

Правило отрезков

В сплаве K: $r\%$ В и $(100 - r)\%$ А. АВ – все количество сплава;

rA – количество В; rB – количество А в сплаве K.

В точке **a**: Ж + В; Ж имеет концентрацию b.

Ж содержит $b'\%$ В (отрезок ab').

Если принять массу сплава $K = 1$ и она изображается bc , то масса кристаллов в точке **a**: $x = ba / bc$, а количество жидкости: $1 - x = ac / bc$.

Отношение твердой и жидкой фаз: $x / (1-x) = ba / ac$.

Чтобы определить концентрацию компонентов в фазах, через данную точку, характеризующую состояние сплава, проводят горизонтальную линию до пересечения с линиями, ограничивающими данную область; проекции точек пересечения на ось концентраций показывают состав фаз.

Для того чтобы определить количественное соотношение фаз, через заданную точку проводят горизонтальную линию. Отрезки этой линии между заданной точкой и точками, определяющими составы фаз, обратно пропорциональны количествам этих фаз.

Построение диаграммы сплавов системы свинец-сурьма представлено на рис. 1.91.

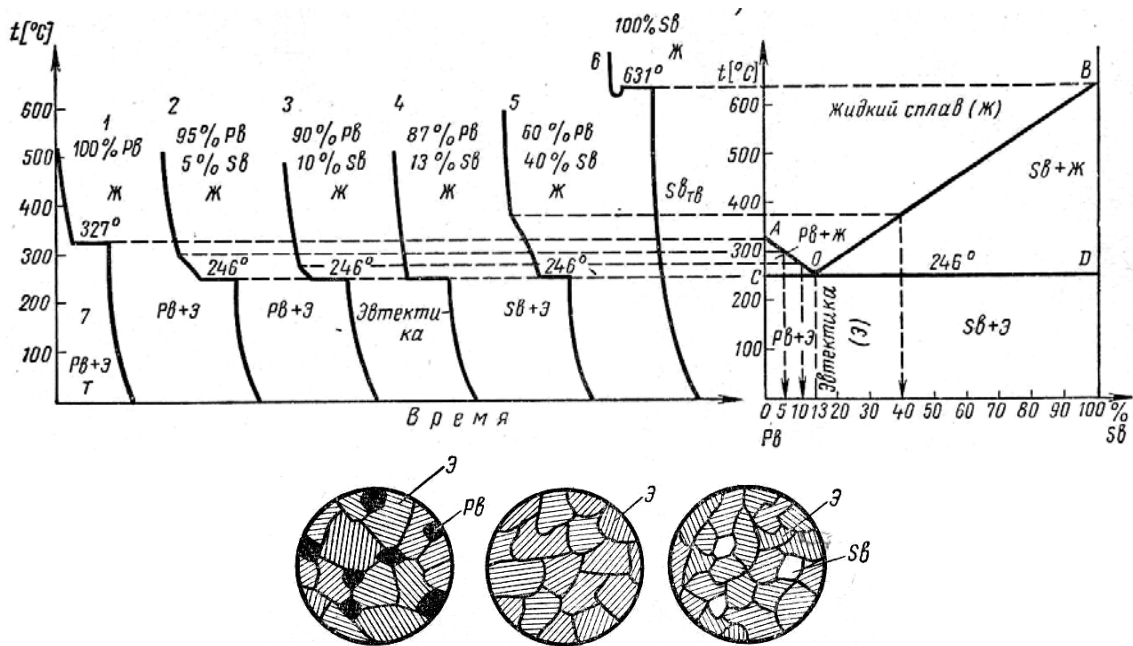


Рисунок 1.91 – Построение диаграммы сплавов системы свинец-сурьма и схемы структур доэвтектического, эвтектического и заэвтектического сплавов

Как можно видеть на схеме структур (рис. 1.91) разные составы выглядят в микроскоп по-разному, а, следовательно, можно определить хим. состав сплава по его микроструктуре. Также учитывая, что температура плавления и кристаллизации эвтектического состава сплава существенно меньше температур плавления и кристаллизации компонентов то это можно использовать для получения легкоплавких сплавов, например для припоев и др.

II. Сплав образует непрерывный ряд твердых растворов

Диаграмма состояний для сплавов с неограниченной растворимостью в твердом состоянии (2 рода)

Кривые охлаждения и диаграмма состояния твердого раствора представлены на рис. 1.92.

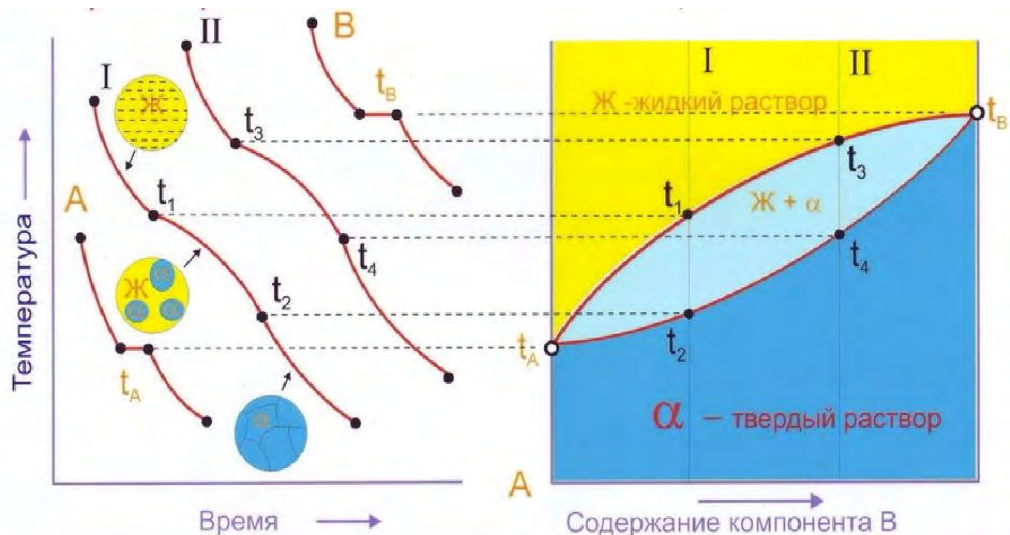


Рисунок 1.92 – Кривые охлаждения и диаграмма состояния твердого раствора

$t_A t_1 t_3 t_B$ – линия ликвидус (выше этой линии сплавы находятся в жидком состоянии);

$t_A t_2 t_4 t_B$ – линия солидус (ниже этой линии сплавы находятся в твердом состоянии).

Компоненты: А и В ($K = 2$); фазы: Ж и α , где Ж – жидкость; α – твердый раствор ($\Phi = 2$).

Построение диаграммы состояния Cu-Ni представлено на рис. 1.93.

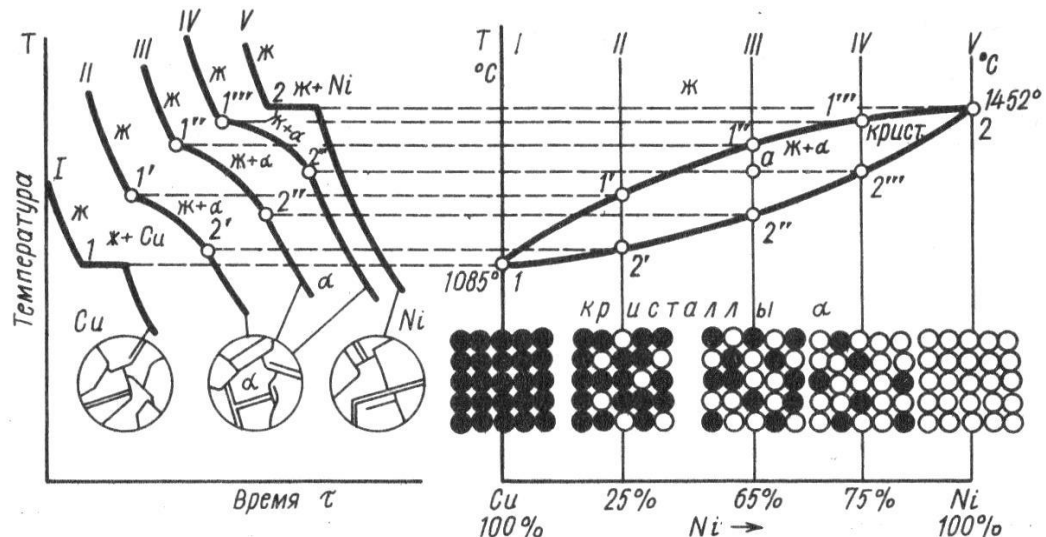


Рисунок 1.93 – Построение диаграммы состояния Cu-Ni

В отличие от сплавов, образующих эвтектику, для сплавов, образующих твердые растворы изображение микроструктур для сплавов с разным составом практически не различается. Таким образом глядя в микроскоп на микроструктуру невозможно сказать сколько, например, меди было добавлено в никель.

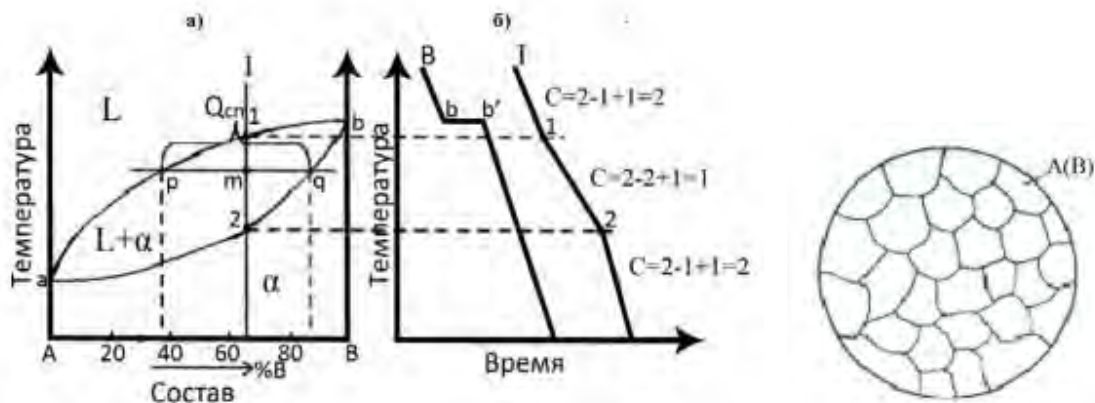


Рисунок 1.93а – Диаграмма состояния системы с неограниченной растворимостью (а), кривые охлаждения (б) и микроструктура твердого раствора (в)

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

Рассмотрим кристаллизацию сплава I. До точки 1 он охлаждается в жидком состоянии. При температуре, соответствующей точке 1, в сплаве начинают образовываться центры кристаллизации твердого раствора α. На кривой охлаждения отмечается перегиб (критическая точка), связанный с уменьшением скорости охлаждения вследствие выделения скрытой теплоты кристаллизации. На участке 1–2 идет процесс кристаллизации, протекающий при снижении температуры. При достижении температуры в точке 2, сплав полностью становится твердым и состоит из однородных кристаллов твердого раствора α.

Для количественного структурно-фазового анализа сплава применяется правило отрезков. Для проведения количественного структурно-фазового анализа через заданную точку проводят горизонталь (коноду) до пересечения с ближайшими линиями диаграммы (ликвидус, солидус или оси компонентов).

Определение количественного соотношения жидкой и твердой фазы при заданной температуре (в точке m) (рис. 1.93а):

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

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

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

$$Q_{\text{ж}} = \frac{mq}{pq} \cdot 100\%$$

Диаграммы состояния для сплавов с ограниченной растворимостью в твердом состоянии (3 рода). Диаграмма с эвтектикой.

Диаграмма состояния для сплавов с ограниченной растворимостью в твердом состоянии представлена на рис. 1.94.

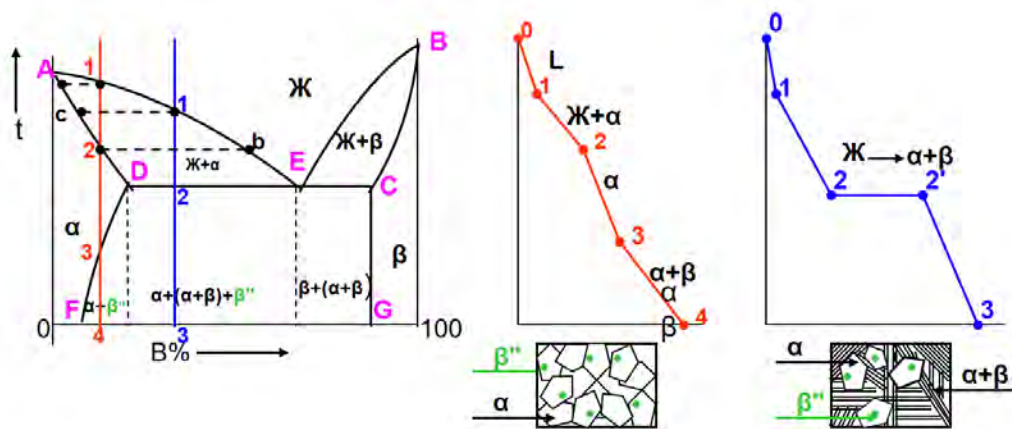


Рисунок 1.94 – Диаграмма состояния для сплавов с ограниченной растворимостью в твердом состоянии

Компоненты: А; В : $k=2$. **Фазы:** Ж; α (твёрдый раствор В в А); β (твёрдый раствор А в В); $f=3$. Следовательно возможно неинвариантное равновесие при одновременном существовании трех фаз ($c=k-f+1$). В заданной системе не образуются фазы, представляющие собой чистые компоненты.

АЕВ – линия ликвидус; ADCB – линия солидус.

Описание процесса охлаждения сплава 2

1. Выше точки 1 сплав находится в жидком состоянии.
2. В точке 1 начинается процесс кристаллизации. Выделяются кристаллы твёрдого раствора α . Концентрация которого изменяется по кривой cD , а состав жидкости по кривой $1E$.
3. При достижении горизонтальной прямой DEC наступает неинвариантная реакция. В равновесии находятся три фазы: жидкость (состава E); α -кристаллы (состава D) и β -кристаллы (состава C).
4. В результате кристаллизации сплава, кроме первичных (выделившихся из жидкости) кристаллов α , образуется еще и эвтектика ($\alpha + \beta$).
5. При охлаждении **сплава 2 ниже линии DEC**, вследствие изменения растворимости, α -кристаллы выделяют вторичные кристаллы β'' . Выделение вторичных кристаллов из эвтектических составляющих обычно не обнаруживается, так как вторичные кристаллы объединяются с такой же фазой эвтектики.

Диаграмма с устойчивым химическим соединением

Химическое соединение возникает, если компоненты могут вступать в химическую реакцию друг с другом и образовывать устойчивое сложное вещество со строго определенным соотношением между атомами одного и другого компонента. Химические соединения различаются по взаимодействующим компонентам и могут образовывать: интерметаллиды, карбиды Me_xC_y , нитриды Me_xN_y и т.п.

Диаграмма с устойчивым химическим соединением представлена на рис. 1.95.

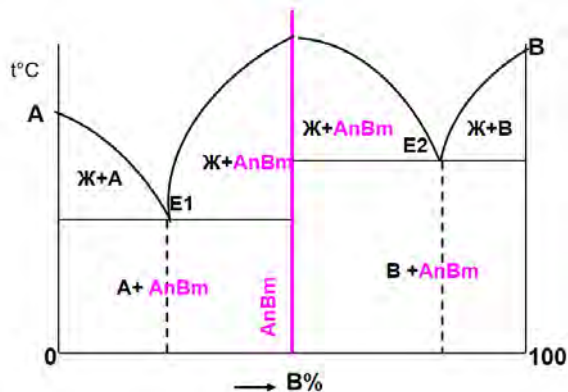


Рисунок 1.95 – Диаграмма с устойчивым химическим соединением

Хим. соединение и чистые компоненты не образуют в твердом состоянии растворов. Компоненты: А, В, A_nB_m – можно рассматривать как однокомпонентную систему.

В качестве примера на рис. 1.96 представлена диаграмма состояния сплавов Mg-Ca.

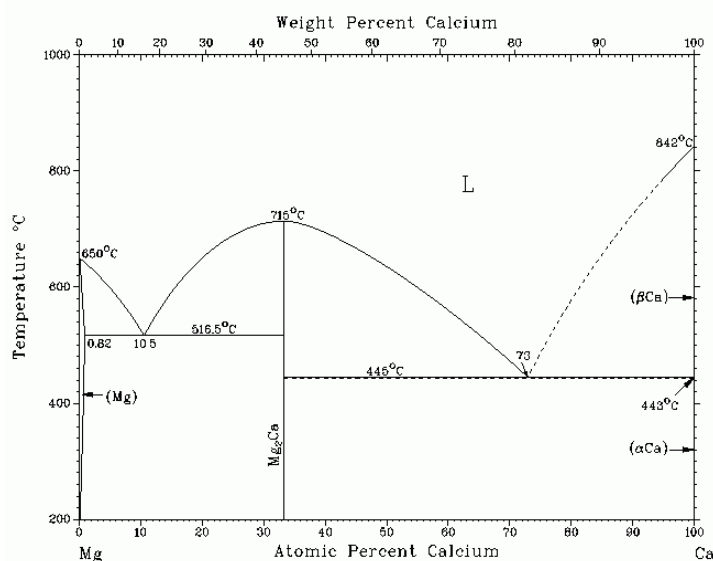


Рисунок 1.96 – Диаграмма состояния сплавов Mg-Ca

На рисунке 1.97 для сравнения представлены микроstructures твердых растворов, механических смесей и сплавов, имеющих в составе химические соединения.



Рисунок 1.97 – Микроstructures твердых растворов, механических смесей и сплавов, имеющих в составе химические соединения

Как было сказано ранее, твёрдые растворы, в которых атомы растворённого компонента занимают строго определённые позиции в решётке растворителя, формируя тем самым собственную подрешётку, называют **упорядоченными** твёрдыми растворами или **сверхструктурами**

Упорядоченные твёрдые растворы обозначают буквами - α' , β' , γ'

Сверхструктуры образуют компоненты сплава, находящиеся в соотношении AB , AB_2 , AB_3 . При изменении температуры происходит разупорядочение их структуры с соответствующим изменением свойств. Температуру разупорядочения называют *точкой Курнакова*.

Диаграмма состояния системы $Cu-Au$ и сверхструктура Cu_3Au представлены на рис. 1.98.

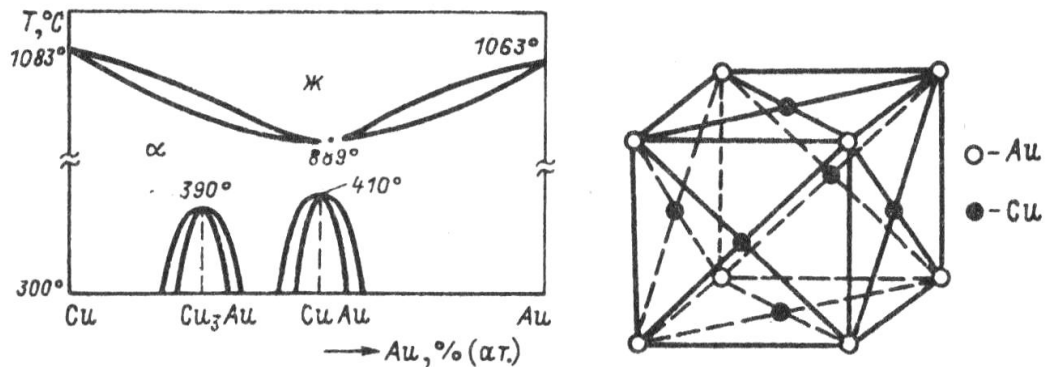


Рисунок 1.98 – Диаграмма состояния системы $Cu-Au$ и сверхструктура Cu_3Au

Диаграммы состояния для сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии и перитектическим превращением

Для некоторых типов сплавов с ограниченной растворимостью компонентов (например: $Cu-Zn$, $Cu-Sn$) характерно перитектическое превращение, заключающееся в образовании одной из кристаллических фаз вследствие взаимодействия другой кристаллической фазы с расплавом. Вид диаграммы состояния для сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии и перитектическим превращением представлен на рис. 1.99.

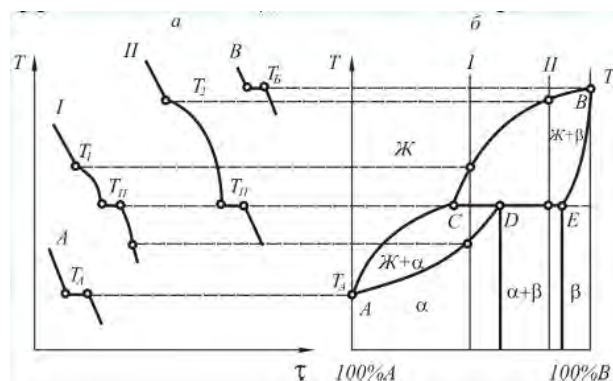


Рисунок 1.99 – Кривые охлаждения (а) и диаграмма состояния (б) сплава, компоненты которого ограничено растворимы в твердой фазе, с перитектическим превращением

При перитектическом превращении в системе существуют три фазы – жидкая и два твердых раствора. В сплаве металлов, ограниченно растворяющихся в твердом состоянии, могут образовываться ликвации (неоднородности химического состава). Для устранения этого вредного эффекта при кристаллизации сплавы охлаждают с высокими скоростями или перемешивают.

Свойства сплавов и диаграмма их состояния

Взаимосвязь свойств сплава и его диаграммы состояния представлены на рис. 1.100.

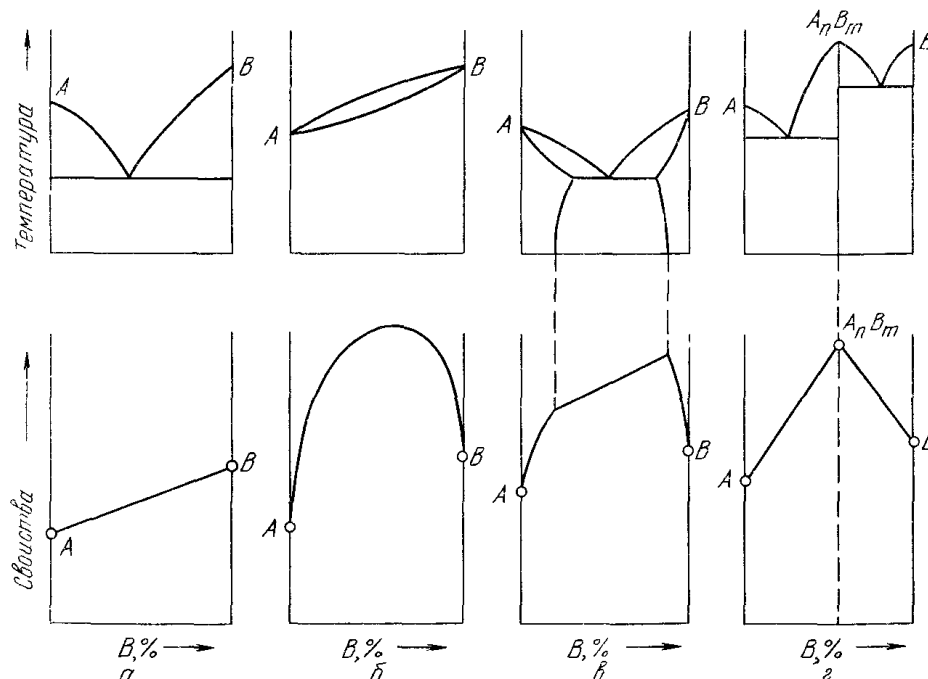


Рисунок 1.100 – Взаимосвязь свойств сплава и его диаграммы состояния

1. Сплав с эвтектикой (механическая смесь компонентов)

При образовании смесей свойства сплава изменяются линейно (аддитивно). Свойства сплава находятся в интервале между свойствами компонентов.

2. Твердый раствор с неограниченной растворимостью компонентов

В твердом растворе свойства сплава изменяются по криволинейной (близкой к параболе) зависимости. Свойства сплава (н-р, электросопротивление) могут быть значительно выше (ниже) свойств компонентов.

3. Ограниченный твердый раствор

В интервале концентраций, отвечающем однофазным твердым растворам, свойства изменяются по криволинейному, а в двухфазной области диаграммы – по прямолинейному закону. Крайние точки на прямой – это свойства чистых фаз, предельно насыщенных твердых растворов, образующих данную смесь.

4. Образование химического соединения

При образовании химического соединения на диаграмме возникает максимум (минимум). Эта точка перелома кривой называется **сингулярной (особой) точкой**, которая позволяет определить стехиометрическое соотношение компонентов в химическом соединении.

Тема 1.6. Диаграмма состояния железо-углерод

Железоуглеродистые сплавы подразделяют на две группы:

- стали, содержащие от 0,02 до 2,14 %С;
- чугуны, содержащие свыше 2,14 %С до 6,67 %С.

Диаграмма состояния железо-углерод представлена на рисунке 1.101.

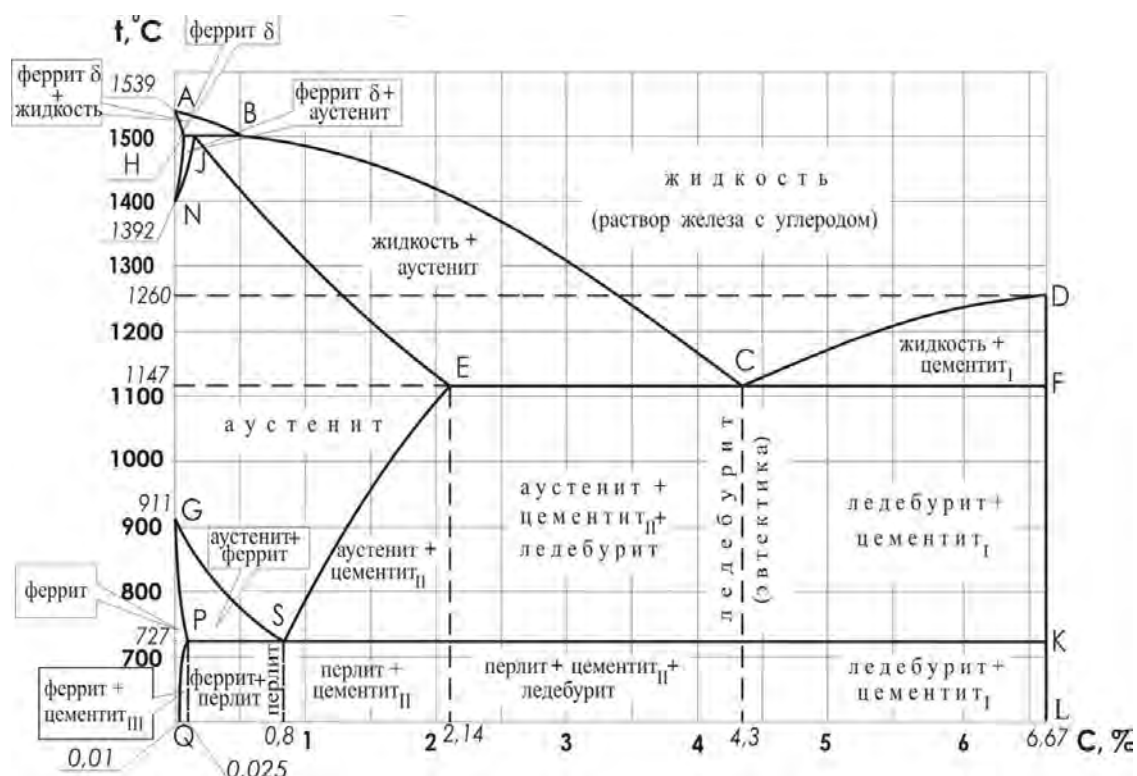


Рисунок 1.101 – Диаграмма состояния железо-углерод (Fe-Fe₃C)

Фазы в сплавах железа с углеродом

Феррит (обозначают Φ или α) – твердый раствор внедрения углерода в Fe. Различают низкотемпературный и высокотемпературный феррит. Предельная концентрация углерода в низкотемпературном феррите составляет 0,02 %, в высокотемпературном – 0,1 %. Столь низкая растворимость углерода в Fe_α, обусловлена малым размером межатомных пор в ОЦК решетке.

Аустенит (обозначают A или γ) – твердый раствор внедрения углерода в Fe_γ. Он имеет ГЦК решетку, межатомные расстояния в которой больше, чем в ОЦК решетке, поэтому растворимость углерода в Fe_γ значительно больше и достигает 2,14 %.

Цементит (обозначают Ц или Fe₃C) – карбид железа (почти постоянного состава) Fe₃C, содержит 6,67 % C и имеет сложную ромбическую решетку.

Графит – углерод, выделяющийся в железоуглеродистых сплавах в свободном состоянии. Имеет гексагональную кристаллическую решетку.

Характеристики структурных составляющих железоуглеродистых сплавов представлены в табл. 1.10.

Таблица 1.10 – Структурные составляющие железоуглеродистых сплавов

Название структуры	Тип структуры	Твердость, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %
Цементит	Химическое соединение	8000	2000	0
Феррит	Твердый раствор	800	300	40
Аустенит	Твердый раствор	2000	600	60
Перлит	Механическая смесь	2000	600	20
Ледебурит	Механическая смесь	7000	1000	1

Превращения в сплавах системы Fe - Fe₃C происходят как при затвердевании жидкой фазы, так и в твердом состоянии.

Первичная кристаллизация идет в интервале температур, определяемых на линиях ликвидус (ABCD) и солидус (AHJECFD).

Вторичная кристаллизация вызвана превращением железа одной модификации в другую и переменной растворимостью углерода в аустените и феррите; при понижении температуры эта растворимость уменьшается. Избыток углерода из твердых растворов выделяется в виде цементита.

Выделяющийся из расплава цементит называют первичным, из аустенита – вторичным, из феррита – третичным.

В системе Fe - Fe₃C происходят три изотермических превращения:

- перитектическое превращение на линии HJB (1499°C)
- эвтектическое превращение на линии ECF (1147°C)
- эвтектоидное превращение на линии PSK (727°C)

Процессы фазовых превращений, идущих в твердом состоянии сплавов, называют *пере-кристаллизацией*.

Эвтектическая смесь аустенита и цементита называется *ледебуритом* (4,3 % C),

Эвтектоидная смесь феррита и цементита – *перлитом* (0,8 % C).

При охлаждении ледебурита до температур ниже линии PSK входящий в него аустенит превращается в перлит, и при 20 - 25°C ледебурит представляет собой смесь цементита и перлита (*превращенный ледебурит*).

Присутствие ледебурита в структуре сплавов обуславливает их неспособность к обработке давлением, затрудняет обработку резанием.

Различают *доэвтектоидные стали*, расположенные по составу левее точки S диаграммы, т.е. между точками P и S, и *заэвтектоидные стали*, находящиеся правее точки S, т.е. между точками S и E диаграммы.

Сплав железо – углерод, отвечающей точке S, называется *эвтектоидной сталью*.

Чугун может быть *доэвтектическим*, расположенным по составу между точками E и C диаграммы, и *заэвтектическим*, лежащим по составу между точками C и F диаграммы.

На практике содержание углерода в заэвтектических чугунах обычно не превышает 5 %.

Чугун, состав которого отвечает составу точки C, называется *эвтектическим*.

Структура чугунов может формироваться как по метастабильной, так и по стабильной диаграмме железо - углерод, Чугуны, структура которых образуется по метастабильной диаграмме Fe - C, называют *белыми чугунами*, а чугуны, кристаллизующиеся по стабильному варианту диаграммы Fe - C, - *серыми чугунами*.

Излом белых чугунов блестящий, кристаллический, а у серых чугунов - матовый, что обусловлено наличием в их структуре графита.

Есть небольшая подгруппа сплавов, не испытывающих эвтектоидного превращения.

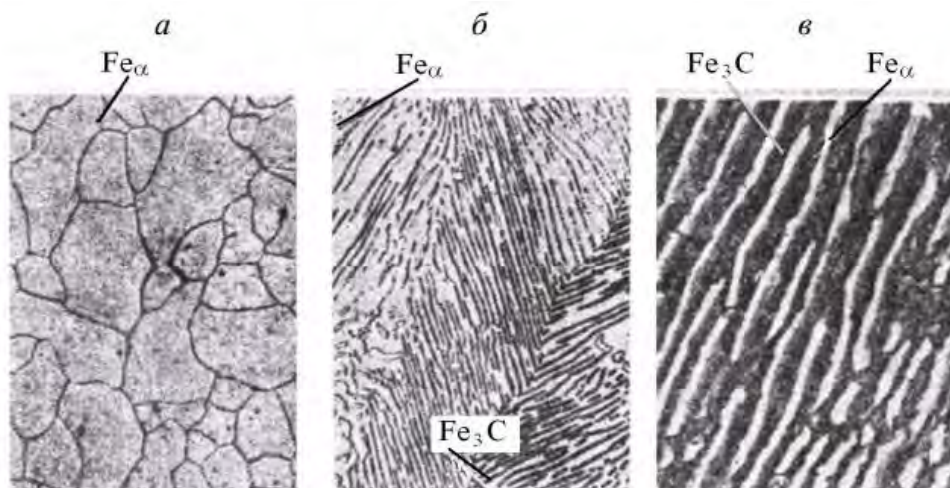
Это сплавы с содержанием углерода до 0,02 %, которые называют *техническим железом*.

Перекристаллизация всех доэвтектоидных сталей (сплавов железа с углеродом, содержащих углерод от 0,02 до 0,8 % C) начинается с первой стадии - полиморфного превращения аустенита в феррит.

Перекристаллизация всех заэвтектоидных сплавов (с содержанием углерода от 0,8 до 2,14 % C) начинается с выделения из аустенита вторичного цементита вследствие уменьшения растворимости углерода в аустените при понижении температуры.

Перекристаллизация в доэвтектоидных и в заэвтектоидных сплавах заканчивается одинаковой для всех этих сплавов второй стадией распада аустенита. Она заключается в эвтектоидном распаде последних порций аустенита, с концентрацией углерода в 0,8 % при постоянной температуре 727°C с образованием механической смеси двух фаз: феррита и цементита.

Микроструктуры железа и стали с 0,8% C представлены на рис. 1.102.



Увеличения: а – х 250; б – х 300; в – (электронная микроскопия) х 5000

Рисунок 1.102 – Микроструктура железа (а) и стали с 0,8% С (б, в)

Изображение микроструктур в различных температурных областях на диаграмме железо-углерод представлено на рис. 1.103.

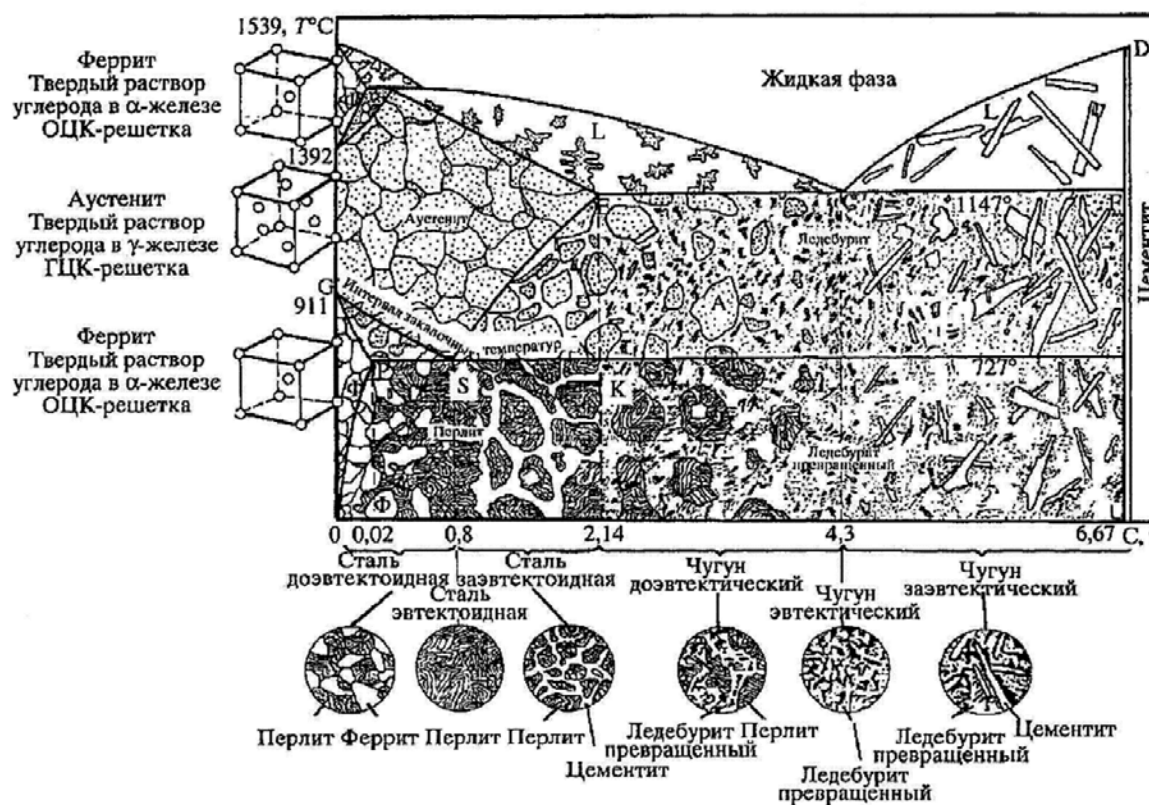


Рисунок 1.103 – Изображение микроструктур в различных температурных областях на диаграмме железо-углерод

Схема микроструктур железоуглеродистых сплавов при комнатной температуре представлена на рис. 1.104.

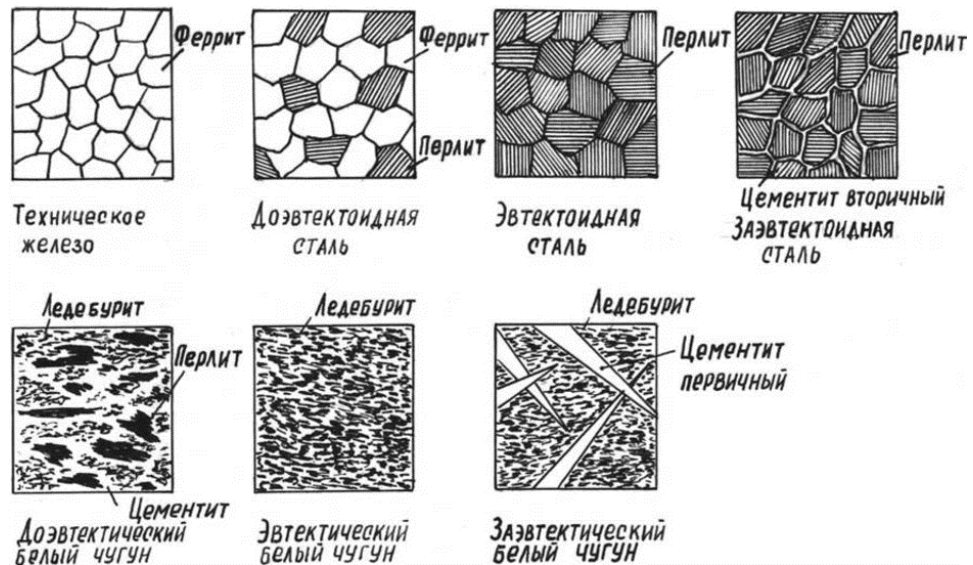


Рисунок 1.104 – Схема микроструктур железоуглеродистых сплавов

Получение железоуглеродистых сплавов

Как известно активное использование железа началось после окончания бронзового века (в этот период использовали мышьяковистые, а затем и оловянные бронзы). Связано это в первую очередь с высокой температурой плавления железа (1539 °C), что не позволяет иметь его в жидком виде при всех возможных вариантах поддержания высокой температуры горящего топлива в природных условиях. Плавление железа и железоуглеродистых сплавов в настоящее время осуществляют в специальных высокотемпературных печах. Во вторую очередь железо в природных условиях отсутствует в чистом виде, а имеется в виде оксидов и ряда других соединений, т.е. в виде руды. Возможно ли получение изделий из железоуглеродистых сплавов без плавления материала? Оказывается, что исторически первой технологией получения изделий являлось прямое получение железа (в основном науглероженного, т.е. стали) из руды путем его восстановления и последующая его ковка. Принципиальная схема сыродутного процесса показана на рис. 1.105. Т.о. используя древесный уголь и руду и интенсифицируя процесс дополнительным дутьем (при более интенсивном поступлении кислорода из воздуха более интенсивное горение топлива позволяет получать больше энергии в единицу времени, чем она рассеивается через стенки горна и температура становится выше) при температуре не превышающей 1100 – 1200 °C возможно получение пористой железной крицы, поддающейся дальнейшей ковке.

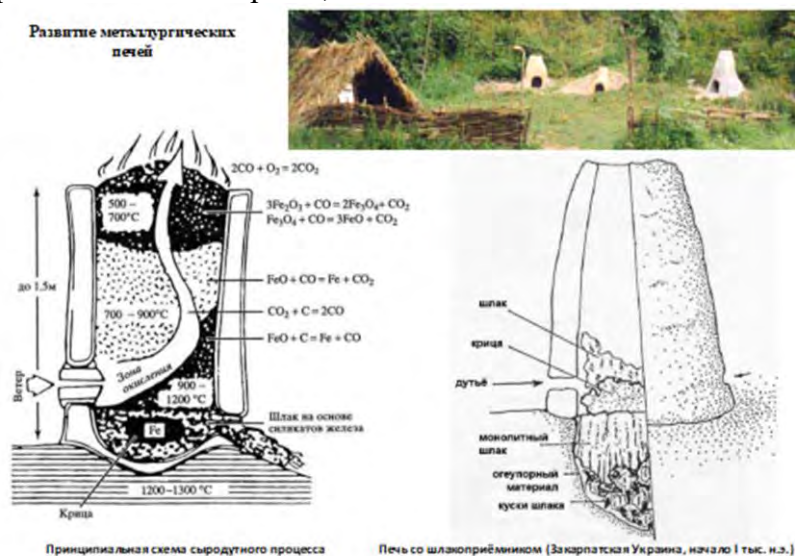


Рисунок 1.105 – Принципиальная схема сыродутного процесса

Данный процесс по своей сути был возрожден в 20 веке для широкого промышленного применения и используется в настоящее время (в качестве восстановителя используют CO и H_2 , получаемые конверсией природного газа, например, технологии Midrex, Energiron и др., также в ряде технологий могут использовать твердый восстановитель, получаемый из угля, (например, кокс). Продукцией данных технологий является так называемой губчатое железо (науглероженное), которое поставляется в виде металлизированных окатышей или брикетов и в основном переплавляется в электродуговых печах при получении качественных марок стали.

Если сыродутный процесс продолжать интенсифицировать, а печь увеличивать с одновременным увеличением толщины стенок, то проходя сверху вниз руда не просто восстановится до железа, но и науглеродится до состояния чугуна, а, следовательно, будет получен легкоплавкий жидкий металл, который можно использовать для отливки различных изделий.

Чугун получаемый в домницах и затем в доменных печах (рис. 1.106, 1.107) был непригоден для обработки давлением (например, ковкой), поэтому долгое время производство железоуглеродистых сплавов было ограничено.

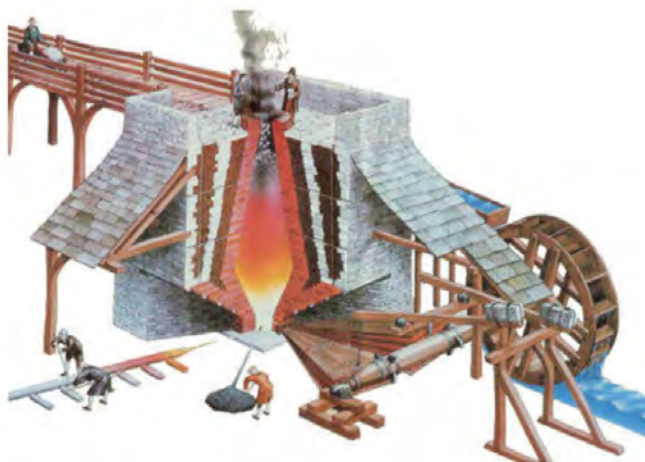
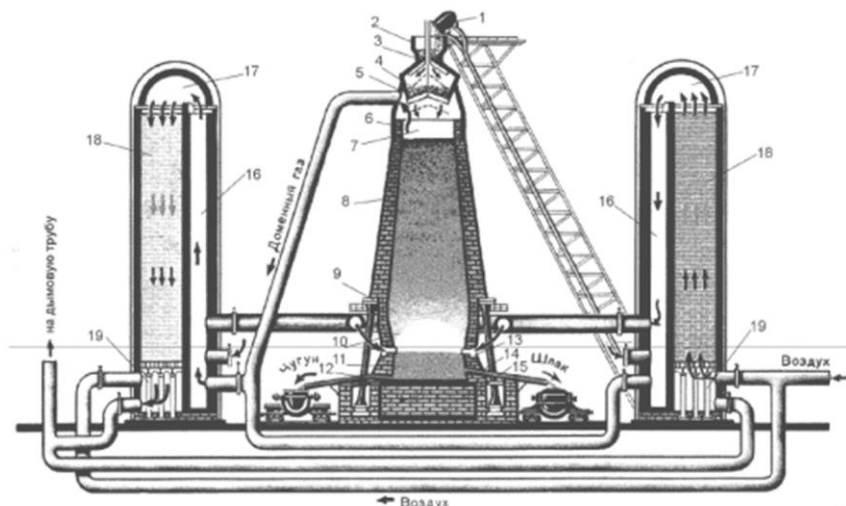


Рисунок 1.106 – Доменная печь 17-го века



1 – скип; 2 – приемная воронка; 3 – малый конус; 4 – большой конус; 5 – воронка большого конуса; 6 – защитные сегменты; 7 – колошник; 8 – шахта; 9 – распар; 10 – заплечики; 11 – горн; 12 – чугунная летка; 13 – фурма; 14 – шлаковая летка; 15 – лещадь; 16 – камера горения каупера; 17 – подкупольное пространство; 18 – огнеупорная насадка каупера; 19 – поднасадочное пространство

Рисунок 1.107 – Доменная печь конструкции середины 20-го века

В доменной печи чугун производят первично, т.е. в природе ни железа, ни чугуна, ни других железоуглеродистых сплавов (стали) не существует (метеоритное железо не берем в расчет). Чугун и в последующем сталь производят из руд восстановлением и плавлением.

Как уже было сказано ранее, сталь можно получить восстановлением из руды без плавления, однако для дальнейшего передела без плавления материала такой способ крайне неудобен и малопроизводителен. Другим путем получения стали исходя из диаграммы железа углерод является получение жидкого чугуна, а затем окисление лишнего углерода и других примесей кислородом до получения стали.

На рис. 1.108 представлены ключевые технологии, использовавшиеся для получения стали из чугуна и годы их возникновения.

Из диаграммы (рис. 1.108) следует, что для получения стали из чугуна необходимо помимо окисления углерода и других примесей увеличивать температуру расплава.

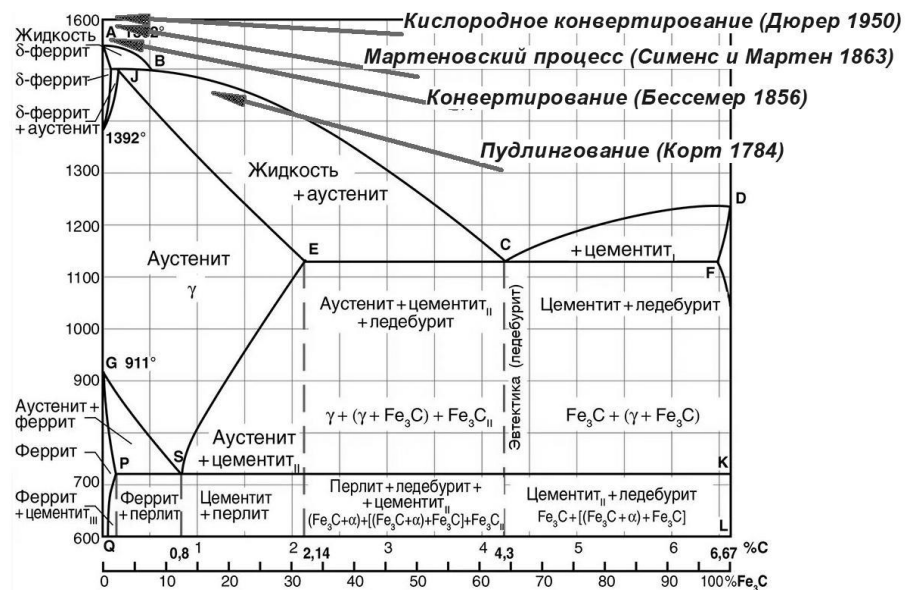


Рисунок 1.108 – Технологии получения стали из чугуна и годы их появления

В 1784 году Г. Карту выдан патент на способ пудлингования железа и прокатки его в полосы. До появления бессемеровского и мартеновского процессов процесс пудлингования был важнейшим способом получения железа (около 100 лет). Расплавленный чугун превращался в сталь путем медленного окисления кислородом воздуха. Пудлинговая печь (рис. 1.109) разогревалась продуктами сгорания от сжигания топлива при относительно низкой интенсивности горения. При низкой интенсивности процесса не удавалось поднять температуру для получения полностью жидкой перегретой стали и ее получали перемешиванием расплава и намораживанием (кристаллизацией) на специальные штанги из относительно вязкого состояния.

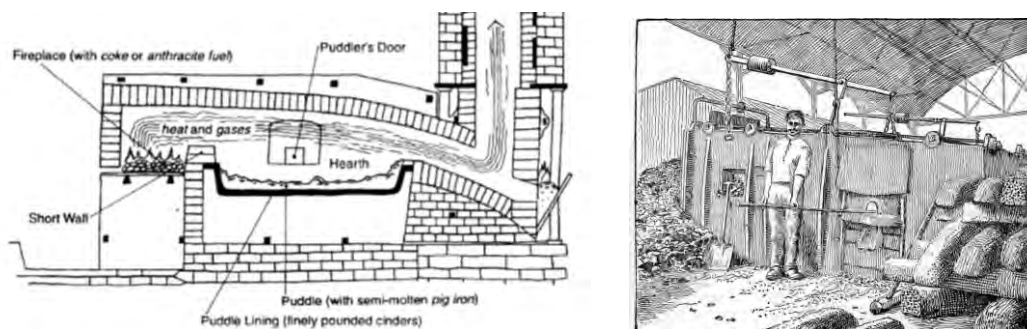


Рисунок 1.109 – Пудлинговая печь

Опыты Бессемера показали, что при продувке жидкого чугуна воздухом через трубку окисление (горение) элементов в чугуне происходит быстрее чем при пудлинговании, и если теплоотвод через стенки емкости происходит медленно, то температура расплава повышается. Бессемером (в 1856 г.) был предложен способ конвертирования чугуна в сталь в конвертере с продувкой расплава воздухом снизу, что позволило получать таким способом сталь на протяжении более 100 лет (рис. 1.110).

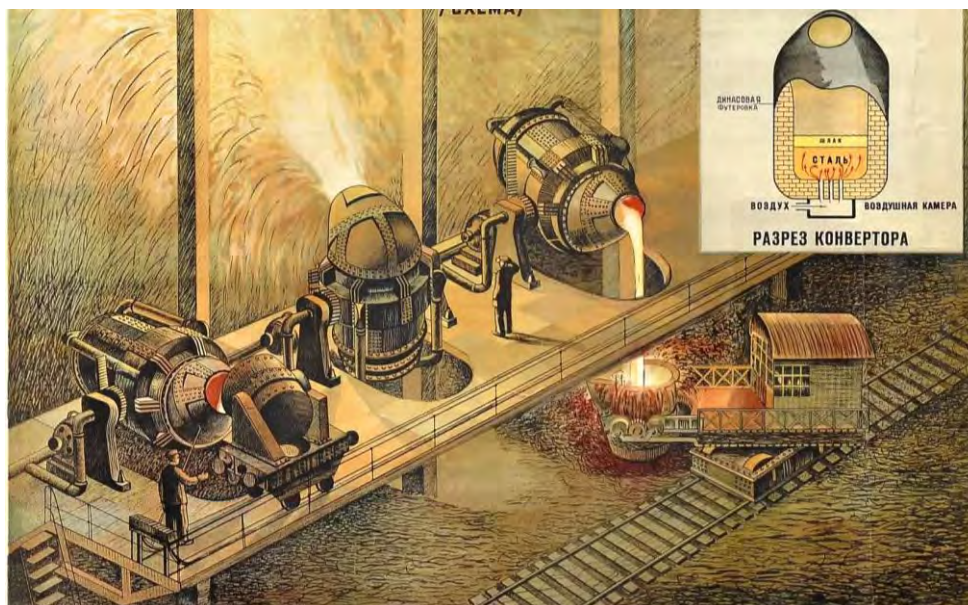
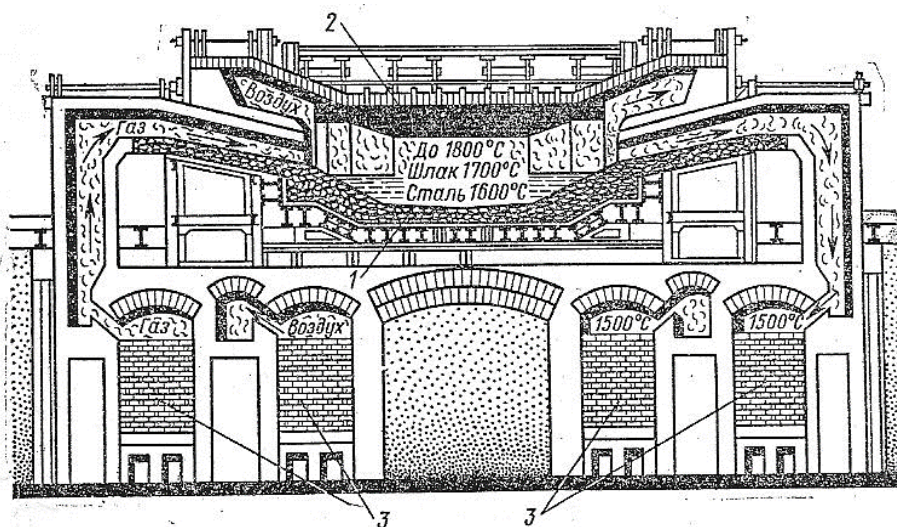


Рисунок 1.110 – Получение стали в бессемеровском конвертере

Бессемеровский конвертер имел кислую футеровку стенок (на основе SiO_2), что не позволяло проводить процесс удаления фосфора и серы, которые существенно ухудшают качество стали. Томасом примерно через 20 лет после появления конструкции бессемеровского конвертера была предложена футеровка из основного материала (обожженный доломит), что позволило перерабатывать чугуны с повышенным содержанием фосфора. Для удаления фосфора необходимы высокая окисленность (большое содержание FeO) шлака и высокая основность (достигается добавлением извести (CaO)). В конвертере с кислой футеровкой основной шлак взаимодействует с самой футеровкой, поэтому для основного шлака необходима основная футеровка.

Примерно в то же время, что и промышленное применение первых бессемеровских конвертеров Сименсами были предложены регенераторы для подовой печи и Мартенами данная конструкция была реализована (1863 г.) для подовой печи для производства стали. В отличие от пудлинговых печей регенераторы разогреваясь до высоких температур удаляемыми продуктами сгорания после переключения клапанов позволяли подогреть топливо и воздух подаваемый на горение до высоких температур, что в свою очередь позволило поднять температуру в рабочем пространстве и получать жидкую сталь с температурой около $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Конструкция мартеновской печи представлена на рис. 1.111. Данный сименс-мартеновский процесс, как и бессемеровский также просуществовал более 100 лет и в настоящее время не используется.



1 – под печи; 2 – свод печи; 3 – регенераторы для подогрева воздуха и газа
Рисунок 1.111 – Мартеновская печь

Продувка чугуна воздухом имеет недостатки, связанные с тем, что содержание кислорода в воздухе составляет около 21% по объему, а практически весь оставшийся объем 78 % приходится на азот. Замена воздуха на технический кислород позволила дополнительно интенсифицировать процесс и повысить качественные показатели получаемой стали. Кислородные конвертеры появились в 1950-е годы и применяются в настоящее время (бессемеровские и томасовские конвертеры, как и мартеновские печи уже несколько десятилетий не применяются в металлургическом производстве и являются частью истории) (рис. 1.112).

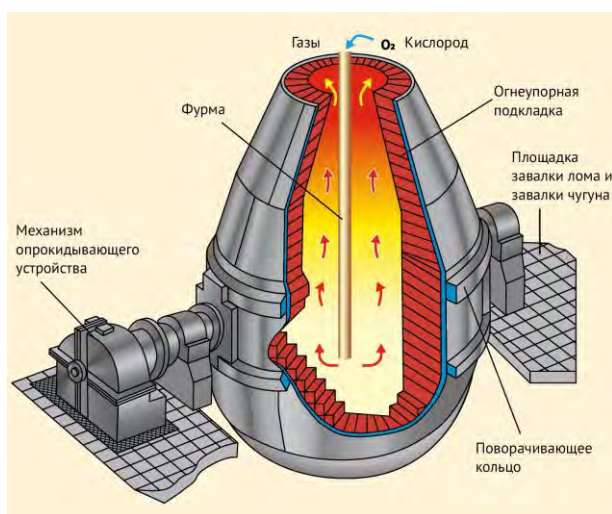


Рисунок 1.112 – Кислородный конвертер для получения стали из чугуна

Схема современного двухстадийного производства стали из руд представлена на рис. 1.113. Вначале из руд восстановлением и плавлением получают жидкий чугун, а затем окислением лишних элементов чугуна получают сталь (полупродукт). Далее сталь подвергают рафинированию (очистке) и доводке по составу для получения конкретных марок. Для этого используют специальные агрегаты (печь-ковши с электродуговым подогревом и продувкой инертным газом, вакууматоры и др.). После этого жидкую сталь разливают непрерывным способом на заготовки необходимой формы и размеров (круглого, квадратного и прямоугольного сечения).



Рисунок 1.113 – Схема современного двухстадийного производства стали из руд

Сталь также получают, используя металлический лом и металлизированное сырье (восстановленный из руды без плавления материал в виде окатышей и брикетов, также называемый губчатым железом) и переплавляя их в электродуговых печах (рис. 1.114). При этом в металлургическом производстве при переплаве стали проводят процессы ее дефосфорации, а на внепечной обработке удаляют серу и другие вредные примеси в виде вредных газов и неметаллических включений. В литейном производстве при выплавке стали используют преимущественно кислые (реже основные) электродуговые и индукционные печи (рис. 1.115).



Рисунок 1.114 – Высокомощные электродуговые печи для выплавки стали



а – электродуговые печи переменного тока ОАО МТЗ емкостью 5 тонн; б – электродуговая печь постоянного тока емкостью 6 тонн ОАО «Бобруйский машиностроительный завод»; в – индукционная электрическая печь емкостью 6 тонн

Рисунок 1.115 – Литейные электрические печи для плавки чугуна и стали

Раздел II. СТРУКТУРА, СВОЙСТВА И НАЗНАЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Тема 2.1. Углеродистые стали

Сталь – сплав железа с углеродом (и другими элементами периодической таблицы), содержащий не менее 45 % железа и в котором содержание углерода находится в диапазоне от 0,02 до 2,14 %.

Технологические особенности производства стали

Передельный или литейный чугун в расплавленном или твёрдом виде и железосодержащие изделия, полученные прямым восстановлением (губчатое железо), составляют вместе с металлическими отходами и ломом исходные материалы для производства стали. К этим материалам добавляются некоторые шлакообразующие добавки, такие как известь, плавиковый шпат, раскислители (например, ферромарганец, ферросилиций, алюминий).

Процессы производства стали делятся на два основных способа, а именно: конвертерный процесс, в котором расплавленный передельный чугун в конвертере рафинируют от примесей, продувая его кислородом, и подовый процесс, для осуществления которого используются электрические печи (электродуговые и индукционные). Конвертерные процессы не требуют внешнего источника тепла. Они применяются в том случае, когда загрузка состоит главным образом из расплавленного передельного чугуна. Экзотермические реакции окисления некоторых элементов, присутствующих в чугуне (например, углерода, фосфора, кремния и марганца), обеспечивают выделение достаточного количества тепла для поддержания расплава в жидком состоянии и даже позволяют переплавлять добавленный лом. Подовые процессы требуют внешнего источника тепла. Они применяются, когда исходным материалом служит твёрдая шихта (например, отходы или лом, губчатое железо и твёрдый передельный чугун).

В составе получаемой углеродистой стали помимо углерода содержатся элементы, которые либо не оказывают на свойства отрицательного влияния (марганец, кремний и др.), либо являются вредными примесями (сера, фосфор, цветные металлы), ухудшающими качество. Цветные металлы в виде меди и никеля практически не поддаются удалению (окислить их практически нельзя, так как железо имеет сродство к кислороду больше чем медь и окисляется в первую очередь) и, следовательно, они не должны попадать в углеродистый лом изначально (проблема в том, что даже в самой стали которую переплавляют, уже содержатся примеси цветных металлов, если эта сталь была выплавлена ранее с использованием металлолома). Сера и фосфор можно удалять, но для этого необходимы специальные условия. Например, для удаления фосфора нужна относительно низкая температура расплава, высокая окисленность и высокая основность шлака, а для удаления серы необходима высокая температура, низкая окисленность шлака и высокая основность. Проведение процессов с основным шлаком требует печей с основной, а не кислой футеровкой, также требуется использование извести для наведения основного шлака, все это обуславливает удорожание процесса и, кроме того, снижение производительности.

Влияние основных химических элементов на свойства углеродистой стали

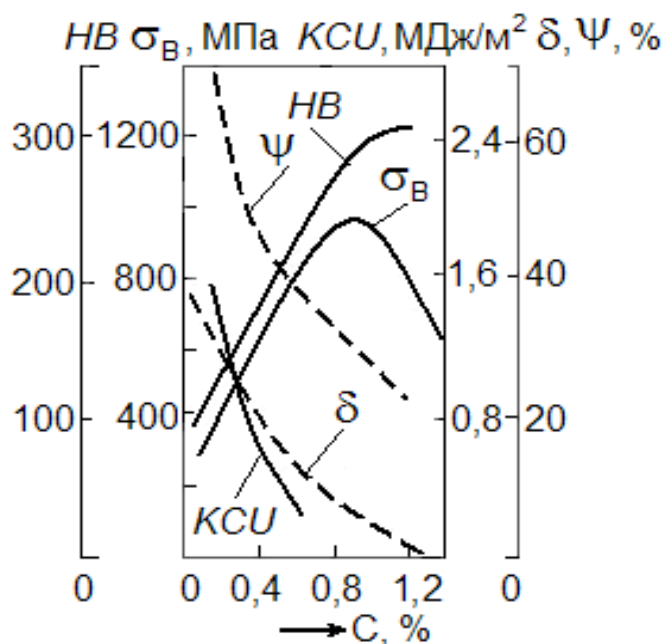
Кремний и марганец являются сопутствующими примесями в углеродистых сталях и считают, что их влияние на свойства стали в присутствующих количествах незначительно.

Увеличение содержания серы увеличивает красноломкость стали (хрупкость при повышенных температурах). Увеличение содержания фосфора увеличивает хладноломкость (хрупкость при комнатной и пониженной температурах).

Влияние углерода на механические свойства стали.

Повышение содержания углерода увеличивает твердость стали, но снижает пластичность и ударную вязкость. Прочность увеличивается до содержания углерода 0,9-1,1 %С, а

далее начинает снижаться. Графическое изображение указанных зависимостей представлено на рис. 2.1.



HB – твердость; σ_B – предел прочности на растяжение; δ – относительное удлинение; ψ – относительное сужение; KCU – ударная вязкость

Рисунок 2.1 – Влияние углерода на свойства углеродистой стали

Т.о. чем больше в стали углерода, тем она прочнее (до 1,1% углерода) и твёрже, но её пластичность и ударная вязкость снижаются. Сталь менее надёжна, особенно при низких температурах.

Влияние содержания углерода на свариваемость стали представлено в табл. 2.1. Так как помимо углерода на свариваемость влияют и другие элементы то вводится понятие углеродного эквивалента.

Таблица 2.1 – Влияние содержания углерода на свариваемость стали

Свариваемость (группа свариваемости)	$C_{\text{экв}}, \%$	Марки углеродистых сталей
Хорошая (I)	$< 0,25$	Ст1, Ст2, 08, 10, 15, 20, 25
Удовлетворительная (II)	0,25-0,35	Ст5, 30, 35
Ограниченная (III)	0,35-0,45	Ст6, 40, 45
Плохая (IV)	$> 0,45$	50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85

Классификация углеродистой стали

По химическому составу стали могут быть углеродистыми, содержащими железо, углерод и примеси и легированными, содержащими дополнительно легирующие элементы, введенные в сталь с целью изменения ее свойств.

По содержанию углерода стали делятся на низкоуглеродистые (до 0,25% C), среднеуглеродистые (0,25 – 0,7% C) и высокоуглеродистые (более 0,7% C).

По назначению углеродистую сталь можно разделить на конструкционную и инструментальную (рис. 2.2). По качеству углеродистые стали могут быть обыкновенного качества, качественные и высококачественные (рис. 2.2).

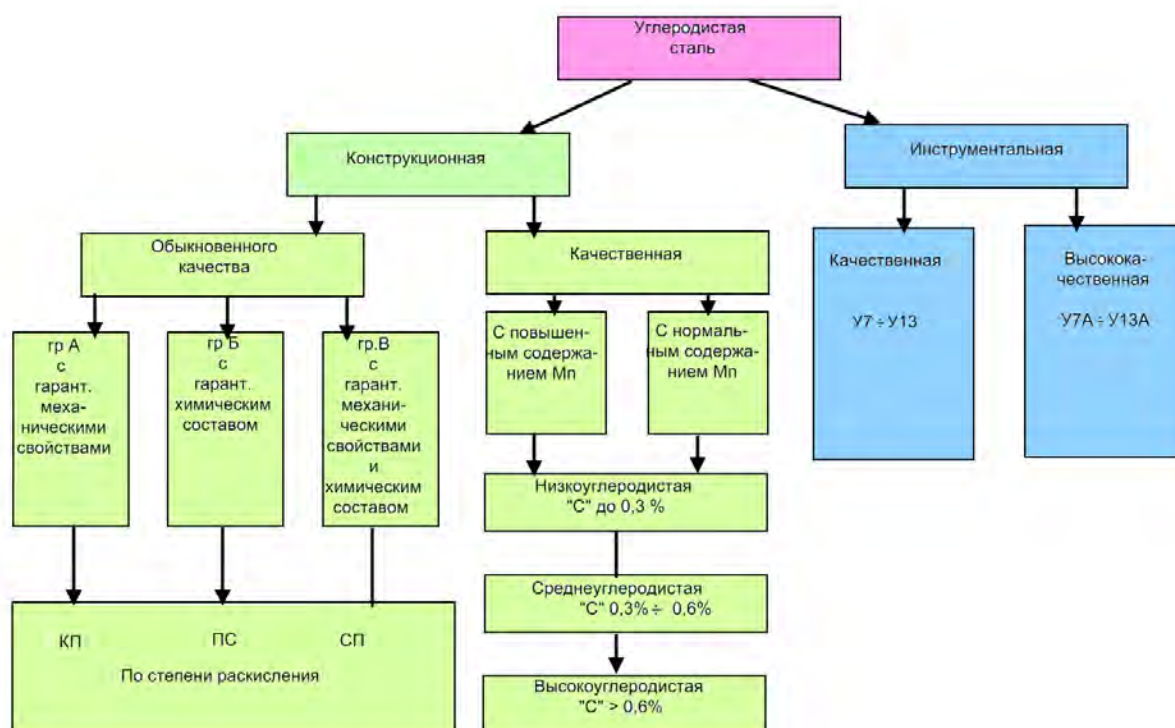


Рисунок 2.2 – Классификация углеродистой стали

Качество стали определяется в основном содержанием вредных примесей в виде серы и фосфора (рис. 2.3).

По показателям качества все стали классифицируются на стали обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особовысококачественные. Качество стали характеризуется совокупностью свойств, определяемых процессом производства, химическим составом, содержанием газов и вредных примесей (серы и фосфора). В соответствии с ГОСТом стали обыкновенного качества должны содержать не более 0,045% Р и 0,05% S, качественные – не более 0,035% Р и 0,04% S, высококачественные – не более 0,025% Р и 0,025% S и особовысококачественные – не более 0,025% Р и 0,015% S. Углеродистые конструкционные стали могут быть только обыкновенного качества и качественными, инструментальные – качественные и высококачественные (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Содержание серы и фосфора в сталях

Сера образует с железом эвтектику FeS (с температурой плавления 988 °С), что приводит к **красноломкости** стали (при горячей прокатке сталь нагревают до температур 1150-1280 °С).

Фосфор растворяясь в феррите снижает пластичность и повышает хрупкость стали, что приводит к **хладноломкости** стали.

Маркировка углеродистых сталей

Примеры марок стали в соответствии с классификацией сталей представлены на рис. 2.4.

По назначению				
Конструкционные (высокие: прочность, усталость, выносливость, обрабатываемость)				Инструментальные
Обыкновенного качества (группы)			Качественн.	($S \leq 0,03 \%$, $P \leq 0,05 \%$)
А	Б	В	($S \leq 0,04 \%$, $P \leq 0,035 \%$)	У6, У8 ...
(поставка по мех. св-вам: $\sigma_B, \sigma_{02}, \delta$)	(поставка по хим. составу: % C, Mn, Si)	(поставка по мех. св-вам и хим. составу)	0,5; 0,8; 10; 15 ... 80	У13, У13А
Ст 0 ÷ Ст 6 (Ст 3сп) [*]	БСт 0 ÷ БСт 6	ВСт 2 ÷ ВСт 5	(C – сотые %)	(А – высококач., S до 0,02 %, P до 0,05 %), C – десятые %

^{*} Индексы – степень раскисления при выплавке: кп – кипящая; пс – полуспокойная; сп – спокойная.

Рисунок 2.4 – Классификация и маркировка углеродистых сталей

Применение конструкционных углеродистых сталей обыкновенного качества представлено в табл. 2.2.

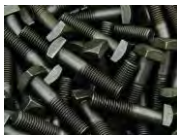
Таблица 2.2 – Применение конструкционных углеродистых сталей обыкновенного качества

Марка стали	Применение	Примеры изделий из стали
Ст1	Второстепенные элементы конструкций и неотчетственные детали: шайбы, кожухи и др.	
Ст2	Неотчетственные детали, требующие повышенной пластичности, малонагруженные элементы сварных конструкций, работающие при постоянных нагрузках и положительных температурах	
Ст3	кп – малонагруженные элементы сварных конструкций, работающие в интервале температур от -10 до +400 °С; сп – фасонный и листовой прокат – несущие элементы сварных конструкций, работающие при переменных нагрузках в интервале температур от -40 до +425 °С.	
Ст4	пс – сварные, клепаные, болтовые конструкции повышенной прочности в виде сортового проката, а также для малонагруженных валов, осей, втулок и др.	

Ст5	Пс, сп – детали клепаных конструкций, болты, гайки, втулки, упоры, штыри, пальцы и т.д. работающие в интервале температур от 0 до +425 °С.	 
Ст6, Ст7	Пс, сп – детали повышенной прочности – оси, валы, пальцы, поршни, шпонки и т.д.	

Применение конструкционных углеродистых качественных сталей представлено в таблице 1.

Таблица 2.3 – Применение конструкционных углеродистых качественных сталей

Марка стали	Применение	Фото изделий из стали
Сталь 15	Болты, винты, крюки и др. детали к которым предъявляются требования высокой пластичности и работающие при температуре от -40 до 450 °С. После ХТО – кулачки, гайки и др. детали с высокой поверхностной твердостью	 
Сталь 30	Рычаги, валы, соединительные муфты и др. детали невысокой прочности	
Сталь 40	После ТО зубчатые колеса, коленчатые валы, шатуны, оси и др. После ТВЧ средних размеров валики, зубчатые колеса и др.	
Сталь 50	После ТО зубчатые колеса, прокатные валки, тяжело нагруженные валы и оси, мало нагруженные пружины и рессоры и др.	 
Сталь 60	Цельнокатанные колеса вагонов, рабочие валки листовых станов для горячей прокатки, диски сцепления и др. т.е. детали с высокой прочностью и износостойкостью	

Для справки:

В соответствии с национальными стандартами ASTM (American Society for Testing and Materials) и SAE (Society Automotive Engineers) в США принята цифровая система маркировки конструкционных сталей, в которую в некоторых случаях добавляют буквы. Большинство сталей, за исключением коррозионностойких и жаростойких, маркируется четырехзначным числом. Первая цифра указывает основной легирующий элемент, вторая – его содержание в процентах, третья и четвертая соответствуют содержанию углерода в сотых долях процента. Первая цифра 1 принята для обозначения углеродистых сталей, в этом случае вторая цифра – 0. Например, сталь по ASTM-SAE марки 1015 соответствует стали марки 15 по отечественным стандартам, а 1045 – марке 45.

Маркировка углеродистых инструментальных сталей

Углеродистые инструментальные стали маркируются буквой «У», цифры за ней – содержание углерода в десятых долях процента.

Углеродистые инструментальные стали либо качественные (инструментальных сталей обыкновенного качества нет), либо высококачественные (в конце марки добавляется буква А).

Примеры: **У8** (содержание углерода 0,8%), **У9Г** (содержание углерода 0,9%, Г – повышенное содержание марганца), **У13А** (содержание углерода 1,3%, А – высококачественная)

Автоматные стали

Автоматная сталь – разновидность конструкционной стали, разработанная для наиболее эффективного массового производства неотчетственных деталей на станках-автоматах при высокой скорости резания. Эти стали содержат повышенное количество серы и фосфора (*эти примеси в сталях увеличивают их красноломкость и хладноломкость*) и обладают хорошей обрабатываемостью резанием (стружка легко ломается, проявляется эффект смазки и т.д.). Автоматные стали обозначают буквой **А** вначале маркировки, последующая цифра в маркировке обозначает содержание углерода в сотых долях процента, далее идёт буквенно-цифровое обозначение легирующих добавок (согласно общему обозначению марок конструкционных сталей).

Автоматные стали **А12**, **А20** с повышенным содержанием серы и фосфора используются для изготовления малонагруженных деталей на станках-автоматах (болты, винты, гайки, мелкие детали швейных, текстильных и других машин). Эти стали обладают улучшенной обрабатываемостью резанием, поверхность деталей получается чистой и ровной. Износостойкость может быть повышена цементацией и закалкой.

Стали **А30** и **А40Г** предназначены для деталей, испытывающих более высокие нагрузки.

Углеродистые стали для холодной штамповки

Стали Ст1, Ст2 применяются для деталей неотчетственного назначения, высокой вязкости и низкой твёрдости, малонагруженных элементов сварных конструкций, изделий типа кожухов, обшивок.

Стали Ст3, Ст4 применяются для несущих элементов сварных и не сварных конструкций, фасонных гнутых профилей, ёмкостей, не подвергающихся воздействию коррозии, деталей типа обечаек, кожухов, обшивок, изделий бытового назначения.

Стали 05кп, 08кп, 08, 08пс, 10кп, 10, 10пс без термической обработки применяют для изготовления шайб, плоских деталей в операциях вырубки-пробивки. Также изготавливают гнутые детали, панели капота и багажника, корпуса фильтров, крышки различной формы, двери, детали кабин, кузова, кожухи, детали бытовой техники с разной степенью вытяжки. После цементации или цианирования – коромысла, ушки, втулки тонкостенные и другие детали, от которых требуется высокая твёрдость поверхности и допускается невысокая прочность сердцевин при её повышенной вязкости.

Стали 15кп, 15пс, 15, 20кп, 18кп, 20, 20сп, 25, 30, 35, 40 без термической обработки и после нормализации применяют для изготовления различных тонкостенных втулок (стака-нов), дисков колёс автотранспорта, малонагруженных звёздочек, патрубков, бамперов, сварных подмоторных рам, деталей плоских рычагов, различных кронштейнов, гнутых деталей, корпусов аппаратов котлотурбостроения и химического машиностроения, регулировочных прокладок. После цементации или цианирования изготавливают детали, от которых требуется высокая твёрдость поверхности и допускается умеренная прочность и достаточная пластичность сердцевин.

Микроструктуры сталей

Техническое железо с содержанием углерода менее 0,02 % может состоять только из феррита (твёрдый раствор углерода в α -железе) (рис. 2.5).

Микроструктуры сталей в отожженном состоянии (в соответствии с диаграммой железо-углерод при различном содержании углерода представлены на рисунках 2.6-2.13.

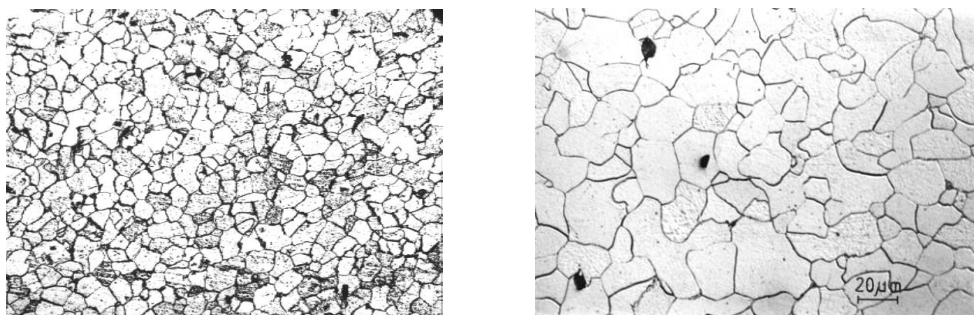
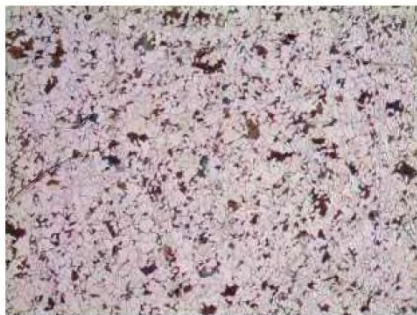


Рисунок 2.5 – Техническое железо: менее 0,02 % С

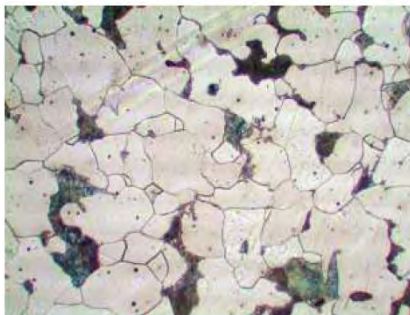
Стали с содержанием углерода до 0,8 % состоят из феррита (светлые зерна) и перлита (темные зерна). Например, сталь с содержанием углерода 0,4% (рис. 1) состоит на 50% из феррита и на 50% из перлита. Сам перлит – это механическая смесь феррита и цементита, поэтому каждое темное зерно имеет некоторую текстуру (при пластинчатом перлите выглядит как отпечатки пальцев).

Конструкционная сталь с 0,2 % С для деталей, получаемых холодной деформацией и сваркой представлена на рис. 2.7.

Объектив 10X, NA 0.25



Объектив 50X, NA 0.70



Объектив 100X, NA 0.85

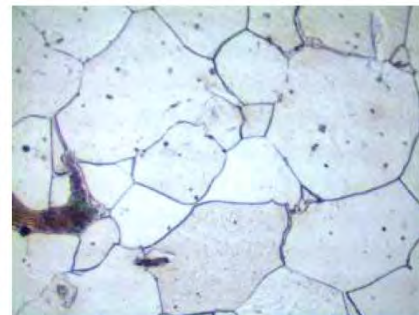
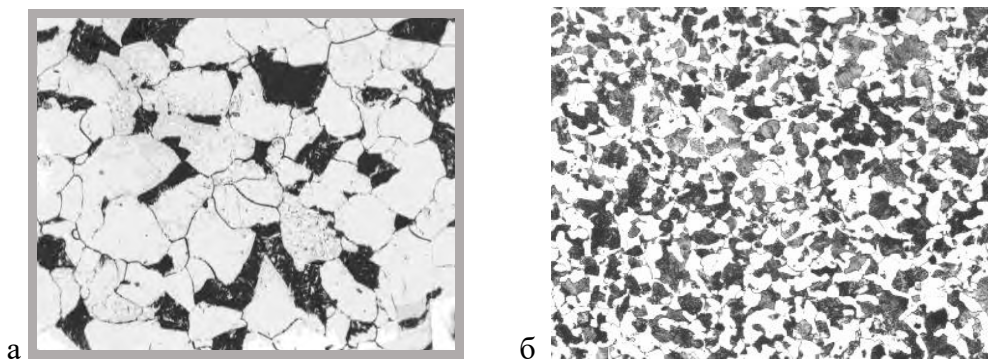


Рисунок 2.6 – Сталь 20 конструкционная углеродистая качественная (показана при различном увеличении)



а

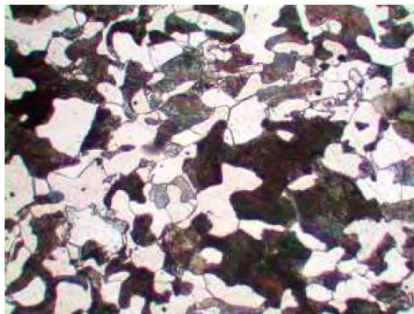
б

Рисунок 2.7 – Конструкционная сталь с 0,2 % С (а) и с 0,4 % С (б)

Объектив 10X, NA 0.25



Объектив 50X, NA 0.70



Объектив 100X, NA 0.85

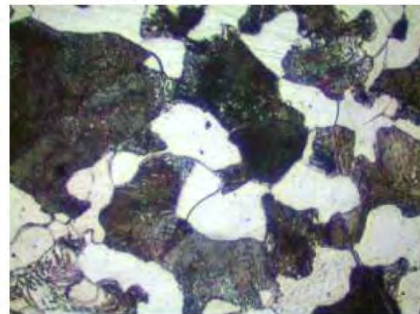
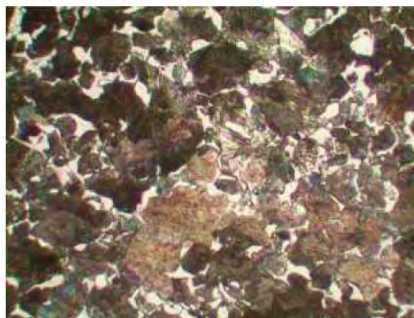


Рисунок 2.8 – Сталь 45 конструкционная углеродистая качественная (показана при различном увеличении)

Объектив 10X, NA 0.25



Объектив 50X, NA 0.70



Объектив 100X, NA 0.85

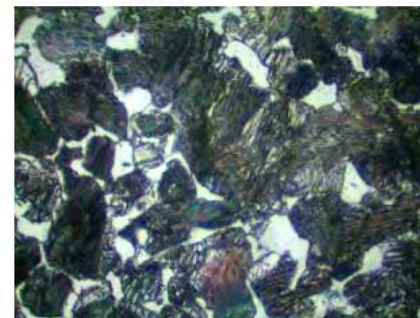


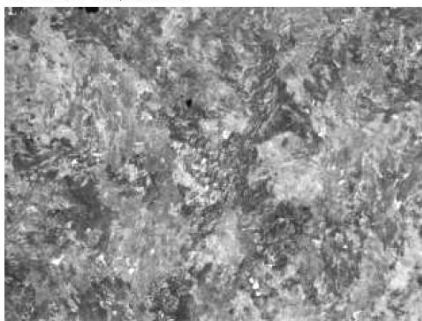
Рисунок 2.9 – Сталь 65 конструкционная рессорно-пружинная (показана при различном увеличении)

Сталь с содержанием углерода ровно 0,8 % целиком состоит из перлита. На рисунке 2.10 показаны перлитные зерна при большом увеличении.

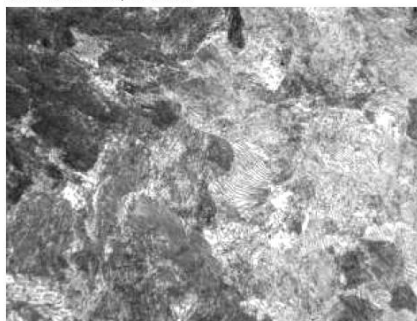


Рисунок 2.10 – Конструкционная пружинная (для силовых упругих элементов) сталь с содержанием углерода 0,8 %

Объектив 10X, NA 0.25



Объектив 50X, NA 0.70



Объектив 100X, NA 0.85

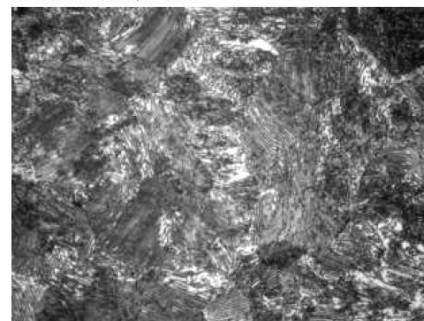


Рисунок 2.11 – Сталь инструментальная углеродистая У8 (показана при различном увеличении)

Стали с содержанием углерода более 0,8 % состоят из перлита и цементита (рис. 2.12, 2.13). При этом цементит (химическое соединение или карбид железа) располагается по границам перлитных зерен.

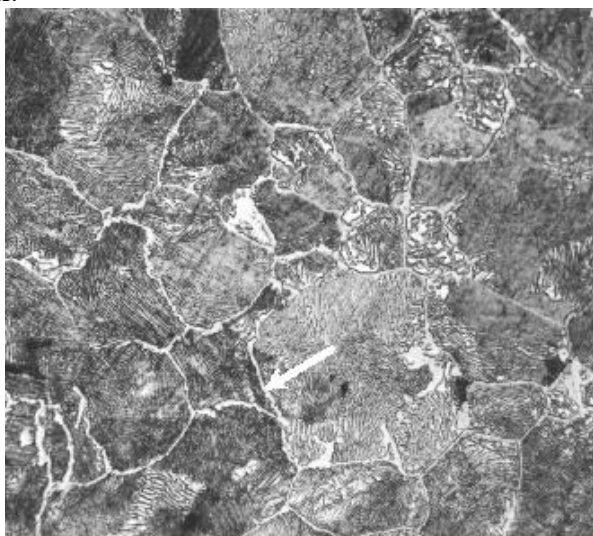
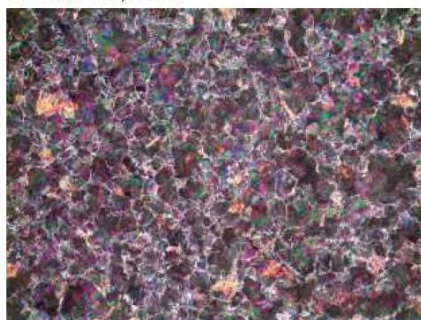
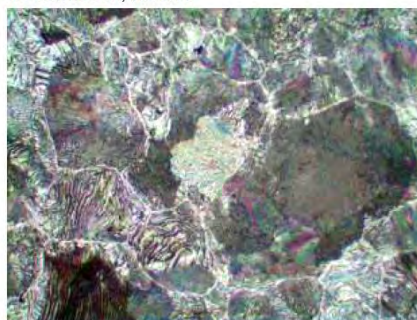


Рисунок 2.12 – Инструментальная сталь: 1,2 % С. Для свёрл, метчиков, напильников, пил.

Объектив 10X, NA 0.25



Объектив 50X, NA 0.70



Объектив 100X, NA 0.85

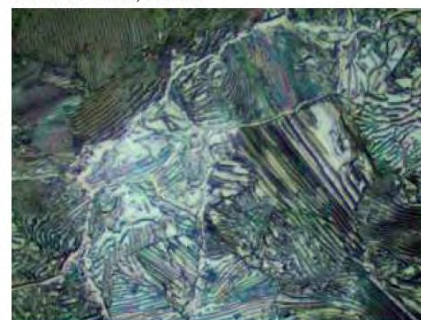


Рисунок 2.13 – Сталь инструментальная углеродистая У12 (показана при различном увеличении)

Нагартованная сталь

Нагартовка (наклеп) – технологический процесс упрочнения металлов, происходящий в результате пластической деформации при холодной обработке металлов давлением. В результате данного процесса изменяются механические свойства металлов: повышаются прочность и твердость материала, увеличивается предел текучести, однако снижается пластичность.

Схема влияния степени нагартовки на прочность, твердость и пластичность металлов представлена на рис. 2.14.

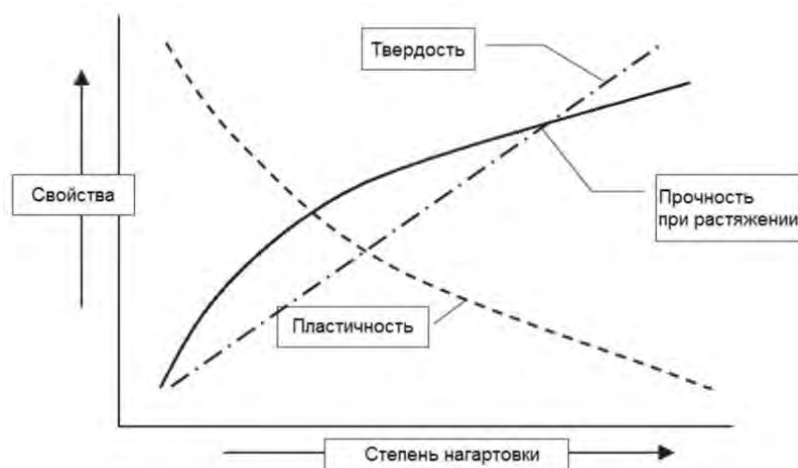


Рисунок 2.14 – Схема влияния степени нагартовки на прочность, твердость и пластичность металлов

Нагартовка представляет собой процесс, который проводится специально в целях улучшения прочностных характеристик металла.

В машиностроении наклёп используется для поверхностного упрочнения деталей. Наклёп приводит к повышению усталостной прочности, а иногда и износостойкости. Для получения упрочненного наклёпом поверхностного слоя заготовку подвергают обработке различными видами поверхностной пластической деформации, например обкатка роликами, дробеструйная обработка, поверхностное выглаживание и др.

Наклеп, в отличие от нагартовки, часто является самопроизвольным процессом и может нести как положительный, так и отрицательный эффект. Например, при волочении проволоки (уменьшении ее диаметра пропусканием через отверстие меньшего диаметра чем исходная заготовка) она упрочняется и хуже поддается деформации интенсивно изнашивая сам инструмент (волоку), поэтому наклеп снимают, проводя термическую обработку (патентирование) между этапами волочения.

При значительных деформациях вследствие перенаклёпа в материале возникают поры, субмикротрещины и другие дефекты.

При холодной деформации, например, прокатке структура стали меняется (зерна удлиняются) (рис. 2.15). Для возврата первоначальной микроструктуры сталь нужно нагреть до определенной температуры (отжиг стали), когда происходит его рекристаллизация.

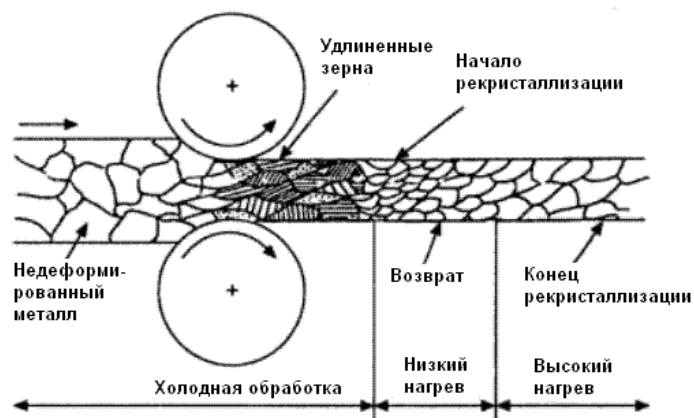


Рисунок 2.15 – Изменение микроструктуры при пластической деформации металла (зерна показаны для иллюстрации условно, очень сильно увеличенными)

Тема 2.2. Чугуны

Чугуны – это железоуглеродистые сплавы, содержащие более 2,14 % углерода и согласно диаграмме «Fe – Fe₃C» затвердевающие с образованием эвтектики. Чугуны получили широкое распространение в машиностроении благодаря хорошим литейным свойствам, достаточной прочности, износостойкости при относительно низкой стоимости.

Чугун выплавляют в доменных печах (первичное производство) и получают переделные (белые), специальные (ферросплавы) и литейные (серые) чугуны. Для конкретных машиностроительных деталей чугуны плавят в вагранках, электродуговых и индукционных электрических печах. Для этого используют как первичный чугун, так и металлический чугуновый и стальной лом.

Классификация чугунов представлена на рис. 2.16.

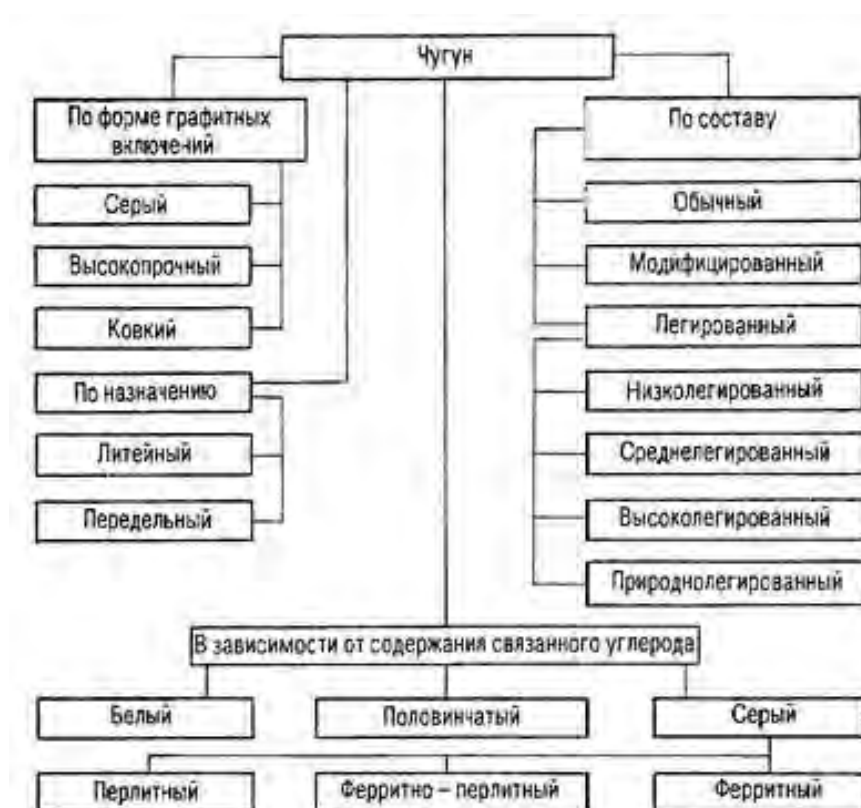


Рисунок 2.16 – Классификация чугунов

Если весь углерод, входящий в состав чугуна, находится в связанном виде как химическое соединение Fe₃C, то такой чугун называется белым.

Излом белого чугуна светлый, с металлическим блеском. По структуре белые чугуны подразделяются на доэвтектические, эвтектические и заэвтектические (рис. 2.17).

Эвтектический белый чугун содержит только эвтектику ледебурит (механическая смесь перлита и цементита). В доэвтектическом чугуне кроме ледебурита присутствует перлит (темные зерна). В заэвтектическом чугуне кроме ледебурита присутствует цементит (длинные светлые пластинки).

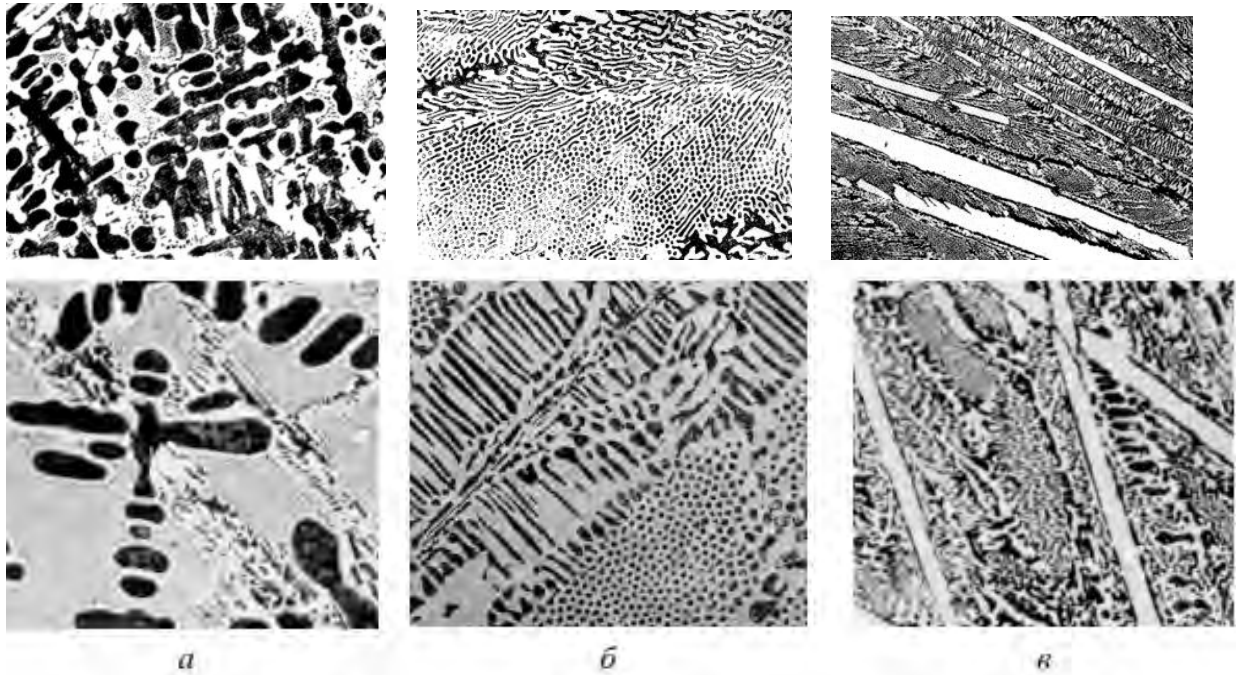


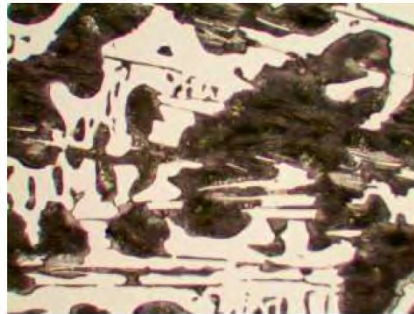
Рисунок 2.17 – Микроструктура белого доэвтектического (а), эвтектического (б) и заэвтектического (в) чугуна

На рис. 2.18-2.20 представлены микроструктуры белого чугуна при различных увеличениях.

Объектив 10X, NA 0.25



Объектив 50X, NA 0.70



Объектив 100X, NA 0.85

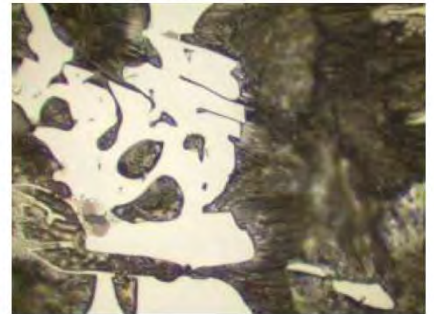
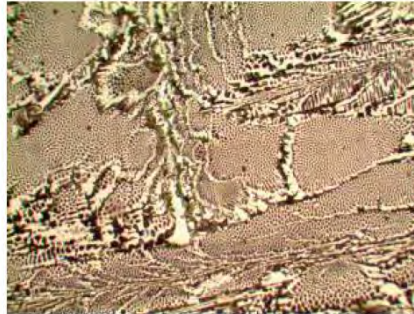


Рисунок 2.18 – Доэвтектический белый чугун

Объектив 10X, NA 0.25



Объектив 50X, NA 0.70



Объектив 100X, NA 0.85



Рисунок 2.19 – Эвтектический белый чугун

Объектив 10X, NA 0.25



Объектив 50X, NA 0.70



Объектив 100X, NA 0.85



Рисунок 2.20 – Заэвтектический белый чугун

Любой белый чугун содержит эвтектику (ледебурит), которая в момент образования состоит из аустенита и цементита, а при охлаждении ниже 727°C – из перлита и цементита.

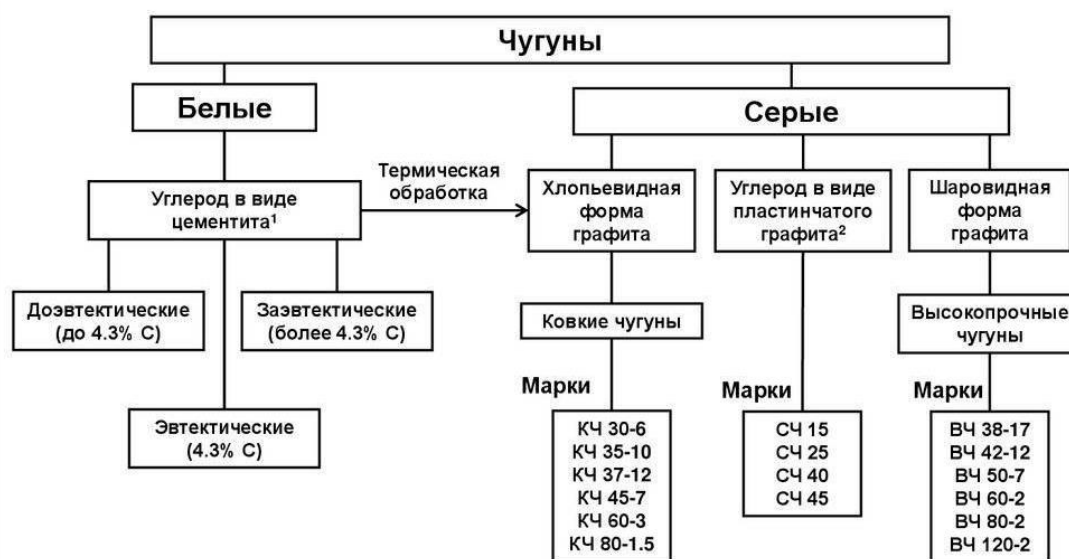
Большое количество цементита в структуре придает белым чугунам высокую твердость (4500–5500 МПа), износостойкость, хрупкость. Из-за очень низкой пластичности и плохой обрабатываемости резанием белые чугуны ограниченно применяются в машиностроении.

Для получения белого чугуна необходимы быстрое охлаждение отливки при минимальном количестве кремния и присутствие отбеливающих элементов – марганца или хрома. При таких условиях зарождение кристаллов графита становится невозможным и весь углерод идет на образование цементита.

Ограниченное применение имеют отбеленные чугуны – отливки, у которых сердцевина имеет структуру серого чугуна, а поверхностный слой – структуру белого чугуна. Так, можно изготовить валки прокатных станов, шары мельниц для размола горных пород, тормозные колодки, лемеха плугов и другие детали, на поверхности которых требуется высокая износостойкость.

Придать обрабатываемость белым чугунам можно только после того, как цементит распадется на графит и феррит. Графит обеспечивает пониженную твердость, хорошую обрабатываемость резанием, высокие антифрикционные свойства вследствие низкого коэффициента трения. Но включения графита снижают прочность сплава.

Виды чугунов в зависимости от формы углерода представлены на рис. 2.21.



¹Цементит – карбид железа Fe_3C (сплав железа с углеродом)

²Графит – углерод, выделяющийся в железоуглеродистых сплавах в свободном состоянии.

Рисунок 2.21 – Виды чугунов в зависимости от формы углерода

Примеры деталей, изготавливаемых из чугуна представлены на рис. 2.22.

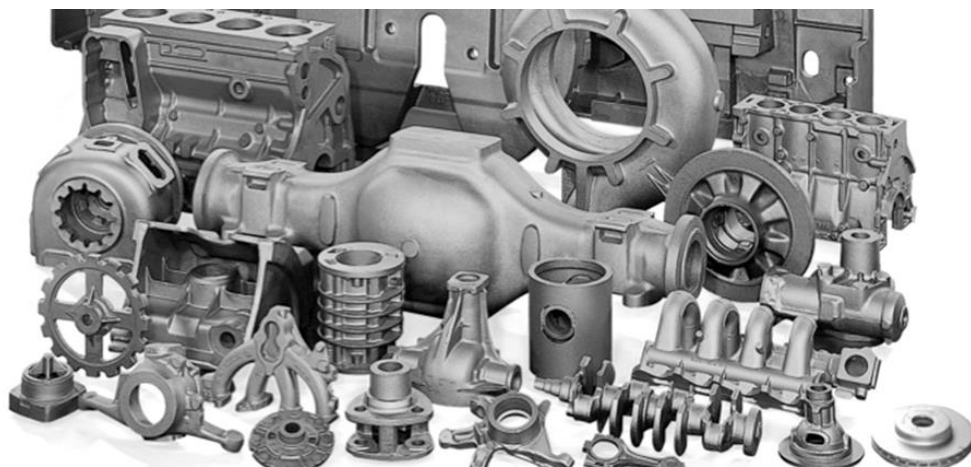
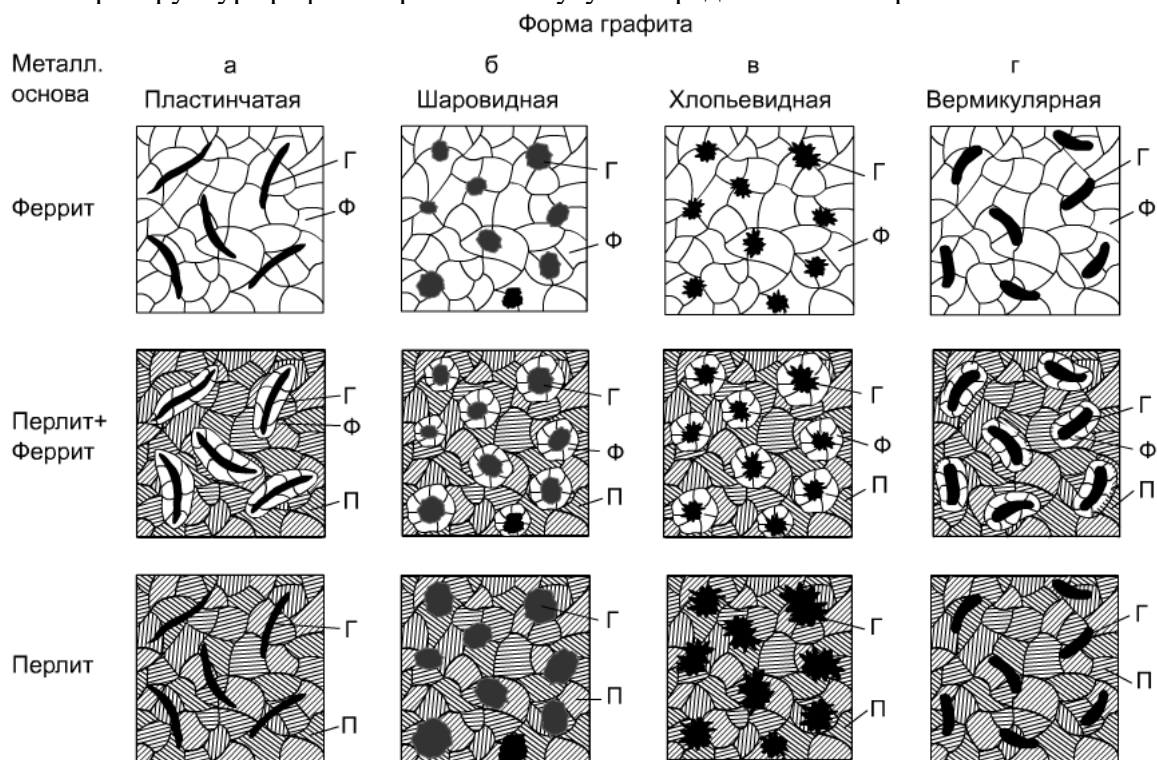


Рисунок 2.22 – Примеры деталей, изготавливаемых из чугуна

Серые, высокопрочные и ковкие чугуны различаются условиями образования графитных включений.

Схемы микроструктур графитизированных чугунов представлены на рис. 2.23.



а) серые; б) высокопрочные; в) ковкие; г) с вермикулярным графитом

Рисунок 2.23 – Схемы микроструктур графитизированных чугунов

Серым называется чугун с пластинчатой формой графита. Его излом темно-серый, без блеска, откуда и происходит название.

Серый чугун – сплав сложного состава, содержащий основные элементы: Fe, C, Si и постоянные примеси: Mn, P, S. Содержание этих элементов находится в следующих пределах: 2,2–3,7 % C; 1,0–3,0 % Si; 0,2–1,1 % Mn; 0,02–0,2 % S; 0,02–0,3 % P.

Углерод оказывает влияние на качество чугуна. Чем выше концентрация углерода, тем больше выделений графита и ниже механические свойства чугуна, но пониженное содержание углерода приводит к ухудшению литейных свойств. Поэтому для толстостенных отливок применяют чугун с более низким содержанием углерода, а для тонкостенных – с бо-

лее высоким. Максимальное содержание углерода в серых чугунах ограничивается доэвтектической концентрацией.

Кремний обладает сильным графитизирующим действием – способствует выделению графита при кристаллизации чугуна и разложению выделяющегося цементита.

Марганец затрудняет графитизацию чугуна, но улучшает механические свойства.

Сера – это вредная примесь. Она ухудшает механические и литейные свойства чугуна, понижает жидкотекучесть, увеличивает усадку и повышает склонность к образованию трещин.

Фосфор в небольшом (до 0,3 %) количестве растворяется в феррите. При большем содержании он образует вместе с железом и углеродом фосфидную эвтектику, которая плавится при температуре 950 °С, что увеличивает жидкотекучесть чугуна, но при этом повышается твердость и хрупкость. Для художественного литья, например, используется чугун с 1 % фосфора.

Серый чугун обладает способностью гасить механические колебания, не чувствителен к надрезам, хорошо обрабатывается резанием. Из него изготавливают детали разного назначения – от нескольких граммов (поршневые кольца двигателей) до отливок в десятки тонн (станины станков). Выбор марки чугуна для конкретных условий работы определяется совокупностью технологических и механических свойств. Значения механических свойств некоторых марок серых чугунов с различной структурой приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4 – Механические свойства и структура некоторых марок серого чугуна (ГОСТ 1412-85)

Марка	σ_B , МПа	δ , %	НВ, МПа	Структура
СЧ15	150	–	1630–2100	Ф
СЧ25	250	–	1800–2500	Ф+П
СЧ35	350	–	2200–2750	П

Детали из серого чугуна изготавливают литьем с последующей обработкой резанием.

Маркировка серых чугунов определяется ГОСТ 1412–85 и состоит из букв СЧ и числа, показывающего значение предела прочности при растяжении (в кгс/мм²), например: СЧ30.

Ферритные чугуны (рис. 2.24а) СЧ10, СЧ15 предназначены для слабо- и средненагруженных деталей (крышки, фланцы, корпуса редукторов, тормозные барабаны и т. д.).

Ферритно-перлитные серые чугуны (рис. 2.24б) СЧ20, СЧ25 применяют для деталей, работающих при повышенных нагрузках (блоки цилиндров, барабаны сцепления, зубчатые колеса, станины станков и т. д.).

Перлитные серые модифицированные чугуны СЧ30, СЧ35 имеют более высокие механические свойства из-за мелких графитных включений. Измельчение графита достигается путем модифицирования жидкого чугуна ферросилицием или силикокальцием в количестве 0,5 % от массы чугуна. Модифицированные чугуны обладают более высокими свойствами и хорошей герметичностью. Их применяют для корпусов насосов, компрессоров, гидроприводов, тормозной пневматики и др.

Микроструктуры ферритного и ферритно-перлитного серого чугуна представлены на рис. 2.24.

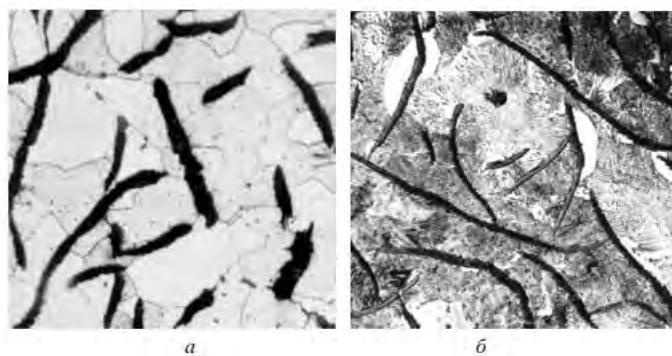


Рисунок 2.24 – Микроструктура ферритного (а) и ферритно-перлитного (б) серого чугуна

Микроструктура серого ферритного чугуна при различных увеличениях представлена на рис. 2.25.

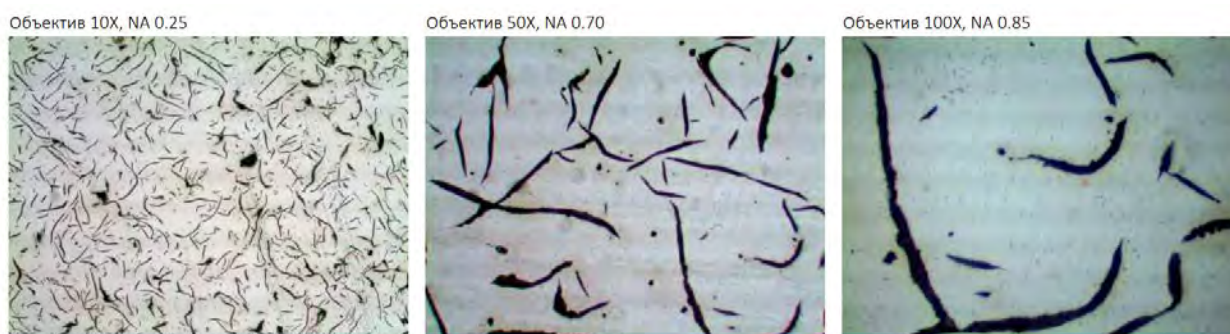


Рисунок 2.25 – Микроструктура серого ферритного чугуна

Высокопрочными называют чугуны, в которых графит имеет шаровидную форму. Их получают путем модифицирования – в жидкий чугун добавляют магний в количестве 0,02–0,08 %. Магний вводится в ковш перед заливкой в формы не в чистом виде, а в виде лигатуры – сплава магния с никелем. Магний является поверхностно-активным элементом: в расплаве атомы магния образуют препятствия на поверхности растущего кристалла графита, увеличивая его поверхностную энергию. Поэтому становится энергетически выгодным образование кристалла с наименьшим отношением поверхности к объему, т.е. шару. После модифицирования высокопрочный чугун имеет следующий химический состав: 3–3,6 % С; 1,8–2,9 % Si; 0,4–0,7 % Mn; 0,02–0,08 % Mg; до 0,15 % P; до 0,03 % S.

По структуре металлической основы высокопрочные чугуны могут быть ферритными, ферритно-перлитными или перлитными. Ферритный чугун состоит в основном из феррита и шаровидного графита (рис. 3.13, а); допускается до 2 % перлита. Структура перлитного чугуна состоит из сорбитообразного или пластинчатого перлита и шаровидного графита, допускается до 20 % феррита (рис. 3.13, б).

Микроструктуры ферритного и ферритно-перлитного высокопрочного чугуна представлены на рис. 2.26.

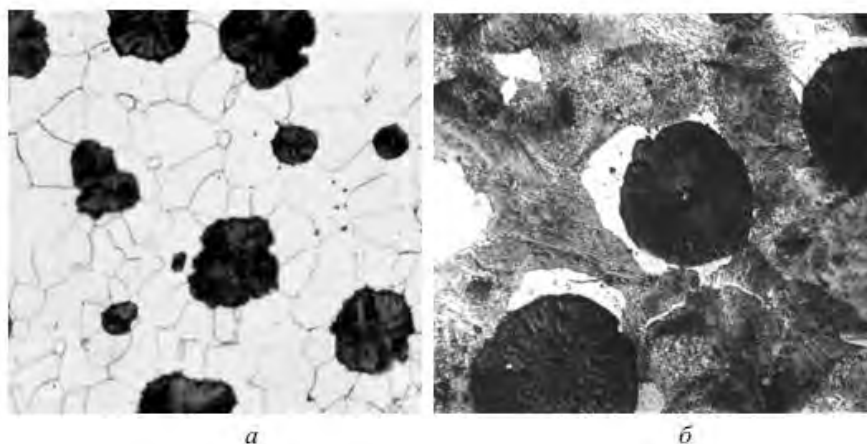


Рисунок 2.26 – Микроструктура ферритного (а) и ферритно-перлитного (б) высокопрочного чугуна

Микроструктура высокопрочного ферритного чугуна при различных увеличениях представлена на рис. 2.27.

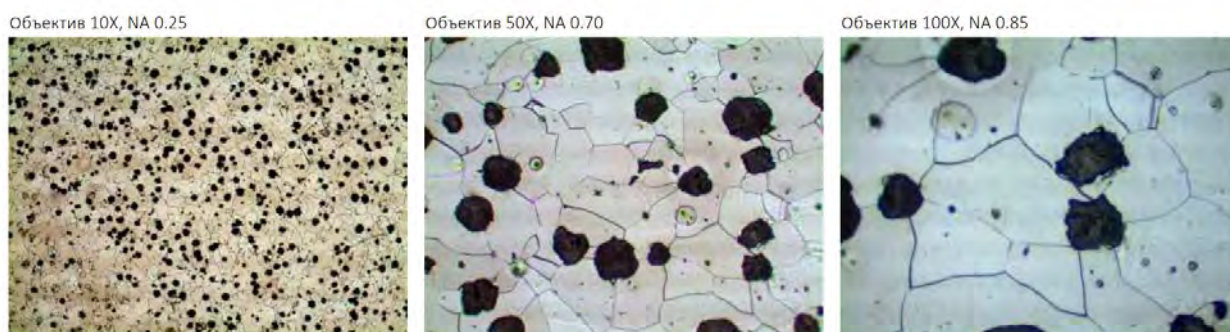


Рисунок 2.27 – Ферритный высокопрочный чугун

Микроструктура высокопрочного феррито-перлитного чугуна при различных увеличениях представлена на рис. 2.28.

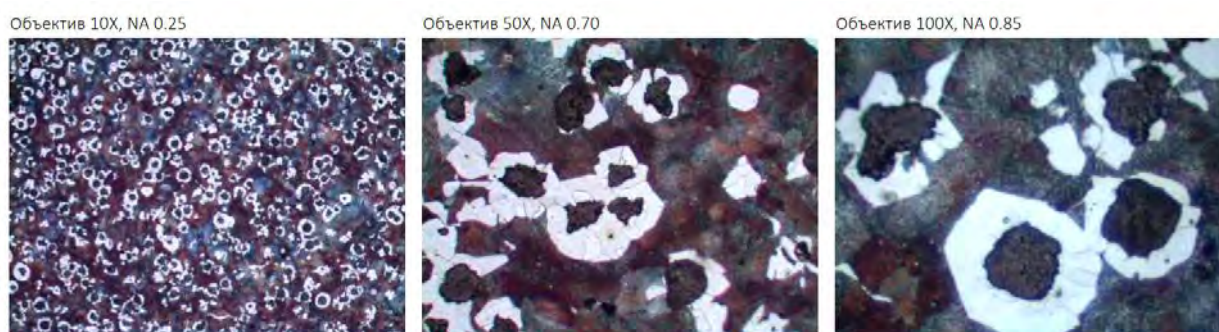


Рисунок 2.28 – Феррито-перлитный высокопрочный чугун

По химическому составу высокопрочные чугуны не отличаются от серых, но шаровидный графит является менее сильным концентратором напряжений, чем пластинчатый, поэтому прочность и пластичность этих чугунов выше, чем серых. Значения механических свойств высокопрочных чугунов приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5 – Механические свойства и структура некоторых марок высокопрочного чугуна (ГОСТ 7293-85)

Марка	σ_B , МПа	δ , %	НВ, МПа	Структура
ВЧ35	350	22	1400–1700	Ф
ВЧ45	450	10	1400–2250	Ф+П
ВЧ60	600	3	1920–2270	Ф+П
ВЧ80	800	2	2480–3510	П
ВЧ100	1000	2	2700–3600	П

В соответствии с ГОСТ 7293–85 марка высокопрочного чугуна состоит из букв ВЧ и числа, показывающего значение предела прочности при растяжении (в кгс/мм²), например: ВЧ50.

Высокопрочные чугуны способны заменять сталь во многих изделиях и конструкциях. Они могут работать при высоких циклических нагрузках и в условиях износа. Из них изготавливают оборудование прокатных станов, кузнечно-прессовое оборудование, корпуса паровых турбин, коленчатые валы в тракторо- и автомобилестроении, поршни двигателей и др.

В некоторых случаях для улучшения механических свойств чугунов применяют термическую обработку: закалку и отпуск для повышения прочности, и отжиг – для увеличения пластичности.

Ковкими называются чугуны, в которых графит имеет хлопьевидную форму. Их получают отжигом белых доэвтектических чугунов. Графит в ковких чугунах формируется при термической обработке и в такой форме меньше снижает механические свойства металлической основы. Отливки из белых чугунов должны быть тонкостенными, толщиной не более 50 мм, иначе в сердцевине при кристаллизации выделяется пластинчатый графит и чугун становится непригодным для отжига. По этой причине в ковких чугунах находится пониженное содержание углерода и кремния: 2,4–2,9 % С; 0,8–1,5 % Si; 0,2–0,9 % Mn; до 0,2 % S; до 0,18 % P.

Схема режима отжига белого чугуна с получением перлитного и ферритного ковкого чугуна представлена на рис. 2.29.

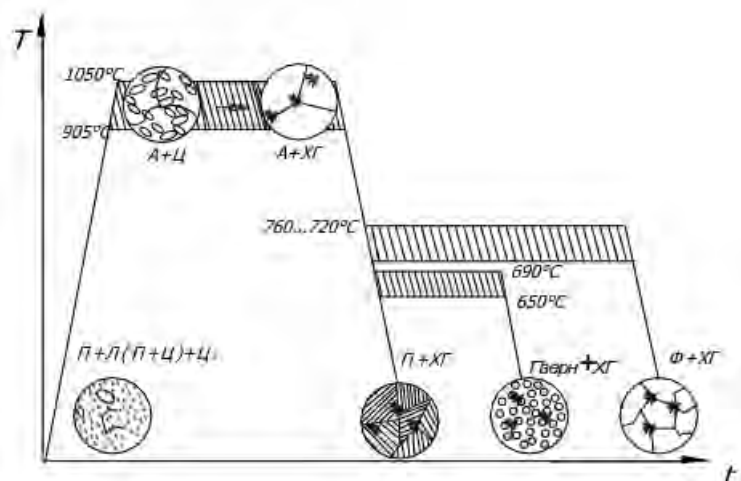


Рисунок 2.29 – Схема режима отжига белого чугуна с получением перлитного и ферритного ковкого чугуна

Микроструктура ферритного ковкого чугуна представлена на рис. 2.30.

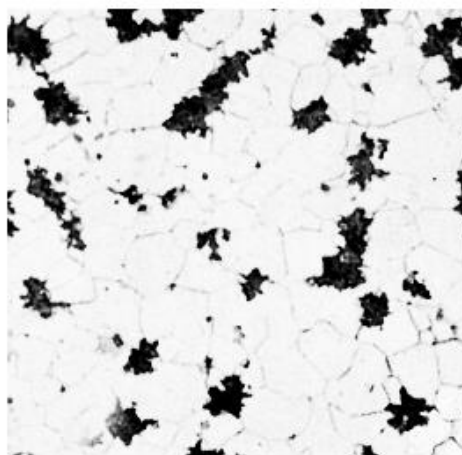


Рисунок 2.30 – Микроструктура ферритного ковкого чугуна

Название «ковкий» условное, деформировать ковкие чугуны нельзя. В обозначении ковкого чугуна первая цифра показывает значение предела прочности при растяжении (в кгс/мм²), вторая – относительное удлинение (в процентах), например, КЧ45–7.

В отличие от пластинчатого графита в сером чугуне хлопьевидные включения меньше снижают механические свойства металлической основы, что делает ковкий чугун прочнее серого, хотя он и уступает высокопрочному чугуну (табл. 2.6).

Таблица 2.6 – Механические свойства и структура некоторых марок ковкого чугуна (ГОСТ 1215-79)

Марка	σ_B , МПа	δ , %	НВ, МПа	Структура
КЧ30–6	300	6	1000–1630	Ф + до 10 % П
КЧ35–8	350	8	1000–1630	
КЧ37–12	370	12	1100–1630	
КЧ45–7	450	7	1500–2070	
КЧ60–3	600	3	2000–2690	Ф + до 20 % П
КЧ80–1,5	800	1,5	2700–3200	

Ковкие чугуны широко применяются в сельскохозяйственном, автомобильном машиностроении и др. Из них изготавливают детали высокой прочности, работающие в условиях износа при ударных и знакопеременных нагрузках.

Хорошие литейные свойства исходного белого чугуна позволяют получать отливки сложной формы и малой толщины (рис. 2.31): крышки картеров, редукторов, ступицы, муфты, втулки, звенья и ролики цепей конвейера.



Рисунок 2.31 – Изделия из ковкого чугуна

Недостатком ковких чугунов является их более высокая стоимость из-за продолжительного отжига.

Марки, свойства и примеры применения некоторых чугунов представлены в табл. 2.7.

Таблица 2.7 – Марки, свойства и примеры применения чугунов

Вид чугуна	Примеры маркировки	Свойства	Применение
Обычный серый	СЧ12-28 СЧ18-36	$\sigma_B = 12 \text{ кгс/мм}^2 = 120 \text{ МПа}$ $\sigma_H = 28 \text{ кгс/мм}^2 = 280 \text{ МПа}$ $\sigma_B = 18 \text{ кгс/мм}^2$; $\sigma_H = 36 \text{ кгс/мм}^2$	Станины; корпуса редукторов; тракторные отливки, поршневые кольца и др.
Высокопрочный чугун	ВЧ50-1,5 ВЧ45-5	$\sigma_B = 50 \text{ кгс/мм}^2 = 500 \text{ МПа}$ $\delta\% = 1,5\%$ $\sigma_B = 45 \text{ кгс/мм}^2$; $\delta\% = 5\%$	Коленчатые валы; арматура тоннелей метро; канализационные трубы; и др.
Ковкий чугун	КЧ35-10 КЧ45-6	$\sigma_B = 35 \text{ кгс/мм}^2 = 350 \text{ МПа}$ $\delta\% = 10\%$ $\sigma_B = 45 \text{ кгс/мм}^2$; $\delta\% = 6\%$	Литые детали машин, не испытывающие значительных растягивающих и ударных нагрузок.

σ_B - предел прочности при растяжении; $\delta\%$ - относительное удлинение после разрыва; σ_H – предел прочности при изгибе.

Чугуны со специальными свойствами.

Такие чугуны используют в различных отраслях машиностроения тогда, когда отливка кроме прочности должна обладать теми или иными специфическими свойствами (износостойкостью, химической стойкостью, жаростойкостью и т. п.).

Некоторые разновидности легированных чугунов представлены на рис. 2.32.

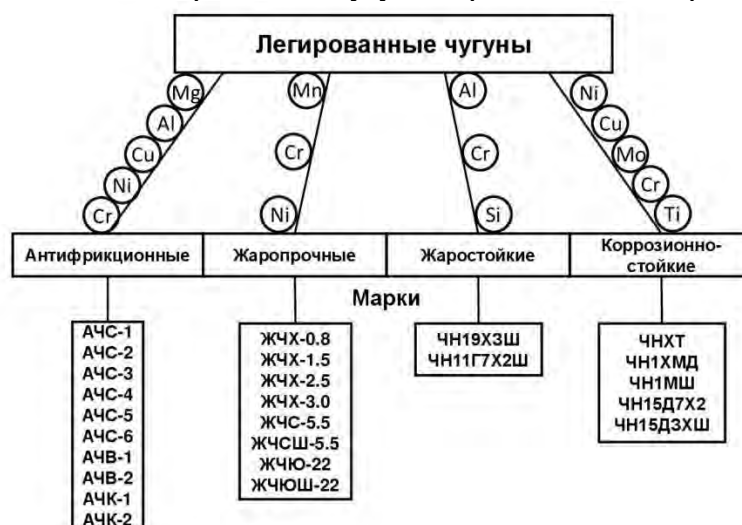


Рисунок 2.32 – Разновидности легированных чугунов

Магнитный чугун используют для изготовления корпусов электрических машин, рам, щитов и др. Для этой цели наилучшим является ферритный чугун с шаровидным графитом.

Немагнитный чугун используют для изготовления кожухов и бандажей различных электрических машин. Для этого применяют никелемарганцовистый чугун, содержащий 7–10 % Mn и 7–9 % Ni, а также марганцево-медистый чугун, в котором содержится 9,8 % Mn и 1,2–2,0 % Cu.

Аустенитный чугун имеет высокие показатели по кислотостойкости, щелочестойкости и жаропрочности. Примерами этих чугунов являются нирезист, содержащий 14 % Ni, 2 % Cr, 7 % Cu и никросилал с 5 % Si, 18 % Ni, 2 % Cr и др.

Жаростойкий чугун относится к типу серых высокопрочных сплавов, легирование которых осуществляется при помощи алюминия, кремния или хрома. Он устойчив к воздействию высоких температур.

Одним из представителей является жаростойкий чугун с высоким содержанием алюминия (19–25 %), называемый чугуном. Помимо алюминия чугун содержит 1,6–2,5 % С, 1–2 % Si, 0,4–0,8 % Mn, до 0,2 % P, до 0,08 % S. Обладает высокой жаростойкостью на воздухе (до 1100–1150 °С), которая сохраняется до 1000 °С в ряде агрессивных газовых сред (например, в атмосфере печных и сернистых газов, в парах серы); стоек в азотной кислоте, морской воде. Имеет удовлетворительные литейные свойства, поддается механической обработке.

Чугун пригоден для изготовления печной арматуры (фурм доменных печей, футеровочных плит в камерах сгорания газотурбинных установок, вытяжных зонтов криолитовых ванн и т. д.), а также может использоваться как коррозионно-стойкий, жаропрочный или немагнитный материал.

Также высокой жаростойкостью обладают аустенитные легированные чугуны. Основными легирующими элементами являются Mn, Ni и Cr. При получении в структуре шаровидного графита механические свойства заметно возрастают. Аустенитный чугун обладает также высокой жаропрочностью. Дополнительное легирование Mo повышает жаропрочность.

Некоторые виды жаростойких и жаропрочных чугунов приведены в табл. 2.8.

Таблица 2.8 – Марки, состав и механические свойства некоторых жаропрочных чугунов

Марка	Химический состав	σ_B , МПа	δ , %	НВ, МПа
ЧЮ22Ш	1,6–2,5 % С, 1–2 % Si, 19–25 % Al, до 0,8 % Mn, до 0,03 % S, до 0,2 % P	290	–	2410–3640
ЧЮ6С5	1,8–2,4 % С, 5,5–7 % Al, 4,5–6 % Si, до 0,8 % Mn, до 0,12 % S, до 0,3 % P	120	–	2350–3000
ЧН19Х3Ш	2,3–3 % С, 18–20 % Ni, 1,8–2,5 % Si, 1–1,6 % Mn, 1,5–3 % Cr, до 0,03 % S, до 0,1 % P	340	4	1200–2550
ЧН11Г7Ш	2,3–3 % С, 1,8–2,5 % Si, 5–8 % Mn, 10–12 % Ni, 1,5–2,5 % Cr, до 0,03 % S, до 0,08 % P	390	4	1200–2550
ЧС17М3	0,3–0,6 % С, 16–18 % Si, 2–3 % Mo, до 1 % Mn, до 0,1 % S, до 0,3 % P	60	–	3900–4500

Антифрикционный чугун также относится к чугунам специальных марок.

Этим материалам свойственен низкий коэффициент трения, который напрямую зависит от количественного соотношения в нем феррита и перлита, а также от объема и формы графита. Благодаря своей металлической основе перлитные сплавы отличаются высокой износостойкостью.

Фрикционными называются износостойкие чугуны, имеющие высокий коэффициент трения. Из них делают тормозные устройства различных механизмов.

Некоторые области применения износостойких и жаропрочных чугунов представлены на рис. 2.33.



Рисунок 2.33 – Применение износостойких и жаропрочных чугунов

Тема 2.3. Классификация легированных сталей. Конструкционные стали

Для формирования нужных свойств в сталь вводятся определенные элементы. Эти элементы называют легирующими, а *стали, содержащие легирующие элементы – легированными*.

В легированных сталях, по сравнению с углеродистыми, удалось повысить прокаливаемость, обеспечить более высокие антикоррозионные свойства и износостойкость, существенно увеличить другие характеристики.

В зависимости от содержания легирующих компонентов легированные стали подразделяют на:

- низколегированные (содержание легирующих компонентов, кроме углерода, не более 2,5%);
- среднелегированные (содержание легирующих компонентов, кроме углерода, 2,5–10%);
- высоколегированные (содержание легирующих компонентов, кроме углерода, свыше 10%).

Виды конструкционных нелегированных и легированных сталей, классифицируемых по качественным показателям представлены на рис. 2.34.



Рисунок 2.34 – Виды конструкционных нелегированных и легированных сталей, классифицируемых по качественным показателям

Классификация легированных сталей по назначению представлена на рис. 2.35.



Рисунок 2.35 – Классификация легированных сталей по назначению

Обозначение легирующих компонентов при маркировке сталей приведено в табл. 2.9 (жирным шрифтом выделены наиболее часто используемые элементы).

Таблица 2.9 – Обозначение легирующих компонентов

Легирующий компонент	Обозначение	Легирующий компонент	Обозначение
Азот	А	Медь	Д
Алюминий	Ю	Молибден	М
Бериллий	Л	Никель	Н
Бор	Р	Ниобий	Б
Ванадий	Ф	Самарий	Са
Вольфрам	В	Селен	Е
Кобальт	К	Титан	Т
Кремний	С	Фосфор	П
Магний	Мг	Хром	Х
Марганец	Г	Цирконий	Ц

В качестве легирующих элементов очень часто используются хром, кремний, марганец, вольфрам, молибден, кобальт, титан, ванадий, никель и др.

Эти элементы, будучи введенными в сталь, могут находиться в твердом растворе или в карбидной фазе.

Попадая в карбидную фазу, они могут при небольшой концентрации замещать часть атомов железа в цементите, и тогда карбид приобретает вид $(\text{Fe}, \text{Me})_3\text{C}$. Me – это тот элемент, который введен в сталь. Например, $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$.

При достаточной концентрации легирующего элемента и значительной его карбидообразующей способности в стали могут образовываться специальные карбиды – **MeC**, **Me₆C** и др. Например, при введении в сталь таких элементов, как хром, вольфрам, ванадий, могут образоваться карбиды **Cr₇C₃**, **Cr₂₃C₆**, **Fe₃W₆C**, **W₂C**, **VC**.

Эти карбиды имеют более высокую твердость, чем цементит, труднее диссоциируют и растворяются в аустените при нагреве, их частицы медленнее растут при повышенных температурах.

Следовательно, сталь, в структуре которой имеются специальные карбиды, будет более износостойкой и теплостойкой.

При большом количестве некоторых легирующих элементов в сталях и сплавах могут образовываться интерметаллические соединения. Примеры: Fe_2W , Co_7W_6 , Ni_3Ti .

Попадая в твердые растворы стали (аустенит, феррит, мартенсит), легирующие элементы также влияют на их свойства и температурную область существования.

Большинство легирующих элементов замедляют распад переохлажденного аустенита на феррито-цементитную смесь вследствие замедления скорости диффузии в аустените (исключение составляет кобальт). Это позволяет закалывать данные стали с охлаждением в более «мягких» средах, т.е. с более медленным охлаждением, чем при закалке углеродистых сталей ([подробно про закалку см. Раздел III](#)).

С-образные диаграммы для углеродистой и легированной эвтектоидной стали представлены на рис. 2.36.

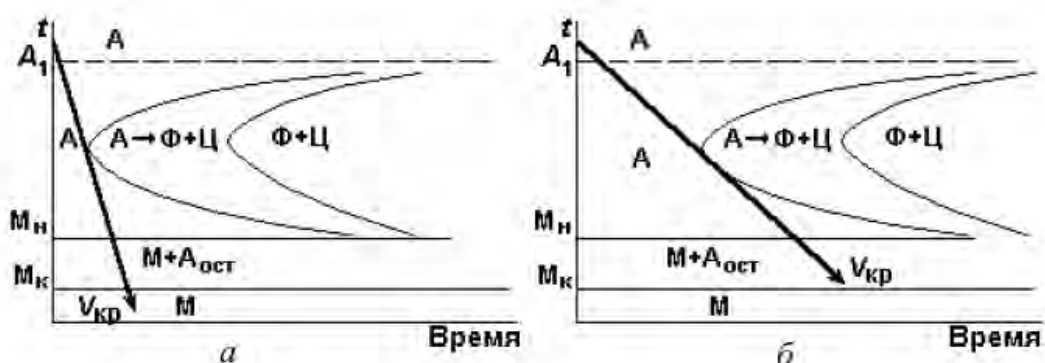


Рисунок 2.36 – С-образные диаграммы для углеродистой (а) и легированной (б) эвтектоидной стали

Это приводит к уменьшению критической скорости охлаждения при закалке и позволяет упрочнять закалкой более массивные изделия, с большим сечением по сравнению с изделиями, изготовленными из углеродистых сталей. Так, если прокаливаемость углеродистых сталей составляет 10–15 мм (критический диаметр), то у легированных сталей она достигает 100–200 мм и более.

По структуре после охлаждения на воздухе небольших образцов из аустенитного состояния различают несколько групп легированных сталей. Среди них стали перлитного класса, мартенситного и аустенитного классов. Стали перлитного класса обычно являются низколегированными, мартенситного класса – содержат больше легирующих элементов, а аустенитные стали – это высоколегированные материалы.

Легирующие элементы в марках сталей обозначаются следующими буквами (см. также табл. 2.9): Cr – X, Ni – Н, Mn – Г, Co – К, Si – С, W – В, V – Ф, Mo – М, Al – Ю, Ti – Т, В – Р, Cu – Д, Р – П, редкоземельные металлы – Ч.

Примеры марок конструкционных сталей:

12ГС (0,12 % C; 1 % Mn; 1 % Si),

50С2 (0,5 % C; 2 % Si),

40ХН (0,4 % C; 1 % Cr; 1 % Ni),

30Х2ГСН2ВМ (0,3 % C; 2 % Cr; 1 % Mn; 1 % Si; 2 % Ni; 1 % W; <1 % Mo).

Стали, легированные никелем, имеют низкий порог хладноломкости и более высокое сопротивление хрупкому разрушению, чем стали без никеля. Но использование для легирования никеля, а также вольфрама, молибдена, кобальта сильно удорожает сталь.

Так, порог хладноломкости (температура, при которой ударная вязкость стали уменьшается вдвое) углеродистой стали 40 составляет – (–20 °С), стали 40ХН – (–60 °С), а стали 30ХНЗ – (–100 °С).

Это особенно важно знать при выборе материала для деталей, работающих при низких температурах (например, в зимних условиях Сибири и Крайнего Севера).

Среди наиболее простых и дешевых конструкционных легированных сталей можно назвать марку 40Х. После закалки с 860 °С и отпуска при 500 °С она имеет следующие свойства: $\sigma_b = 1000$ МПа; $\sigma_{0,2} = 800$ МПа; $\delta = 10$ %; KCU = 500 КДж/м².

Более сложная и дорогая сталь 40ХНМА после закалки с 850 °С имеет $\sigma_b = 1100$ МПа; $\sigma_{0,2} = 950$ МПа; $\delta = 12$ %; KCU = 800 КДж/м².

Следует учитывать, что в высокопрочном состоянии стали обычно имеют низкую пластичность, поэтому в ряде случаев при действии больших динамических нагрузок может возникать опасность хрупкого разрушения.

Особое место среди конструкционных легированных сталей занимают так называемые мартенсито-стареющие стали. Это материал, в котором удастся получить лучшее сочетание прочностных и пластических свойств и, следовательно, высокую надежность при эксплуатации.

В этих сталях почти нет углерода (0,03 % С). Они легированы большим количеством никеля (10–25 %) и, кроме того, содержат кобальт, молибден, титан, алюминий.

После закалки с температур 800–860 °С в мартенсито-стареющих сталях получается практически безуглеродистый мартенсит, пересыщенный легирующими элементами. В таком мартенсите дислокации имеют хорошую подвижность, и поэтому в закаленном состоянии эти стали достаточно пластичны. Механические свойства после закалки: $\sigma_b = 900$ –1100 МПа; $\delta = 18$ –20 %. В таком состоянии сталь может подвергаться пластической деформации.

Затем закаленную сталь отпускают при температуре 450–500 °С (для мартенсито-стареющих сталей эта операция чаще называется старением). При этом из пересыщенного мартенсита выделяются избыточные элементы с образованием мелкодисперсных частиц интерметаллических соединений типа Ni₃Ti, NiAl, Fe₂Mo и др.

Эти частицы являются сильными препятствиями для движения дислокаций и упрочняют материал. Поэтому после старения сталь имеет высокие прочностные свойства при более низкой, по сравнению с закаленным состоянием, пластичности.

Например, сталь H18K9M5T после закалки и старения (отпуска) имеет характеристики: $\sigma_b = 2100$ МПа; $\sigma_{0,2} = 1900$ МПа; $\delta = 8$ %; KCU = 500 КДж/м².

При несколько более низкой прочности (в 1800 МПа) может быть получено относительное удлинение до 15 %.

При многих хороших свойствах мартенсито-стареющие стали имеют один существенный недостаток. За счет большого количества дорогих легирующих элементов они имеют высокую стоимость. Поэтому применяются в основном для ответственных изделий в таких отраслях, как ракетостроение, авиация, судостроение и т. п.

Среди конструкционных есть стали с более высоким содержанием углерода, предназначенные для изготовления деталей машин, работающих в условиях износа. Таковыми деталями, например, являются подшипники качения (их кольца, шарики, ролики) (рис. 2.37). Для них требуется высокая прочность и износостойкость.

Для изготовления такого рода деталей применяются стали ШХ15, ШХ15СГ. Буква «Ш» означает «шарикоподшипниковая», содержание хрома здесь показано в десятых долях процента, т.е. в этих марках 1,5 % Cr. Углерода в них содержится 1,0 %. После закалки и низкотемпературного отпуска стали ШХ15 и ШХ15СГ имеют твердость 61–63 HRC.



Рисунок 2.37 – Использование подшипниковых сталей для различных конструкций подшипников

Марка ШХ15СГ используется для более крупных подшипников, так как она имеет более высокую прокаливаемость за счет содержания в ней кремния и марганца.

Тема 2.4. Инструментальные стали и сплавы

Инструментальные стали – это материалы, предназначенные для изготовления различных видов инструмента: режущего, штампового и мерительного. При обозначении марок инструментальных сталей используются те же принципы, что и для конструкционных сталей, только содержание углерода указывается в десятых долях процента.

Например, сталь 9ХС содержит 0,9 % С; 1 % Cr; 1 % Si; сталь 4Х8В2 – 0,4 % С; 8 % Cr; 2 % W.

В некоторых марках не указывается содержание углерода. Представителями таких сталей являются ХВГ, Х12М и др. В этом случае содержание углерода можно узнать только из справочника или ГОСТа. Так, в стали ХВГ содержится 0,95 % С, а в Х12М – 1,6 % С.

Среди инструментальных сталей можно выделить по назначению несколько подгрупп:

- а) для режущего инструмента, работающего с небольшим разогревом (до 350 °С);*
- б) для режущего инструмента, работающего в более тяжелых условиях, с разогревом до 500–650 °С;*
- в) для штампов холодного деформирования металла;*
- г) для штампов горячего деформирования металла;*
- д) для мерительного инструмента.*

Инструмент **подгруппы «а»** изготавливается из низколегированных сталей типа **9ХС, ХВГ**. После закалки и отпуска они имеют твердость 62–64 HRC.

Для подгруппы «б» используются стали с большей теплостойкостью и, соответственно, содержащие большее количество легирующих элементов. Здесь речь идет о высокопроизводительном режущем инструменте, работающем со значительным разогревом. Примерами такого инструмента могут быть токарные резцы, сверла, фрезы, развертки и т.п. (рис. 2.38). В качестве материала для их изготовления используются быстрорежущие стали. **Обозначаются быстрорежущие стали буквой Р, стоящей в начале марки.** Затем следует **цифра, показывающая процентное содержание основного элемента – вольфрама.** После этого в марке могут указываться некоторые другие элементы и их количество обычным образом. Но у быстрорежущих сталей в марке показываются не все элементы. Полный состав стали можно узнать только из справочника или ГОСТа.

Примерами сталей этого типа являются:

сталь Р18 (0,75 % С; 4 % Cr; 18 % W; 1 % V),

сталь Р6М5 (0,85 % С; 4 % Cr; 6 % W; 5 % Mo; 2 % V),

сталь Р9К10 (0,95 % С; 4 % Cr; 9 % W; 10 % Co; 2,3 % V; 1 % Mo).



Рисунок 2.38 – Виды инструментов из быстрорежущей стали

Поскольку в этих материалах содержится много специальных карбидов, труднорастворимых в аустените при нагреве, закалку их производят с высоких температур: 1220–1280 °С. Затем делается трехкратный отпуск при температурах 550–580 °С, после чего получается твердость 62–67 HRC и высокая теплостойкость (до 600–650 °С).

Для штампов холодного деформирования металла (подгруппа «в») используются низколегированные инструментальные стали типа **ХВГ, 9ХС**, а для инструмента, работающего в более тяжелых условиях, – высокохромистые стали типа **Х12М** (1,6 % С; 12 % Cr; 0,5 % Mo; 0,2 % V). Это более износостойкая сталь, так как в структуре ее после закалки и отпуска, кроме мартенсита, содержится большое количество очень твердых карбидов хрома Cr_7C_3 . После упрочняющей термической обработки эти стали получают твердость 61–64 HRC.

Штамповый инструмент для горячего деформирования металла (подгруппа «г»), работающий при температурах до 500 °С, изготавливается из низколегированных среднеуглеродистых сталей. Здесь используются марки **5ХНТ, 5ХНМ, 5ХГМ**, содержащие 0,5 % С. Штампы, работающие с более высоким разогревом (550–700 °С), изготавливают из теплоустойчивых среднеуглеродистых сталей типа **3Х2В8Ф, 4Х5В2ФС, 4Х2В5ФМ**. Такой инструмент после закалки и отпуска имеет твердость 45–52 HRC и более высокие вязкость и пластичность, чем другие инструментальные стали.

Для изготовления мерительных инструментов (это штангенциркули, калибры, шаблоны, микрометры и т. п.) применяются стали с высокой износостойкостью. Это обусловлено тем, что от мерительного инструмента требуется постоянство размеров в течение длительного времени эксплуатации. Поэтому здесь используются высокоуглеродистые низколегированные стали, такие, как **9ХС, ХВГ**.

Мерительный инструмент подвергается закалке и низкотемпературному отпуску на твердость 63–64 HRC.

Виды и примеры марок инструментальных сталей представлены на рис. 2.39.



Рисунок 2.39 – Виды и примеры марок инструментальных сталей

Характеристики инструментальных сталей и сплавов представлены в табл. 2.10.

Таблица 2.10 – Характеристики инструментальных сталей и сплавов

Материалы	Твердость	Прочность, МПа	Теплостойкость, °С	Область применения
Инструментальные углеродистые стали У10, У10а – У13, У13А	63-66 HRC	1720-2900	200-250	Ручной инструмент, напильники, зубила, шаберы, деревообрабатывающий инструмент (сверла, фрезы, метчики)
Инструментальные легированные стали 9ХС, ХВГ, ХВГС, Х12, Х12М, Х6ВФ	63-66 HRC	2200-3400	200-250	Сверла, развертки, протяжки, плашки, метчики
Быстрорежущие стали P9, P12, P18, P6M5, P9K5, P9K10, P9M4K8, P18Ф2	63-66 HRC	2500-3300	620-640	Инструмент для обработки конструкционных и специальных материалов. Сверла, фрезы, развертки, зенкеры, протяжки, плашки, метчики
Твердые сплавы ВК3, ВК6, ВК8, Т5К10, Т15К6, ТТ7К12	87-92 HRA	1100-1650	750-850	Токарный, фрезерный, осевой инструмент. Черновая и чистовая обработка
Минералокерамика В-3, ВОК-63	93-94 HRA	950-980	1200-1400	Получистовая и чистовая обработка
Сверхтвердые материалы	До 96000 МПа	500-700	700-1400	Чистовая обработка

Применение сменных пластин из твердых сплавов для режущего инструмента показано на рис. 2.40.



Рисунок 2.40 – Применение сменных пластин из твердых сплавов для режущего инструмента

Классификация твердых сплавов представлена на рис. 2.41.

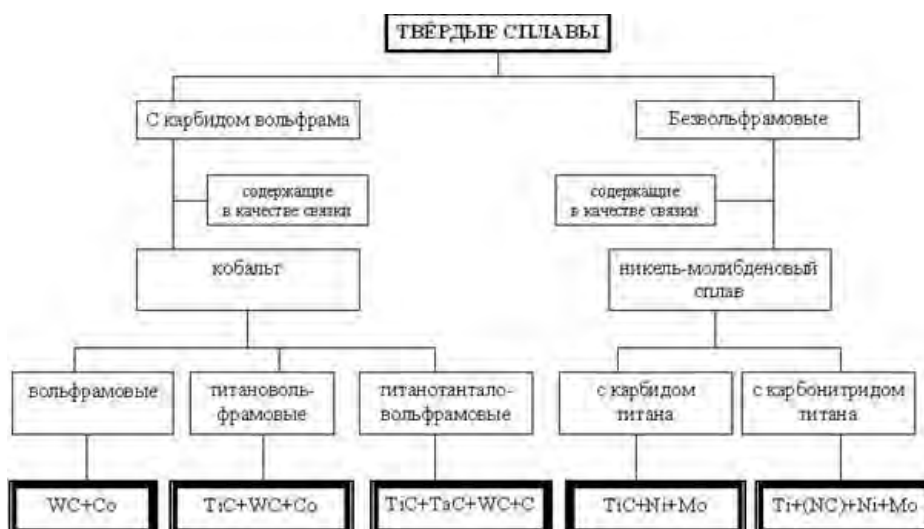


Рисунок 2.41 – Классификация твердых сплавов

Маркировка твердых сплавов

Вольфрамовые сплавы

Маркируются буквами **ВК** и цифрой, показывающей содержание **кобальта** в %. Остальное – **карбид вольфрама** (**не вольфрам!!!**).

Примеры: ВК3, ВК6, ВК8, ВК10, ВК20

Титановольфрамовые сплавы

Маркируются буквами **Т** и **К** и цифрами за этими буквами, показывающими содержание **карбида титана** и **кобальта** в %.

Примеры: Т30К4, Т15К6, Т5К10 и др.

Титанотанталовольфрамовые сплавы

Маркируются буквами **ТТ** и **К** и цифрами, показывающими содержание **карбидов титана** и **карбидов тантала** в сумме и **кобальта** в %.

Примеры: ТТ7К12, ТТ8К6, ТТ20К9 и др.

Безвольфрамовые сплавы

Маркируются буквами **Т** и **Н** и цифрой, показывающей содержание **Ni** и **Mo** в %, остальное **карбид титана**.

Примеры: ТН-20, ТН-30 и др.

Микроструктура твердого сплава Т5К10 показана на рис. 2.41а.

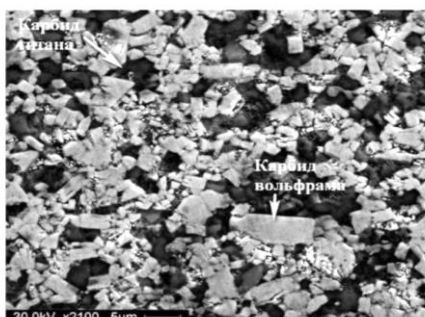


Рисунок 2.41а – Микроструктура твердого сплава Т5К10

Тема 2.5. Жаростойкие, жаропрочные, нержавеющие, износостойкие стали и сплавы

Стали с особыми свойствами – это группа материалов, в которых путем легирования повышен уровень определенных свойств, необходимых в конкретных условиях работы изделий. Стали с особыми свойствами предназначены для изготовления изделий, работающих в каких-то специфических условиях. Такими условиями могут быть высокие температуры, коррозионные среды, интенсивный износ, необходимость высоких магнитных свойств и т. д.

В соответствии с этим среди сталей с особыми свойствами можно выделить несколько подгрупп: жаропрочные, жаростойкие, коррозионностойкие (нержавеющие), износостойкие стали и др.

Жаропрочные стали – это материалы, предназначенные для изделий, работающих при высоких температурах под нагрузкой. Для таких условий работы необходимо, чтобы материал имел достаточную прочность и сопротивление деформации при высоких температурах.

Предел ползучести показывает, какой гарантированный ресурс работы (в часах) имеет сталь при определенной температуре под действием напряжений определенной величины без значительной пластической деформации. (Обычно допустимая деформация ограничивается 1 %.)

Предел длительной прочности – это максимальное напряжение, которое сталь выдерживает при заданной температуре эксплуатации в течение заданного срока эксплуатации без разрушения.

Для деталей, работающих под нагрузкой при температурах до 500–550 °С, используются низколегированные стали типа 15ХМ, 12ХМФ.

При более высоких температурах эксплуатации (600–650 °С) применяются стали, содержащие большее количество легирующих элементов: 12Х2МФБ, 12Х2МВ8ФБ и т. п.

Изделия, работающие при еще более высоких температурах (650–750 °С), изготавливают из высоколегированных жаропрочных сталей – 40Х14Н14В2М, 40Х12Н8Г8МФБ.

При более высоких температурах (выше 750–800 °С) в качестве жаропрочных материалов используются сплавы на основе никеля или кобальта, а при температурах выше 1000 °С применяются сплавы на основе молибдена (до 1500 °С) и на основе вольфрама (до 2500 °С).

Жаропрочные стали широко применяются для изготовления деталей топливной аппаратуры, паровых котлов, турбин, ракет, двигателей внутреннего сгорания и др.

Жаростойкие стали – это материалы, предназначенные для изготовления деталей, работающих в ненагруженном состоянии при высоких температурах. Для них требуется хорошее сопротивление окислению в газовых средах при высоких температурах.

Примерами таких изделий могут быть детали печного оборудования, нагреватели печей, клапаны двигателей внутреннего сгорания и т.п. Оксиды железа обладают плохими защитными свойствами. Поэтому для обеспечения необходимой жаростойкости сталей в них вводят, как правило, определенное количество таких элементов, как хром, алюминий, кремний, никель, что способствует формированию на поверхности изделий качественных защитных окисных пленок.

Степень легированности, т.е. количество введенных в сталь элементов, зависит от требуемого уровня жаростойкости.

Некоторые марки жаростойких сталей и максимальные температуры их применения: сталь 15Х5М – 600–650 °С, сталь 40Х9С2 – 850 °С, сталь 12Х17 – 900 °С, стали 15Х25Н19С2, 36Х18Н25С2 – 1100 °С.

Особенно сильно на сопротивление стали окислению в газовой среде влияет хром (рис. 2.42).

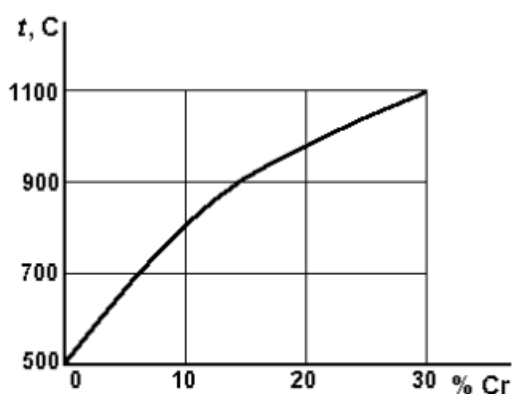


Рисунок 2.42 – Влияние хрома на жаростойкость стали

Коррозионностойкие (нержавеющие) стали – это материалы, устойчивые к воздействию агрессивной окружающей среды.

Значительное количество деталей, изделий в современной технике работает в активной с различной степенью агрессивности среде. Такой средой могут быть воздух, вода, морская вода, пар, растворы солей, щелочей, кислот и т. п.

Основным элементом, обеспечивающим такие свойства стали, является хром. **Причем для того чтобы сталь стала нержавеющей, коррозионностойкой, необходимо ввести хрома не менее 12,5 %.** При таком количестве хрома электрохимический потенциал стали становится положительным, что препятствует коррозии.

Наиболее простыми нержавеющими сталями являются марки **20X13, 30X13, 40X13**, содержащие 13 % хрома. Эти стали могут подвергаться упрочняющей термической обработке (закалке и отпуску) на твердость 40 HRC для стали 30X13 и 50 HRC для 40X13.

Поэтому данные марки сталей могут применяться для изготовления коррозионно-стойких деталей с повышенной прочностью. Используются такие стали для следующих изделий: лопаток паровых турбин, компрессоров, клапанов гидравлических устройств, шестерен, валов, болтов, работающих в условиях агрессивных сред, бытового инструмента и т. п.

Стали с 13 % хрома имеют достаточно хорошую коррозионную стойкость в таких средах, как влажная атмосфера, водяной пар, вода, некоторые органические кислоты и др.

Если для коррозионно-стойкого материала требуется высокая твердость и износостойкость, то можно использовать высокоуглеродистую хромистую сталь марки **95X18**. После закалки и отпуска у нее получается твердость 60 HRC. Примером применения такого материала являются подшипники качения, работающие в агрессивных средах, инструмент и т. п.

Для увеличения коррозионной стойкости в сталь вводится 17 % Cr и иногда до 28 % Cr. Примерами таких нержавеющих сталей являются **12X17, 08X17T, 15X28, 15X25T**. Поскольку это низкоуглеродистые стали, то высокую прочность и твердость в них нельзя получить. Но они имеют высокое сопротивление коррозии, в том числе и при высоких температурах.

Хорошие антикоррозионные свойства имеют хромоникелевые стали. При добавлении к хромистым сталям никеля их можно с помощью закалки перевести в однофазное состояние (аустенит). А это положительно сказывается на сопротивлении коррозии.

Среди хромоникелевых нержавеющих сталей имеются марки **17X18H9, 08X18H10T, 10X17H13M3T** и др.

Хромоникелевые стали имеют хорошую коррозионную стойкость в средах с азотной, фосфорной кислотами, в растворах солей и щелочей, в морской воде, во влажном воздухе. Для увеличения коррозионной стойкости в кислотных средах в сталь дополнительно вводят молибден и медь. Примером такой марки является 06X23H28M3ДЗ. Эта сталь имеет очень хорошую коррозионную стойкость, но за счет большого количества легирующих элементов она очень дорогая.

Износостойкие стали – это материалы, предназначенные для работы в условиях изнашивающих нагрузок, часто при интенсивном износе.

При формировании структуры износостойких сталей учитывают, что чем выше их твердость и чем больше в них содержится твердых избыточных карбидов, тем выше сопротивление износу. Поэтому данные стали, как правило, высокоуглеродистые и легированы карбидообразующими элементами (Cr, V, W, Ti и др.).

В качестве износостойких используются следующие марки сталей: ХВГ (0,95 % С), ХВ4Ф (1,35 % С), Х6ВФ (1,1 % С), 9ХС, Х12 (2,1 % С), Х12МФ (1,55 % С) и др.

Наиболее высокой износостойкостью из этого ряда обладают стали Х12, Х12МФ и ХВ4Ф за счет большого содержания углерода и наличия в структуре после закалки и отпуска твердого мартенсита и большого количества специальных карбидов.

Для формирования необходимых свойств детали из износостойких сталей обязательно подвергаются упрочняющей термической обработке (закалке и отпуску).

Особое место среди износостойких материалов занимают высокомарганцовистые высокоуглеродистые стали. Представителем их является сталь Гадфильда 120Г13. За счет большого содержания марганца (13 %) точки M_n и M_s на С-образной диаграмме этой стали смещены вниз, в область более низких температур. Поэтому при закалке в стали получается аустенитная структура. Режим закалки стали 120Г13 – нагрев до 1100 °С и охлаждение в воде. Особенностью сталей типа 120Г13 является их высокая износостойкость при сильном динамическом, ударном нагружении. При этом происходит наклеп аустенита и сильное его упрочнение.

Электротехническая сталь – сталь с высокой магнитной проницаемостью (трансформаторная сталь). Основной легирующий элемент – кремний, его содержание указывается после буквы Э, а остальной хим. состав можно определить по справочнику. Примеры: Э11-Э41 (1-4 процентное содержание кремния, 1 – № группы по справочнику).

Тема 2.6. Цветные металлы и сплавы

Один из вариантов общей классификации цветных металлов представлен на рис. 2.43.

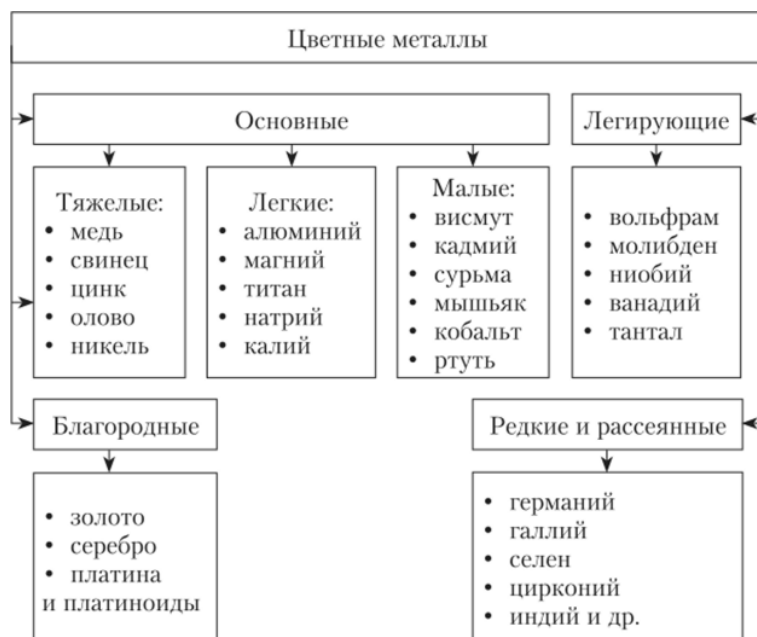


Рисунок 2.43 – Классификация цветных металлов

Алюминий и его сплавы

Для получения железа из руды как правило используют карботермические способы восстановления. Для этого можно использовать различные углеродсодержащие материалы в том числе присутствующие в природе, например, древесный уголь (можно легко получить из древесины). Первичный алюминий получают электролитическим восстановлением оксида алюминия, растворенного в расплавленном криолите. Чем выше энергозатраты на производство металла, тем больше его стоимость и влияние на окружающую среду. В среднем на тонну полученного алюминия расходуется около 14500 кВт·ч/т электрической энергии. При последующем переплаве алюминия и его сплавов требуется менее 800 кВт·ч/т поэтому сортировка и вторичная переработка (рециклинг) алюминиевых сплавов имеет очень важное значение.

Свойства алюминия представлены в табл. 2.11.

Таблица 2.11 – Свойства алюминия

Характеристика	Значение	Комментарий
Решётка	ГЦК	$a = 0,40496$ нм
Плотность, г/см ³	2,7	Низкая (относится к лёгким металлам)
Температура плавления, °C	660	Низкая
Удельное электро-сопротивление, 10 ⁻⁸ Ом·м	2,8	Низкое (проводниковый металл, уступает Ag и Cu)
Теплопроводность, Вт/(м·К)	228	Высокая
Распространённость в земной коре, %	8	Высокая (у Fe 5 %)
Объём производства, млн. т/г	>40	Лидер среди цветных металлов
Коррозионная стойкость	Высокая	$V_{уд}(Al) \approx V_{уд}(Al_2O_3)$

Микроструктура литого алюминия показана на рис. 2.44.



Рисунок 2.44 – Микроструктура литого алюминия

Маркировка алюминия

Пример марки: А5

Расшифровка (по ГОСТ 11069-2001):

А – алюминий, 5 – цифра (или цифры) после цифр 99 и запятой в значении содержания основного металла в процентах, т.е. А5 содержит 99,5 % Al.

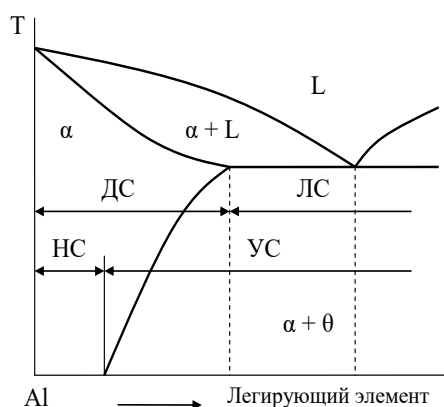
Алюминий **особой чистоты**: марка А999.

Алюминий **высокой чистоты**: марки от А95 до А995.

Алюминий **технической чистоты**: марки от А0 до А85.

В марках А5Е и А7Е буква Е указывает на предназначение алюминия для электротехнических целей.

Диаграмма состояния алюминий – легирующий элемент (схема) представлена на рис. 2.45.



ДС – деформируемые сплавы;
 ЛС – литейные сплавы; НС – неупрочняемые сплавы;
 УС – сплавы, упрочняемые термической обработкой (подвергаемые закалке с последующим старением)

Рисунок 2.45 – Диаграмма состояния алюминий – легирующий элемент

Классификация некоторых распространенных алюминиевых сплавов по технологическим свойствам представлена на рис. 2.46.



Рисунок 2.46 – Классификация алюминиевых сплавов по технологическим свойствам

Магниево-алюминиевые сплавы

Магниево-алюминиевые сплавы, несмотря на сложность их производства, получили широкое применение в ряде отраслей техники. Они легки, поглощают вибрацию, что и определяет их использование в авиации, ракетной технике и транспорте. Магниево-алюминиевые сплавы хорошо обрабатываются резанием, но уступают алюминиевым по пластичности и коррозионной стойкости.

Наиболее распространенными магниевыми сплавами являются сплавы с алюминием и цинком. Эти элементы обеспечивают высокую прочность до температур 150...200 °С.

Магниево-алюминиевые сплавы делятся на две основные группы: деформируемые (обозначают МА) и литейные (МЛ). По своему применению эти сплавы могут иметь как общее назначение, так и специальное, т.е. они могут эксплуатироваться как высокопрочные и жаропрочные. Для предохранения от коррозии изделия из магниевых сплавов оксидируют, а затем наносят лакокрасочные покрытия.

Применяют магниевые сплавы в авиации (кромки крыльев, корпуса приборов и др.), ракетной технике (корпуса, топливные и кислородные баки), для кожухов приборов электронной аппаратуры, в управляемых снарядах и т.п.

Медь

Медь – пластичный переходный металл золотисто-розового цвета.

Основные свойства: плотность – $8,95 \text{ г/см}^3$; температура плавления – $1083 \text{ }^\circ\text{C}$; решётка – ГЦК; высокая электро- и теплопроводность.

Медь – один из первых металлов, хорошо освоенных человеком из-за доступности для получения из руды и малой температуры плавления. Этот металл часто встречается в природе в самородном виде. В чистом виде медь широко используется в электроэнергетике. Марки проводниковой меди представлены в табл. 2.12.

Таблица 2.12 – Марки проводниковой меди

Марка	M3	M2	M1	M0	M00
% Cu (масс.)	99,5	99,7	99,9	99,95	99,99

Чистая медь достаточно пластичный, но недостаточно прочный материал для использования в качестве конструкционного (табл. 2.13).

Таблица 2.13 – Свойства меди в литом и горячедеформированном состоянии

Состояние	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Литое	160	35	25
Горячедеформированное	250	95	50

Широко используются медные сплавы, многие из которых освоены человечеством еще в древности. Классификация медных сплавов представлена на рис. 2.47. Для получения сплавов на основе меди к ней добавляют необходимые легирующие элементы (ЛЭ), это позволяет получить более прочные чем исходная медь материалы и использовать их в качестве конструкционных.

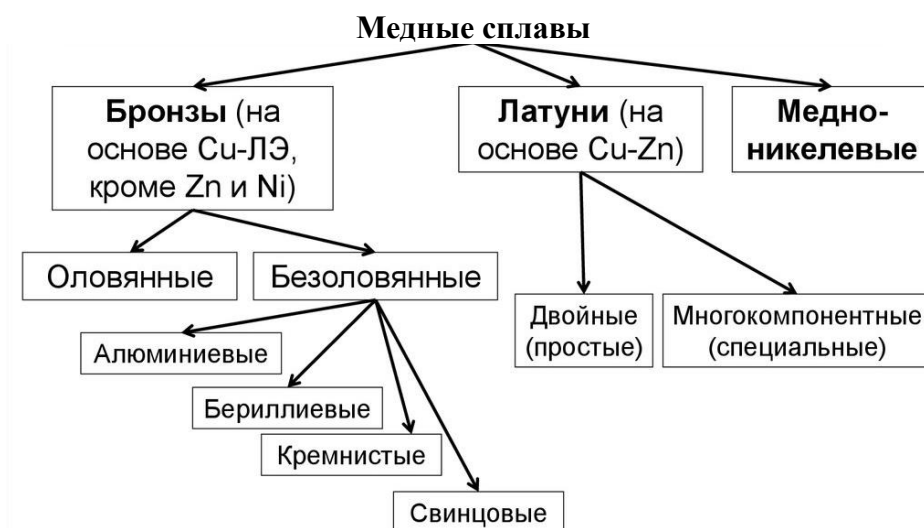


Рисунок 2.47 – Классификация медных сплавов

Классификация оловянных бронз

Деформируемые

Характеристика: Однофазные, среднелегированные, с высокой пластичностью

Свойства оловянных деформируемых бронз представлены в табл. 2.14.

Таблица 2.14 – Свойства оловянных деформируемых бронз

Марка	σ_B , МПа	δ , %
БрОФ4-0,25	340	52
БрОФ6,5-0,15	400	65
БрОЦ4-3	350	40
БрОЦС4-3,5-2,5	350	40

Литейные

Характеристика: двухфазные, с $(\alpha+\delta)$ -эвтектоидом, высоколегированные, с хорошей жидкотекучестью.

Свойства оловянных литейных бронз представлены в табл. 2.15.

Таблица 2.15 – Свойства оловянных литейных бронз

Марка	σ_B , МПа	δ , %
БрО10Ф1	250	7
БрО5Ц5С5	180	4

Латунь – двойной или многокомпонентный сплав на основе меди, где основным легирующим компонентом является цинк (до 50%), иногда с добавлением олова (меньшим, чем цинка, иначе получится традиционная оловянная бронза), никеля, свинца, марганца, железа и других элементов. По металлургической классификации к бронзам не относится.

Медно-цинковые сплавы отличаются большей твёрдостью, чем исходные металлы.

Томпак – двойные латуни, содержащие до 20 % Zn (при этом полутомпак – латуни, содержащие 14–20 % Zn). Обладает высокой пластичностью, антикоррозионными и антифрикционными свойствами, хорошо сваривается со сталью. Его применяют для изготовления биметалла «сталь-латунь». Благодаря золотистому цвету томпак используют для изготовления художественных изделий и фурнитуры.

Маркировка латуней

Система обозначений отличается для обрабатываемых давлением (ГОСТ 15527) и литейных (ГОСТ 17711) латуней. У обрабатываемых давлением латуней сначала идёт буква «Л», после чего следуют все буквы нормируемых элементов кроме цинка, а потом список цифр процентного содержания элементов в том же порядке, кроме цинка. Содержание цинка и нежелательных примесей – оставшаяся до 100 % масса.

Например:

Л70 – латунь, содержащая 70 % меди. Остальное – цинк и загрязняющие примеси.

ЛАЖ60-1-1 – латунь с 60 % меди, легированную 1 % алюминия (А) и 1 % железа (Ж). Оставшееся до 100 % это цинк и загрязняющие примеси.

У литейных латуней (ГОСТ 17711) среднее содержание компонентов сплава в процентах ставится сразу после буквы, обозначающей его название. При этом первым нормируется содержание цинка, поэтому литейные марки начинаются с букв «ЛЦ». Доля меди и нежелательных примесей вычисляется как остаток до 100 %.

Например:

ЛЦ40Мц1,5 – латунь содержит 40 % цинка (Ц) и 1,5 % марганца (Мц). Оставшееся до 100 % – это медь и загрязняющие примеси.

Применение латунейДвойные деформируемые латуни

Детали машин, приборов теплотехнической и химической аппаратуры, змеевики, сильфоны и др. Л96, Л90, Л85, Л80

Гильзы химической аппаратуры, отдельные штампованные изделия Л70

Большинство штампованных изделий Л68

Гайки, болты, детали автомобилей, конденсаторные трубы Л63

Толстостенные патрубки, гайки, детали машин Л60

Многокомпонентные деформируемые латуни

Детали химической аппаратуры, электромашин, морских судов ЛАН59-3-2

Вкладыши подшипников, детали самолетов, морских судов ЛЖМа59-1-1

Манометрические и конденсаторные трубки ЛН65-5

Гайки, болты, арматура, детали машин ЛМц58-2

Конденсаторные трубы теплотехнической аппаратуры ЛО90-1, ЛО70-1, ЛО62-1, ЛО60-1

Гайки, болты, зубчатые колеса, втулки ЛС60-1

Коррозионностойкие детали машин ЛК80-3

Пружины, манометрические трубки ЛАНКМц75- 2- 2,5- 0,5- 0,5

Литейные латуни коррозионностойкие, обычно с хорошими антифрикционными свойствами, с хорошей жидкотекучестью, малой склонностью к ликвации

Литейные латуни

Детали арматуры ЛЦ16К4

Массивные червячные винты, гайки нажимных винтов ЛЦ23А6ЖЗМц2

Коррозионностойкие детали ЛЦ3ОА3

Литые детали арматуры, втулки, сепараторы, подшипники ЛЦ40С

Штуцера гидросистемы автомобилей ЛЦ25С2

Микроструктуры бронзы и латуни представлены на рис. 2.48 и 2.49.



Рисунок 2.48 – Микроструктура бронзы



Рисунок 2.49 – Микроструктура латуни Л62

Титан и титановые сплавы

Титан в нормальных условиях – это лёгкий металл серебристо-белого цвета. Обладает высокой коррозионной стойкостью в растворах щелочей и большинства кислот. Устойчив к коррозии благодаря оксидной плёнке, но при измельчении в порошок, а также в тонкой

стружке или проволоке титан пирофорен. Титановая пыль имеет свойство взрываться. Температура вспышки – 400 °С. Титановая стружка пожароопасна.

С азотом N_2 выше 400 °С титан образует нитрид TiN (широко используется для нанесения декоративных и износостойких покрытий в вакуумных установках). Титан – один из немногих элементов, которые горят в атмосфере азота.

При взаимодействии титана с углеродом образуется карбид титана TiC .

При нагревании Ti поглощает H_2 с образованием соединения переменного состава TiH_2 . При нагревании эти гидриды разлагаются с выделением H_2 .

Титан образует сплавы и интерметаллические соединения со многими металлами.

Титан отличается хорошими механическими характеристиками, сочетая прочность и пластичность. К примеру, для технического титана марки ВТ1-0 эти показатели составляют: $\sigma_B = 375\text{--}540$ МПа, $\sigma_{0,2} = 295\text{--}410$ МПа, $\delta = 20\%$, что сравнимо с характеристиками многих углеродистых и хромоникелевых коррозионностойких стальных сплавов.

Титан и титановые сплавы образуют прочные и пластичные сварные швы при использовании контактной и аргодуговой сварки. К минусам этих материалов следует отнести то, что они плохо поддаются резанию. Причина – налипание на режущий инструмент, низкая теплопроводность и плохие антифрикционные свойства.

Применение титана:

- Гражданская и военная авиация;
- Судостроение (гребные винты, обшивка морских судов и подводных лодок, торпеды);
- Детали ракет и спутников;
- Криогенная техника;
- Химическая, нефтехимическая, пищевая промышленность (опреснители, емкости, трубопроводы, клапаны);
- Строительство;
- Ядерная техника;
- Медицина (инструмент, имплантаты);
- Спорт, украшения;
- Вооружения (броневые плиты, элементы боеприпасов).

Учитывая высокую коррозионную стойкость и хорошую биосовместимость титан широко применяется в медицине в качестве материала различных имплантов (рис. 2.50), а также хирургических инструментов.



Рисунок 2.50 – Применение титана в медицине

Примеры применения титана в промышленности представлены на рис. 2.51.



Рисунок 2.51 – Применение титана в промышленности

Титановые сплавы

Главная цель легирования титана – повышение его механических свойств.

Al, Fe, Mn, Cr, Sn, V – повышают прочность титана, несколько снижая при этом пластичность и вязкость.

Al, Mo, Zr, Sn – увеличивают жаропрочность.

Mo, Zr, Nb, Ta – повышают коррозионную стойкость.

Среди титановых сплавов выделяют три большие группы – высокопрочные конструкционные сплавы, жаропрочные сплавы и сплавы на основе химического соединения.

По области применения также выделяют литейные и деформируемые сплавы.

По разработчику титановых сплавов выделяют три большие группы - ВТ, ПТ и ОТ.

Свойства некоторых титановых деформируемых и литейных сплавов представлены в табл. 2.16, 2.17.

Таблица 2.16 – Механические свойства некоторых титановых сплавов

Марка сплава	Термическая обработка	Временное сопротивление σ_B , МПа	Коэффициент обрабатываемости K_M *
BT1	Отжиг	450...700	0,45
BT3	То же	950...1150	0,18
OT4	»	700...900	0,25
BT5	»	700...950	0,20
BT6	»	900...1000	0,20
BT14	»	1000	0,18
BT15	»	1000	0,18
BT14	Закалка + старение	1150...1300	0,14
BT15	То же	1300...1500	0,14

* По сравнению со сталью 45.

Таблица 2.17 – Химический состав и механические свойства некоторых титановых сплавов

Марка сплава	Средний химический состав сплава, мас. %	Механические свойства, не менее				
		$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	$a_{\text{н}}$, МДж / м ²
BT1Л	Технический титан	343	294	10	20	0,49
ТЛ-3	Ti-4,5Al	588	539	8	16	0,4
BT5Л	Ti-5,2Al	686	627	6	14	0,3
BT20Л	Ti-5,5Al-2Zr-1Mo-1V	932	823	5	13	0,25
BT21Л	Ti-6Al-5Zr-1V-0,7Mo-0,35Cr-0,2W	981	902	4	8	0,2
BT6Л	Ti-6Al-4V	882	804	5	12	0,25
BT3-1Л	Ti-6Al-2,5Mo-1,5Cr-0,2Si-0,5Fe	932	814	4	8	0,25
BT9Л	Ti-6Al-3,3Mo-1,5Zr-0,3Si	932	855	4	8	0,2
BT14Л	Ti-5Al-3,5Mo-1,5V-0,3Cr-0,4Fe	883	785	5	12	0,25
BT23Л	Ti-5,5Al-2Mo-4,5V-1Cr-0,7Fe	990	880	4	8	0,25
BT18УЛ	Ti-6,5Al-4Zr-3Sn-1Nb-0,7Mo-0,2Si	905	821	12	24	0,3
BT35Л	Ti-3Al-15V-3Cr-3Sn-1,2Zr-1Mo	1110	980	6	16	0,25
BTЛ1	Ti-5Al-1Si	835	736	5	12	0,15

Никелевые сплавы

Широко известен сплав никеля с титаном в соотношении близком к 55/45% – нитинол, имеющий эффект памяти формы и сверхэластичность. Если деталь сложной формы подвергнуть нагреву до красного каления, то она запомнит эту форму. После остывания до комнатной температуры деталь можно деформировать, но при нагреве выше 40 °С она восстановит первоначальную форму. Наибольшее распространение сплав получил в медицине.

Сплав железо-никель, содержащий 36% никеля, имеет минимальное значение α и сохраняет его в широком интервале температур от -100 до + 100°С. Такой сплав почти не удлиняется при нагревании, он получил название инвар (от лат. *invariabilis* – неизменный). Сплавы инварного состава применяются для изготовления деталей приборов, предназначенных для работы в условиях перепада температур.

Наиболее известными жаростойкими сплавами на основе никеля являются сплавы никель-хром, называемые нихромами. Эти сплавы обладают также высоким электрическим сопротивлением и широко применяются в качестве нагревательных элементов бытовых приборов и промышленных электропечей. Нихромы жаростойки до 1100 °С. К недостаткам нихромов следует отнести их высокую стоимость и низкую жаропрочность.

Жаропрочные никелевые сплавы на основе Ni-Cr-Al-Ti (суперсплавы, нимоники)

Жаропрочность – способность материала выдерживать механические нагрузки при высоких температурах без значительной деформации (оценивается сопротивлением ползучести) и без разрушения (оценивается длительной прочностью).

Жаростойкость – способность материала сопротивляться окислению при высоких температурах.

Назначение: детали газотурбинных двигателей (лопатки, диски и др.)

Рабочие температуры: 750-950 °С

Химический состав классического нимоника: Ni-20Cr-2Ti-1Al

Фазовый состав: $\gamma + \gamma'$

Марки: ХН77ТЮ, ХН70МВТЮБ, ХН55ВМТФКЮ и др.

Термическая обработка: закалка с 1050...1150°С на воздухе + старение при 600...800°С.

Тема 2.7. Неметаллические материалы: полимеры, пластмассы, стекла, керамики

Полимеры – химические соединения, макромолекулы которых состоят из большого числа повторяющихся структурных единиц, представляющих собой одинаковую группу атомов и связанных между собой химическими связями.

Пластмассы

Состав пластмасс:

- Связующее
- Наполнители (порошковые, волокнистые, листовые)
- Стабилизаторы
- Пластификаторы
- Отвердители
- Специальные добавки (против плесени, против горения, красители, смазки, антистатики и др.)

Свойства пластмасс:

- Малая плотность
- Высокая удельная прочность σ_v/γ
- Химическая стойкость
- Электроизоляторы
- Теплоизоляторы
- Меньше трудоемкость переработки (изделие и материал создаются одновременно; не нужны отделочные операции)
- Мало отходов (коэффициент полезного использования материала не менее 0,9)

Основные недостатки пластмасс:

- Низкая теплостойкость (термопласты – до 250 °С, термореактивные пластмассы – до 400 °С)
- Малая жесткость (E) и ударная вязкость (KCU)
- Склонность к старению (со временем свойства изменяются)

Полиэтилен и полипропилен применяются в виде пленок для упаковки и остекления, а также труб, емкостей, контейнеров, слабонагруженных деталей.

Органическое стекло – термопласт на основе сложных эфиров акриловой и метакриловой кислот. Отличается высокой оптической прозрачностью, пропускает ультрафиолетовые лучи и более чем в два раза легче минеральных стекол. Имеет хорошую стойкость против старения. Используется в самолетостроении, автомобилестроении, для светотехнических деталей.

Полиамиды (капрон, нейлон и др.) используются для различных машиностроительных деталей. Это шестерни, втулки, детали насосов, маслобензопроводы, уплотнители гидросистем, различные канаты. Кроме того, полиамиды используют как антифрикционные покрытия на металлах.

Гетинакс – слоистый пластик на основе фенольных, карбамидных и других смол, наполнителем являются различные сорта бумаги. Применяется как строительно-декоративный материал для облицовки производственных помещений, салонов самолетов, вагонов и т.п., а также как электроизоляционный материал для различных электротехнических деталей.

Текстолит (связующее вещество – термореактивные смолы, наполнитель – хлопчатобумажные ткани) лучше всех слоистых пластиков поглощает вибрационные нагрузки. Хорошо сопротивляется износу, отсутствует схватывание со стальными деталями. Применяется для средненагруженных деталей, испытывающих трение (бесшумные зубчатые передачи, кулачки, шкивы, вкладыши подшипников). Особенно широко бесшумные текстолитовые шестерни используются в текстильном оборудовании.

Свойства термопластичных пластмасс представлены в табл. 2.18.

Таблица 2.18 – Свойства термопластичных пластмасс

Материал	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	a_k^* , кДж/м ²	Максимальная температура эксплуатации (без нагрузки), °С
Полиэтилен:				
– низкой плотности (<0,94 т/м ³);	10–18	300–1000	не ломается	60–70
– высокой плотности (>0,94 т/м ³)	18–32	100–600	5–20	70–80
Полипропилен	26–38	700–800	3–15	100
Полистирол	40–60	3–4	2	50–70
АБС (ацетобутиратстирол)	30–55	15–30	8–40	75–85
Поливинилхлорид:				
– жесткий;	50–65	20–50	2–4	65–85
– пластикат	10–40	50–350	не ломается	50–55
Фторопласт-4	20–40	250–500	16	250
Фторопласт-3	37	160–190	8–10	150
Органическое стекло	80	5–6	2	65–90
Поликарбонат:				
– без наполнителя;	60–65	80–120	20–30	135
– с 30 % волокна	90	3,5	8	145
Капрон:				
– сухой;	75–85	50–130	3–10	80–100
– насыщенный водой;	35–50	160–250	≥45	–
– сухой + 30 % волокна;	180	3	12	100–130
– насыщенный водой + 30 % волокна	100–125	4	18	–

* a_k – обозначение ударной вязкости по ГОСТ 4647–80

Резина

Резина – эластичный материал, получаемый вулканизацией натурального или синтетических каучука (смешиванием с вулканизирующим веществом, например, серой с последующим нагревом).

Главное свойство резин – высокая эластичность. Кроме того, резины обладают: водонепроницаемостью, электроизоляционными свойствами, низкой теплопроводностью и др.

Состав резин:

В качестве основного компонента выступает каучук (полимер, способный к большим обратимым деформациям при небольших нагрузках). В качестве вулканизаторов обычно выступают сера и оксид цинка. Также могут добавлять наполнители (диоксид кремния, мел, сажа), пластификаторы (парафин, мазут, вазелин), красители, противостарители и регенераторы.

Резины делятся по назначению на 10 типов:

маслобензостойкие;
кислото-щелочестойкие;
агрессивостойкие;
теплостойкие;
морозостойкие;
температуростойкие;
озоностойкие;
токопроводящие;

износостойкие;
радиационностойкие.

Резина используется в производстве шин, транспортёрных лент, приводных ремней, рукавов и шлангов, резиновых колец, манжет и других уплотнителей, виброизоляторов и вибродемпферов и других резинотехнических изделий.

Керамика

Состав керамики:

Основы керамики – кристаллическая фаза; аморфная (стекловидная) фаза – связка; в породах керамики также находится газовая фаза.

Виды керамики представлены на рис. 2.52.



Рисунок 2.52 – Виды керамики

Свойства керамики:

- Высокая твердость и износостойкость
- Высокие рабочие температуры (до 3500 °С)
- Химическая стойкость
- Диэлектрики
- Теплоизоляторы
- Малая трудоемкость переработки (изделие и материал создаются одновременно; не нужно упрочнение и отделочные операции)
- Малая плотность

Основные недостатки керамики:

- Хрупкость (очень низкая ударная вязкость, в 40 раз ниже, чем у металлов)
- оксидная – не выдерживает резких перепадов температуры
- бескислородная – можно получать только горячим прессованием (технологические трудности).

Различные типичные изделия, изготавливаемые из керамики представлены на рис. 2.53-2.54.



Рисунок 2.53 – Керамические насадки и изоляционные рукава для сварочного оборудования



Рисунок 2.54 – Изделия из керамики

Композиционными называют материалы, в состав которых входят конструктивные элементы, разделенные выраженной границей, свойства которых резко отличаются от свойств матрицы. Конструктивные составляющие выбирают так, чтобы они дополняли друг друга (например, пластичная матрица и прочный, но хрупкий упрочнитель).

Раздел III. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УПРОЧНЕНИИ И РАЗУПРОЧНЕНИИ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Тема 3.1. Теория и технология термической обработки сталей

Конструкционная прочность (прочность материала в конструкции) – это комплекс свойств, обеспечивающий длительную и надежную работу изделия в конкретных условиях эксплуатации. Следовательно, конструкционная прочность определяется не только свойствами самого материала, но также и условиями нагружения (статические, циклические или ударно циклические нагрузки), температурной областью эксплуатации изделия, средой, в которой изделию предстоит работать (жидкой, газообразной, высоко агрессивной и т.п.).

Конструкционная прочность объединяет такие понятия как прочность (сопротивление материала пластической деформации), надежность (сопротивление хрупкому разрушению) и долговечность (сопротивление материала постепенному разрушению, его способность обеспечить работу изделий в течение заданного времени).

Термической обработкой называется совокупность операций нагрева и охлаждения сплава с целью изменения его структуры и свойств в нужном направлении.

В зависимости от того, как изменяются свойства в результате термической обработки, различают **упрочняющую** термическую обработку, при которой повышаются твердость, прочность и износостойкость, и **разупрочняющую** обработку, повышающую пластические свойства и вязкость, но снижающую твердость и сопротивление деформации и разрушению.

Классификация видов термической обработки представлена на рис. 3.1.



Рисунок 3.1 – Классификация видов термической обработки

Любую операцию термической обработки можно представить графически в виде кривой в координатах «температура – время», включающей участки нагрева, выдержки и охлаждения (рис. 3.2).

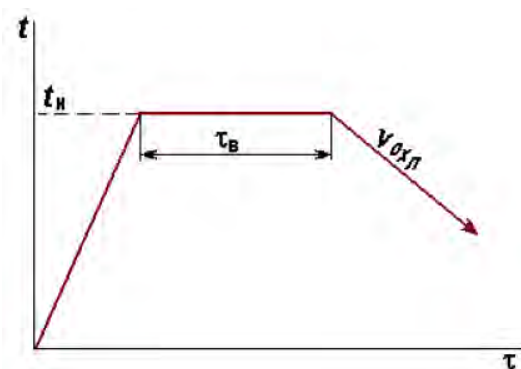


Рисунок 3.2 – Обобщенная операция термической обработки

Важнейшими параметрами, определяющими изменение структуры и свойств сплава, являются:

- температура нагрева t_n ,
- время выдержки τ_v
- скорость охлаждения $v_{охл.}$

Термическая обработка стали основана на фазовых превращениях, происходящих при нагреве ее выше критических температур и охлаждении с различными скоростями.

При медленном охлаждении (отжиг) повышаются пластические свойства, при быстром охлаждении (закалка) увеличивается твердость и прочность, а пластичность снижается (рис. 3.3).

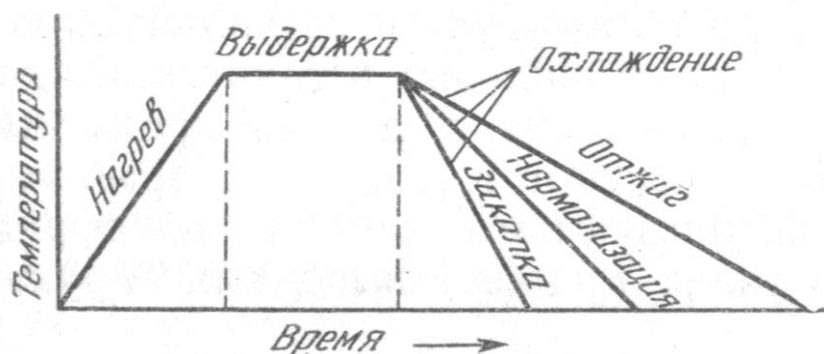


Рисунок 3.3 – Виды термической обработки в зависимости от скорости охлаждения

Обозначение критических точек буквой «А» происходит от французского слова «arreter» – «остановка» (площадка на кривой охлаждения). Индекс «с» означает первую букву французского слова «chauffer» – нагревать; при охлаждении стали те же самые точки обозначаются индексом «r» («refroidir» – охлаждать): Ar_3 , Ar_1 .

Изменения структуры эвтектоидной стали при нагреве выше критической температуры.

Как видно из рис. 3.4, в каждой перлитной колонии зарождается несколько зерен аустенита, поэтому при нагреве происходит измельчение зерна.

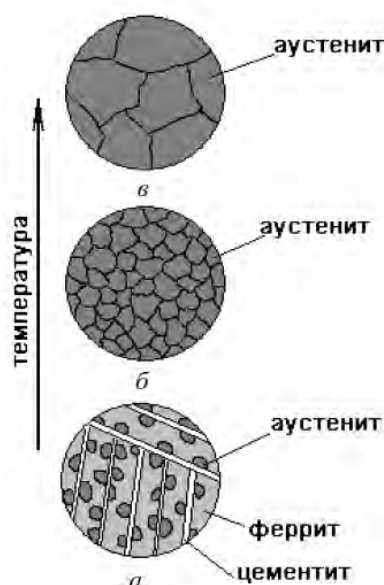


Рисунок 3.4 – Превращения в эвтектоидной стали при ее нагреве

Важно помнить, что нагрев до слишком высоких температур неизбежно приведет к его росту. При этом возможно возникновение двух видов дефектов:

1. **Перегрев** – укрупнение зерна аустенита выше допустимого по условиям работы детали. Перегретая сталь имеет пониженную пластичность и ударную вязкость. Но этот брак можно исправить повторным нагревом до нормальных температур.

2. **Пережог** – окисление границ зерен при температурах, близких к солидусу. Появление оксидов на границах аустенитного зерна – неисправимый брак, такая сталь имеет камневидный излом и очень высокую хрупкость. Ее отправляют на переплав.

Не во всех сталях рост зерна при нагреве идет с одинаковой скоростью. У сталей, раскисленных кремнием и марганцем, наблюдается очень быстрый рост зерна аустенита, их называют природнокрупнозернистыми. А стали, раскисленные еще и алюминием, являются природно-мелкозернистыми: до 1000–1100 °С зерно в них почти не растет.

Величина зерна влияет на все механические свойства стали, но особенно сильно – на ударную вязкость КСЧ. Чем крупнее зерно аустенита перед закалкой, тем больше вероятность возникновения трещин при закалке. И в эксплуатации такая сталь будет менее надежной, чем мелкозернистая.

Величина зерна является одним из важнейших контрольных показателей качества термической обработки. Ее оценивают номером или баллом шкалы по ГОСТу металлографическим методом, сравнивая видимую в микроскопе структуру со стандартной шкалой.

Критические точки при нагреве стали представлены на рис. 3.5.

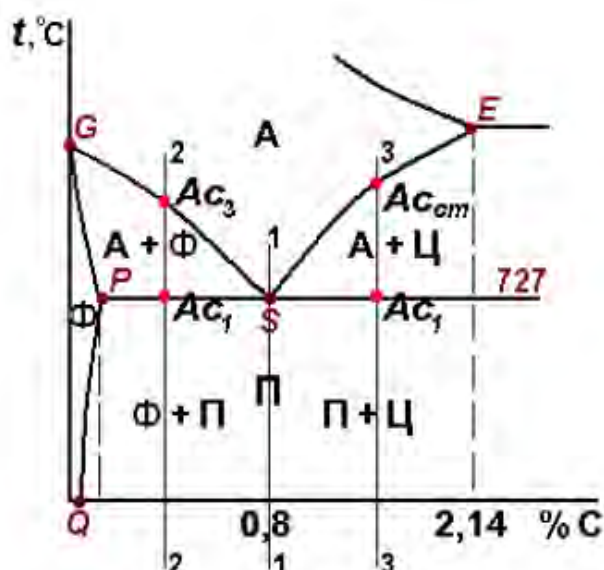


Рисунок 3.5 – Критические точки при нагреве стали

Следует обратить внимание на то, что точки Ac_3 и Ac_{cm} – свои для каждой стали, а точка Ac_1 – одна для всех углеродистых сталей: 727 °C.

Превращения аустенита при охлаждении

От степени переохлаждения зависит не только скорость протекания, но и сам механизм превращения переохлажденного аустенита, а значит, структура и свойства его продуктов. Как правило, охлаждение осуществляется непрерывно, но изучать кинетику превращения (протекание процесса во времени) удобнее в изотермических условиях (при постоянной температуре). Поэтому для каждой стали построена своя диаграмма изотермического превращения аустенита в координатах «температура – время» (рис. 3.6). Ее еще называют С-образной диаграммой (по форме кривых). Две кривые на рис. 3.6, напоминающие по форме букву «С», показывают начало (кривая *a-a*) и окончание (кривая *b-b*) превращения аустенита в другие структуры. Слева от линии *a-a* расположена область переохлажденного аустенита. Как видно из диаграммы, время существования аустенита при температурах ниже A_{c1} различно и зависит от степени переохлаждения. Справа от линии *b-b* – область продуктов превращения, равновесных при определенных температурах.



Рисунок 3.6 – Диаграмма изотермического превращения аустенита для стали с 0,8%С

Продукты диффузионного превращения аустенита приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Продукты диффузионного превращения аустенита

Структура	Температура образования, °C	Межпластиночное расстояние, мкм	Твердость, НВ
перлит	> 670	0,5–0,7	170–230
сорбит	590–640	0,3–0,4	230–330
троостит	550–580	0,1–0,2	330–400

Бездиффузионное (мартенситное) превращение переохлажденного аустенита

С понижением температуры коэффициент диффузии углерода в железе уменьшается. При большой скорости охлаждения можно переохладить аустенит до такой температуры, когда диффузия практически не идет. Для эвтектоидной стали это примерно 250 °C. Горизонтальные линии, ограничивающие эту область, обозначены на диаграмме M_n и M_k . M_n – температура начала, а M_k – температура окончания бездиффузионного превращения.

Чтобы переохладить аустенит до температуры M_n , нужно достичь скорости охлаждения, превышающей величину V_k (см. рис. 3.7). Критическая скорость охлаждения V_k – это минимальная скорость, при которой аустенит не распадается диффузионным путем на феррито-цементитную смесь. Геометрически – это касательная к кривой начала распада.

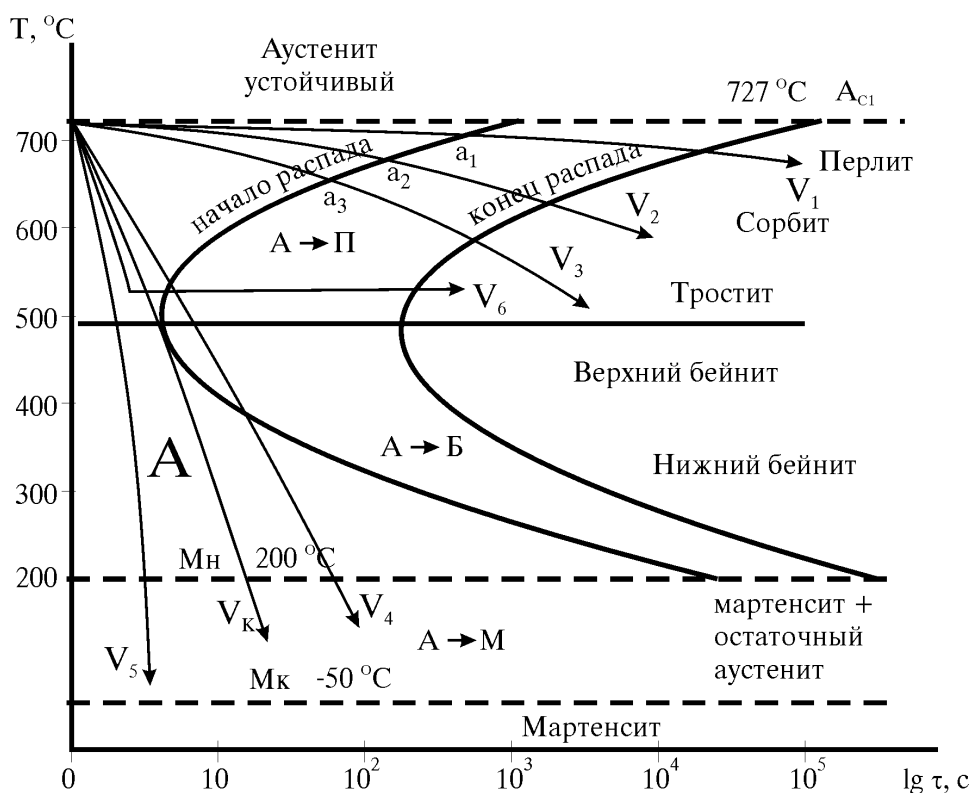


Рисунок 3.7 – Диаграмма превращения аустенита для стали с 0,8% C с различными скоростями охлаждения

Образование мартенсита из аустенита показано на рис. 3.8.

В результате бездиффузионного превращения гранецентрированная кубическая решетка аустенита перестраивается в объемноцентрированную. Но поскольку в этой решетке остается весь имеющийся в стали углерод (в данном случае 0,8 %), то каждая элементарная

ячейка α -железа искажается, вытягивается и из кубической становится тетрагональной (рис. 3.9 и 3.10). Мерой искажения решетки является так называемая тетрагональность – отношение высоты элементарной ячейки к стороне основания a . Тетрагональность c/a возрастает при увеличении содержания углерода в твердом растворе.

Полученная таким образом структура представляет собой пересыщенный твердый раствор углерода в тетрагональной решетке α -железа и называется мартенситом.

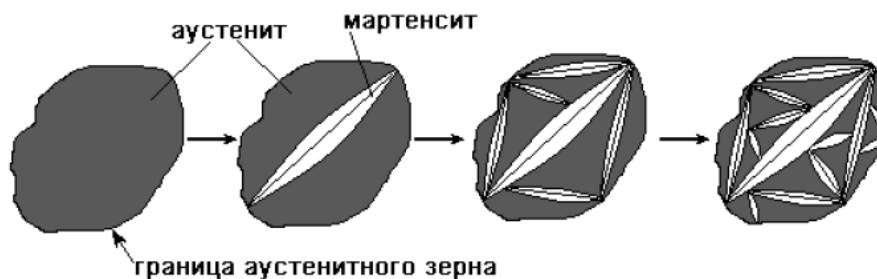


Рисунок 3.8 – Образование мартенсита из аустенита

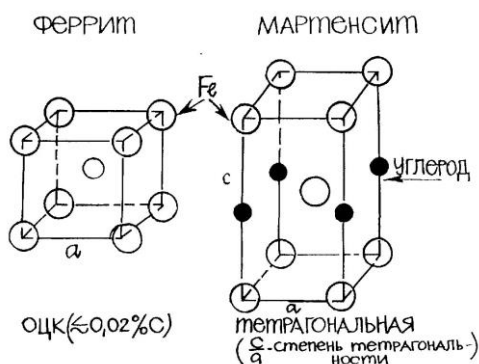


Рисунок 3.9 – Кристаллические решетки феррита и мартенсита

Диффузионное и бездиффузионное превращения в стали У8 при охлаждении иллюстрирует схема, показанная на рис. 3.10.

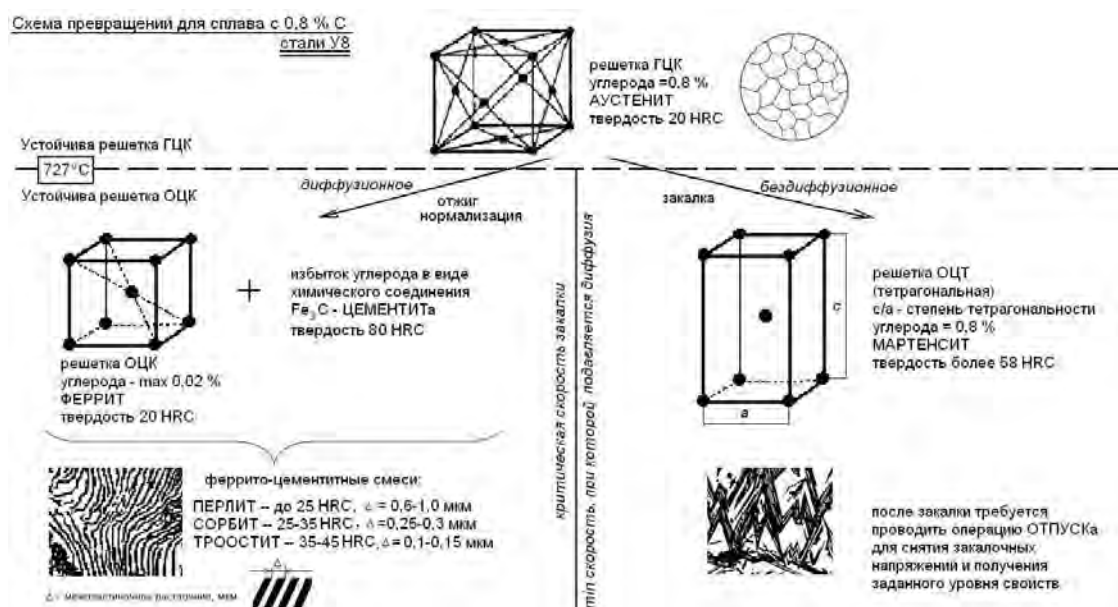


Рисунок 3.10 – Диффузионное и бездиффузионное превращения в стали У8 при охлаждении

Температуры начала и окончания мартенситного превращения и массовая доля остаточного аустенита не постоянные величины, они зависят от содержания углерода в стали (рис. 3.11).

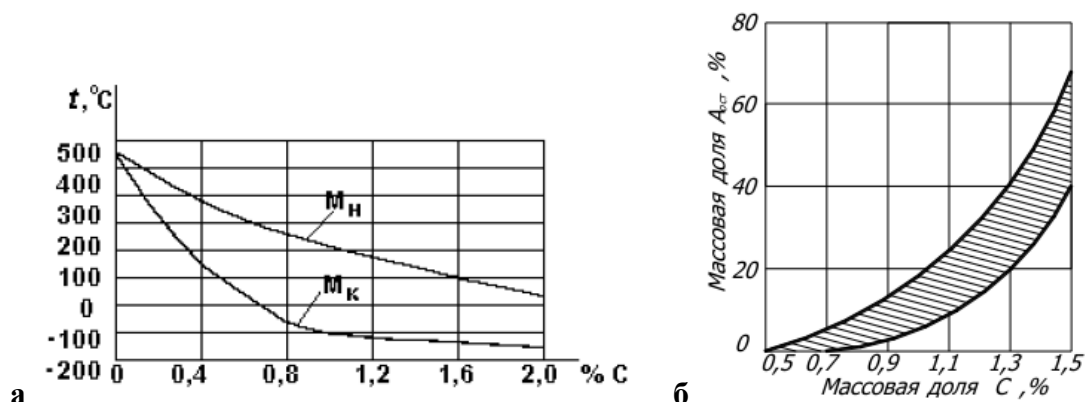


Рисунок 3.11 – Температуры начала и окончания мартенситного превращения – а и массовая доля остаточного аустенита – б (возможная доля $A_{ост}$, заштрихована) в зависимости от содержания углерода в стали

Закалка стали

Закалка – это упрочняющая термическая обработка, которая таким образом изменяет структуру стали, чтобы максимально повысить твердость и прочность. Закалка заключается в нагреве стали выше температуры фазового превращения с последующим охлаждением со скоростью больше критической.

Цель закалки – получение неравновесной структуры стали: пересыщенного твердого раствора углерода в α -железе – мартенсита.

Быстрое охлаждение при закалке необходимо, чтобы углерод не успел выделиться из твердого раствора – аустенита – и остался в решетке железа после охлаждения.

Чтобы закалить сталь, необходимо правильно выбрать температуру нагрева и скорость охлаждения. Эти два параметра являются определяющими при проведении закалки.

При выборе температуры нагрева нужно руководствоваться следующим правилом (рис. 3.12): доэвтектоидные стали нагреваются под закалку на 30–50 °C выше критической точки $A_{с3}$, а заэвтектоидные – на 30–50 °C выше точки $A_{с1}$. Геометрическим местом критических точек A_3 является линия GS, а точек A_1 – линия PSK (727 °C).

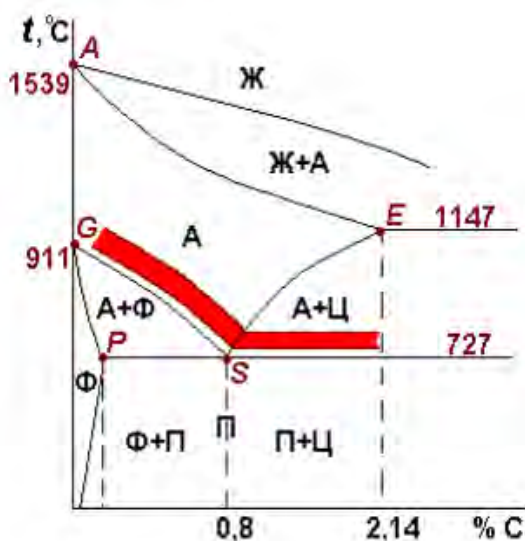


Рисунок 3.12 – Температурный интервал нагрева стали под закалку

Закалка из однофазной (аустенитной) области называется полной, а закалка из двухфазной области, где присутствуют аустенит и цементит – неполной.

Таким образом, доэвтектоидные стали подвергаются полной закалке, а заэвтектоидные – неполной.

Превышение критической температуры более чем на 30–50 °С, недопустимо, так как это вызывает рост аустенитного зерна. Если это произойдет, то из крупнозернистого аустенита образуется крупнопластинчатый мартенсит, сталь с такой структурой будет очень хрупкой.

Это брак термической обработки – перегрев. Перегрев можно исправить повторной закалкой с нормальной температуры.

Зная рассмотренные выше особенности структурообразования при охлаждении аустенита с разными скоростями, можно определить по С-образной диаграммы условия охлаждения стали для получения мартенситной структуры при закалке. Для этого надо превысить критическую скорость охлаждения $V_{кр}$ – минимальную скорость, при которой аустенит не распадается диффузионным путем на феррито-цементитную смесь. Геометрически – это касательная к кривой начала распада.

Для углеродистых сталей критическая скорость охлаждения при закалке составляет около 400 °С/с.

Такая скорость достигается охлаждением в воде и в водных растворах солей (NaCl) или щелочей (NaOH), увеличивающих охлаждающую способность воды. При этом деталь необходимо энергично перемещать в закалочной жидкости, чтобы удалять с поверхности металла образующийся пар, который замедляет охлаждение.

Внутренние напряжения при закалке стали возникают вследствие неравномерного охлаждения поверхности и сердцевины изделия (тепловые или термические напряжения), увеличения объема и неоднородности протекания мартенситного превращения по объему изделия (структурные или фазовые напряжения). Неодинаковое распределение температур по сечению изделия при быстром охлаждении сопровождается и неравномерным изменением объема. Поверхностные слои сжимаются быстрее, чем внутренние. Однако сжатию поверхностных слоев препятствуют внутренние слои. Это приводит к тому, что после окончательного охлаждения на поверхности получают остаточные напряжения сжатия, а в сердцевине – напряжения растяжения.

Для легированных сталей критическая скорость охлаждения значительно меньше, что позволяет применять более мягкие закалочные среды – минеральные масла или растворы полимеров (рис. 3.13 и 3.14).

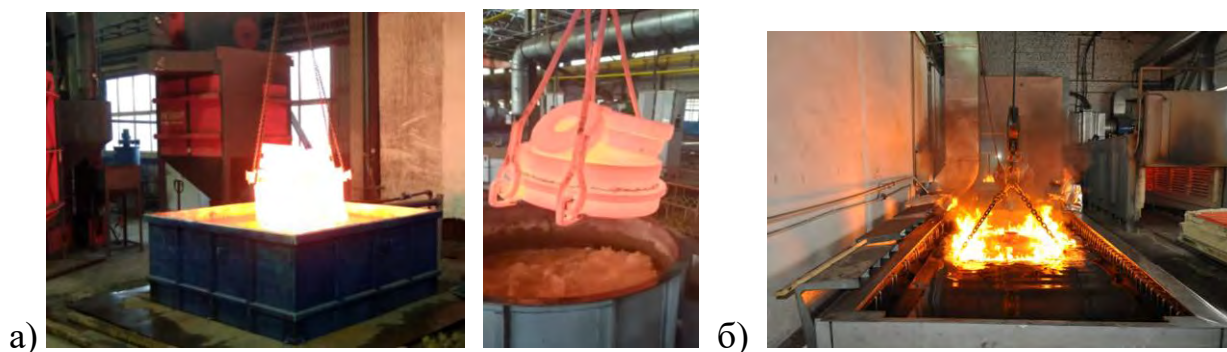


Рисунок 3.13 – Закалка в воду (а) и в масло (б)



Рисунок 3.14 – Закалка в масло на термическом участке цеха компании ООО "Волга-СтальПроект"

В практике термической обработки применяют несколько технологических способов закалки (рис. 3.15). Среди них:

- 1) закалка в одной среде, или непрерывная закалка;
- 2) закалка в двух средах, или прерывистая закалка;
- 3) ступенчатая закалка;
- 4) изотермическая закалка.

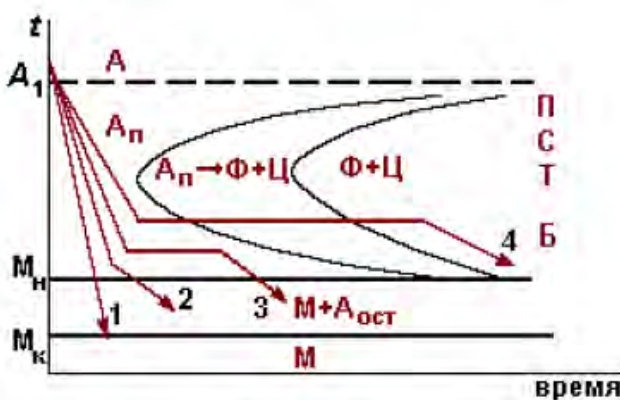


Рисунок 3.15 – Способы закалки стали

Первый способ – закалка в одной среде, или непрерывная закалка (кривая 1), – наиболее простой, но при этом в детали появляются большие внутренние напряжения.

Они складываются из термических напряжений, возникающих из-за разности температур на поверхности и в сердцевине детали при быстром охлаждении, и структурных напряжений, образующихся за счет объемных изменений при мартенситном превращении.

Эти напряжения могут привести к деформации детали и даже образованию трещин. Особенно это опасно в отношении деталей сложной формы, имеющих концентраторы напряжений в виде проточек, отверстий, углов, галтелей и т. п.

Для того чтобы уменьшить недостатки закалки в одной среде, были предложены другие способы проведения этого процесса.

Закалка в двух средах, или прерывистая закалка (кривая 2), заключается в том, что сталь быстро охлаждается в интервале температур 750–400 °С, а затем деталь переносится в другую охлаждающую среду, и в мартенситном интервале охлаждение происходит замедленно. Это приводит к уменьшению величины возникающих при закалке внутренних напряжений и снижает вероятность появления трещин.

Примером такой закалки может быть процесс с охлаждением вначале в воде, а затем в масле.

Ступенчатая закалка (кривая 3) производится погружением нагретой до аустенитного состояния детали в жидкую среду с температурой на 20–30 выше точки M_n . При этом обеспечивается быстрое охлаждение стали в верхней области температур, а затем делается не-

которая выдержка, во время которой температура по сечению детали выравнивается, и термические напряжения уменьшаются. Затем детали вынимаются из закалочной ванны, и дальнейшее охлаждение происходит в другой среде, чаще всего на воздухе или в масле. В этом случае мартенситное превращение происходит при медленном охлаждении, в условиях меньших внутренних напряжений. В качестве жидких сред для ступенчатой закалки используют расплавы щелочей, селитры, легкоплавких металлов.

Изотермическая закалка (см. кривую 4) существенно отличается от других способов. Здесь выдержка в жидкой охлаждающей среде при температуре превращения аустенита в бейнит или троостит продолжается до полного распада аустенита. Во всех предыдущих случаях при закалке происходит образование мартенситной структуры.

При изотермической закалке напряжения в детали минимальны, исключается образование трещин, деформации значительно меньше.

Кроме того, у некоторых легированных сталей этот способ закалки позволяет получать оптимальное сочетание прочностных и пластических свойств.

Закаливаемость и прокаливаемость стали

Под закаливаемостью стали понимают способность стали получать высокую твердость при закалке. Закаливаемость зависит от содержания углерода в стали и характеризуется максимальной возможной твердостью (HRC) для данной марки.

Скорость охлаждения уменьшается от поверхности детали к центру, поэтому при достаточно большой толщине детали может оказаться, что в ее сердцевине скорость охлаждения меньше критической. Поскольку мартенсит образуется только при скорости охлаждения больше критической, то в этом случае на мартенсит закалится только поверхностный слой определенной глубины, а сердцевина будет незакаленной, с мягкой феррито-перлитной структурой. При закалке реальных деталей необходимо знать, возможна ли закалка насквозь, по всему сечению, или какой глубины будет закаленный слой. Иначе говоря, нужно знать прокаливаемость стали, под которой понимают способность стали получать мартенситную структуру на определенную глубину. Для характеристики прокаливаемости стали в справочниках приводят величину критического диаметра.

Критический диаметр – это максимальный диаметр цилиндрического прутка, который прокаливается насквозь в конкретной охлаждающей среде. Прокаливаемость стали увеличивается при увеличении охлаждающей способности закалочной среды и при введении в сталь легирующих элементов, которые затрудняют диффузионный распад аустенита.

Углеродистая сталь при охлаждении в воде имеет критический диаметр 10–15 мм. Это значит, что при закалке более крупных изделий какая-то зона в сердцевине будет незакаленной (рис. 3.16).

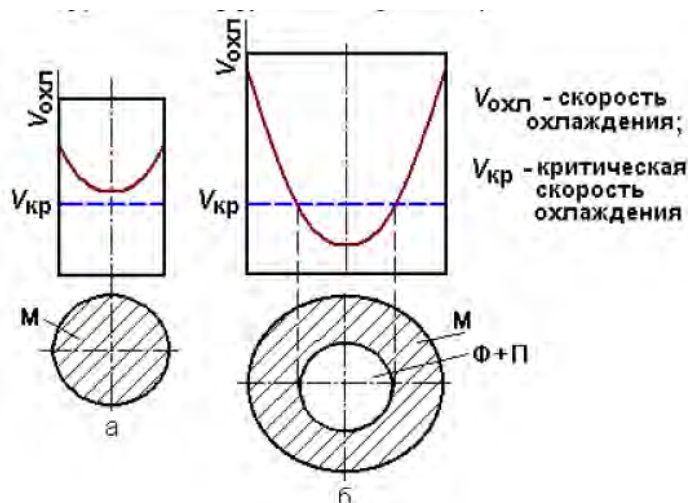


Рисунок 3.16 – Изменение скорости охлаждения по сечению деталей и прокаливаемость стали

Поверхностная закалка

Для некоторых типов деталей, в соответствии с особенностями нагружения при эксплуатации, необходимо обеспечить высокую твердость и износостойкость поверхности в сочетании с достаточно хорошей вязкостью в сердцевине. Это касается деталей, работающих в условиях износа с одновременным действием динамических нагрузок (например, шестерни).

В таких случаях подвергают упрочнению не всю деталь, а только тонкий (несколько мм) поверхностный слой.

Поверхностная закалка – это нагрев до закалочных температур только поверхностного слоя детали с последующим быстрым охлаждением и образованием мартенситной структуры только в этом слое.

Осуществляют такую закалку быстрым нагревом поверхности, при котором сердцевина не успевает прогреться за счет теплопроводности.

После охлаждения в сечении детали получаются три характерных зоны с разной структурой и свойствами (рис. 3.17).

В зоне I после закалки получается мартенситная структура с максимальной твердостью, так как эта зона нагревалась выше критической температуры A_{c3} .

В зоне II после закалки в структуре, кроме мартенсита, будет присутствовать и феррит. Следовательно, твердость там будет ниже.

В зоне III, нагрев и охлаждение не приводят к каким-либо изменениям структуры. Значит, здесь сохраняется исходная феррито-перлитная структура с низкой твердостью, но высокими пластическими свойствами.



Рисунок 3.17 – Характерные зоны при поверхностной закалке

После поверхностной закалки деталь может сопротивляться динамическим нагрузкам за счет вязкой сердцевины и хорошо работать в условиях износа благодаря твердой поверхности.

Быстрый поверхностный нагрев, необходимый при такой технологии, осуществляется чаще всего индукционным способом. Деталь при этом помещается в специальный индуктор, подключенный к генератору тока высокой частоты. Глубина закаленного слоя при этом способе упрочнения может легко регулироваться в зависимости от необходимости и составляет от десятых долей миллиметра до 3–5 мм.

Быстро нагреть поверхностный слой можно в расплавах металлов или специальными высокотемпературными горелками, однако наиболее целесообразно использование либо токов высокой частоты (ТВЧ), либо лазерных лучей (рис. 3.18).



Рисунок 3.18 – Способы поверхностной закалки

Поверхностная закалка шестерни и вала с использованием ТВЧ и охлаждением водяным спреем представлена на рис. 3.19 и 3.20.



Рисунок 3.19 – Поверхностная закалка шестерни с использованием ТВЧ

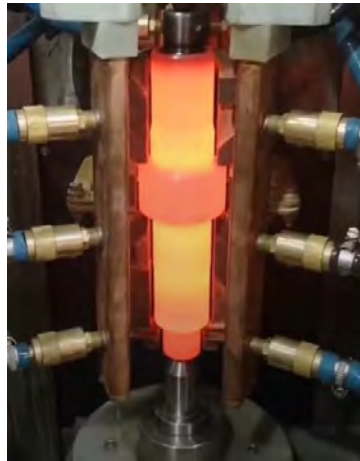
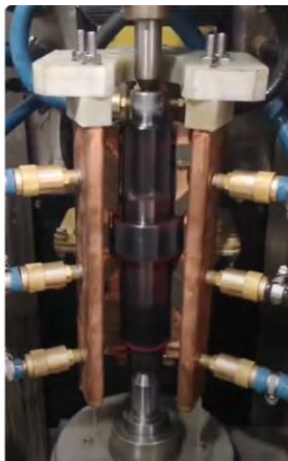
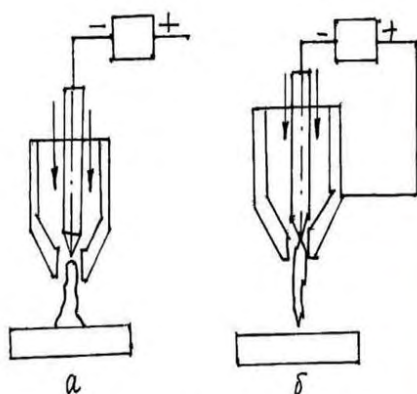


Рисунок 3.20 – Поверхностная закалка вала с использованием ТВЧ

Нагреть поверхность под закалку можно при помощи плазмы, генерируемой плазмотронами (рис. 3.21).



Схемы плазматронов:

а – с открытой дугой,

б – с замкнутой дугой – струей.



Рисунок 3.21 – Плазменная закалка

Старением называют фазовый распад сплавов, в которых содержание элементов превышает равновесное для данной температуры.

Старение может протекать как при комнатной температуре, такое старение называют естественным, так и при повышенных температурах (искусственное старение). Естественное старение наблюдается в сплавах на основе легкоплавких элементов (алюминиевых, магниевых и др.).

Отпуск стали

Закаленная сталь, имея высокую твердость, обладает существенными недостатками – низкой пластичностью, большими внутренними напряжениями, хрупкостью. В таком состоянии изделие не работоспособно, не надежно в эксплуатации. Поэтому для уменьшения внутренних напряжений и повышения уровня пластических свойств после закалки всегда следует дополнительная операция термической обработки, которая называется отпуск.

Отпуск – это нагрев закаленной стали до температур ниже критических с последующим охлаждением, чаще всего на воздухе.

Цель отпуска – получение более устойчивой, чем после закалки, структуры, уменьшение внутренних напряжений, создание требуемого комплекса эксплуатационных свойств. По температуре нагрева отпуск подразделяется на 3 вида: низкий, средний и высокий (рис. 3.22).

При низкотемпературном (или низком) отпуске (150–200 °С) из мартенсита выделяется часть избыточного углерода с образованием мельчайших карбидных частиц. Но поскольку скорость диффузии здесь еще мала, некоторая часть углерода в мартенсите остается.

Такая структура представляет собой малоуглеродистый мартенсит и очень мелкие карбидные частицы. Ее называют отпущенный мартенсит.

В результате низкого отпуска уменьшаются внутренние напряжения, немного увеличивается вязкость и пластичность, твердость почти не снижается. Детали могут работать в условиях, где необходима высокая твердость и износостойкость.

Низкий отпуск применяют для режущего и мерительного инструмента, деталей подшипников качения.

Среднетемпературный (или средний) отпуск проводится при более высоких температурах – 300–450 °С. При этом из мартенсита уже выделяется весь избыточный углерод с образованием цементитных частиц. Тетрагональные искажения кристаллической решетки железа снимаются, она становится кубической. Мартенсит превращается в феррито-цементитную смесь с очень мелкими, в виде иголочек, частицами цементита, которая называется трооститом отпуска.

Средний отпуск еще уменьшает внутренние напряжения, увеличивает вязкость, при этом прочность остается высокой, а предел текучести и предел выносливости достигают максимума. Такому отпуску подвергают рессоры, пружины и другие упругие элементы, а также штамповый инструмент.

В интервале 500–650 °С скорость диффузионных процессов уже настолько возрастает, что при распаде мартенсита образуется феррито-цементитная смесь с более крупными, сферической формы, зернами цементита. Такой отпуск называется высокотемпературным (или высоким), а получаемая структура – сорбитом отпуска.

В результате высокого отпуска сильно возрастают вязкость и пластичность стали, внутренние напряжения снимаются почти полностью, твердость и прочность снижаются, но все же остаются достаточно высокими.

Закалка с высоким отпуском называется термическим *улучшением* стали. Такой обработке подвергают детали машин, работающие в условиях знакопеременных и ударных нагрузок: валы, рычаги, шестерни и др.

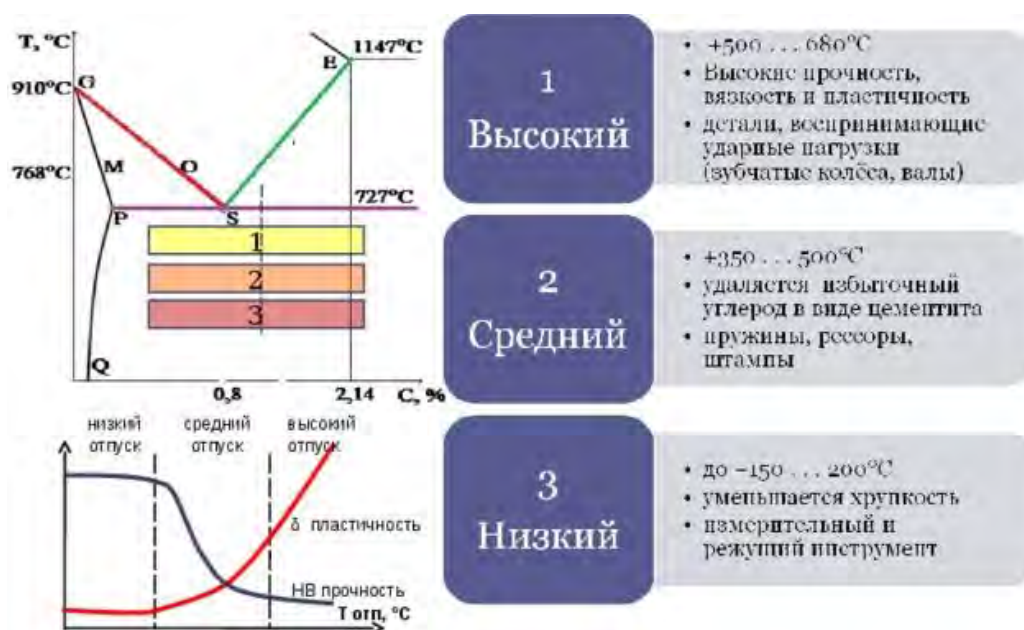


Рисунок 3.22 – Виды отпуска

Влияние температуры отпуска на механические свойства закаленной углеродистой стали представлено на рис. 3.23.

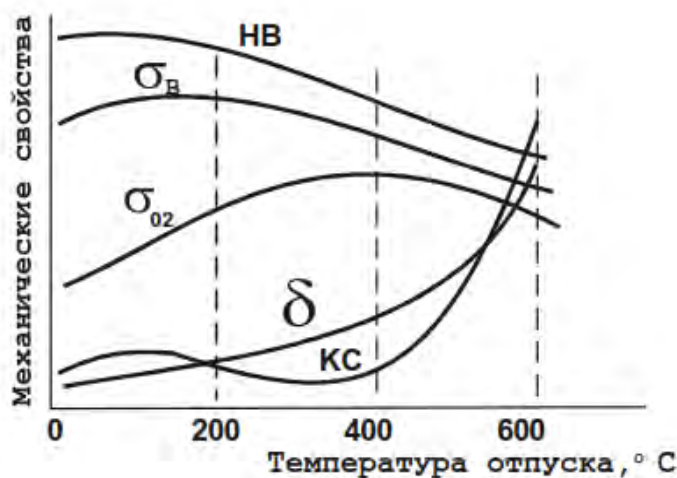


Рисунок 3.23 – Влияние температуры отпуска на механические свойства закаленной углеродистой стали

Таблица 3.2 – Изменение свойств стали 40 при отпуске

Температура отпуска, °C	σ_b , МПа	Твердость, НВ	δ , %	ψ , %
Без отпуска	1400	600	3	3
200	1400	510	4	18
400	1080	330	11	40
600	700	190	22	58

Отжиг стали

Отжиг – разупрочняющая термическая обработка. Он проводится для максимального уменьшения твердости, улучшения обрабатываемости резанием и давлением, снятия внутренних напряжений, исправления структуры перегретой стали, повышения пластических свойств.

Отжигом называют нагрев стали выше температуры фазового превращения с последующим очень медленным охлаждением (не более 100 °C/ч, т.е. вместе с печью).

Цель отжига – получить равновесную структуру стали, такую, как на диаграмме железо-углерод. Иногда отжиг преследует цель выравнивания состава, повышения однородности распределения легирующих элементов в литой стали.

Существует несколько разновидностей этой термической обработки. Среди них:

- 1) полный отжиг;
- 2) неполный отжиг;
- 3) нормализация;
- 4) диффузионный отжиг.

Температурные интервалы нагрева стали при отжиге представлены на рис. 3.24.

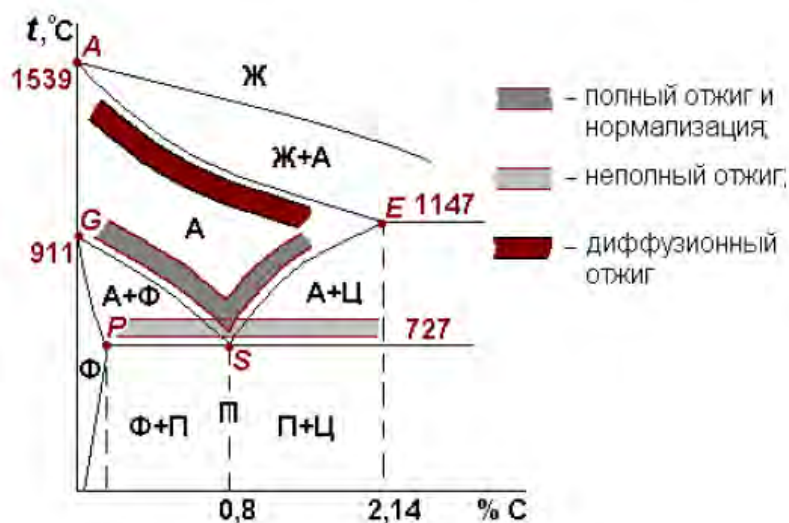


Рисунок 3.24 – Температурные интервалы нагрева стали при отжиге

Полный отжиг производится для доэвтектоидных сталей. Для этого сталь нагревают на 30–50 °C выше критической точки A_{c3} и после небольшой выдержки медленно охлаждают. Практически детали охлаждаются вместе с печью со скоростью 30–100 °C/ч. Таким образом, если структура была дефектная (крупные зерна, искаженные зерна и т. п.), то при полном отжиге она исправляется, получается однородной и мелкозернистой.

Сталь с феррито-перлитной структурой имеет хорошие пластические свойства и низкую твердость. Это обеспечивает хорошую обрабатываемость стали резанием и давлением.

Отжиг полностью снимает остаточные напряжения.

Неполный отжиг отличается от полного тем, что в этом случае сталь нагревают на 30–50 °С выше критической точки A_{c1} (линия PSK на диаграмме железо-углерод на рис. 3.24). Эта операция производится как для доэвтектоидных, так и для заэвтектоидных сталей.

Охлаждение при неполном отжиге такое же, как и при полном: вместе с печью.

При неполном отжиге доэвтектоидной стали ферритная составляющая структуры не изменяется, так как феррит сохраняется при нагреве. Поэтому полного исправления структуры не происходит. Обычно эта операция производится для уменьшения твердости и улучшения обрабатываемости стали, снятия внутренних напряжений.

Широко применяют неполный отжиг заэвтектоидных сталей для получения структуры зернистого перлита.

Нормализация заключается в нагреве стали до температур на 50–70 °С выше линии GSE и в охлаждении на воздухе после небольшой выдержки. При нормализации основная структура получается перлитная, но более мелкая, чем при полном отжиге. В отдельных случаях в структуре стали даже может образоваться сорбит – более мелкая, чем перлит, феррито-цементитная смесь.

Нормализация часто заменяет полный отжиг как более производительная и экономичная операция.

Разница в свойствах после полного отжига и нормализации для низкоуглеродистых сталей получается незначительная. Но для высокоуглеродистых сталей после нормализации получают несколько повышенные прочностные свойства и твердость.

Диффузионный отжиг применяется для выравнивания химического состава литой стали, уменьшения внутрикристаллической ликвации.

Это достигается за счет диффузионных процессов. Поэтому, чтобы обеспечить высокую скорость диффузии, сталь нагревают до высоких температур в аустенитной области (см. рис. 3.24). Такой нагрев производится намного выше линии GSE на диаграмме железо-углерод.

Для сталей это чаще всего температуры 1000–1200 °С. При этих температурах делается длительная выдержка (8–15 ч) и затем медленное охлаждение.

Выравнивание состава стали положительно сказывается на механических свойствах, особенно на пластичности.

Термическая обработка чугуна

Термическую обработку чугуна применяют:

- 1) для повышения механических свойств и износостойкости;
- 2) для улучшения обрабатываемости резанием в результате снижения твердости при термической обработке;
- 3) для снятия напряжений, возникающих в изделиях из чугуна при литье.

При термической обработке в чугуне развиваются такие же превращения, как и в стали, но в чугуне еще дополнительно может происходить графитизация, которая приводит к дополнительному изменению свойств.

Тема 3.2. Химико-термическая и термомеханическая обработка сталей и сплавов

Химико-термическая обработка (ХТО)

Химико-термическая обработка – сочетание теплового и химического воздействия на материал с целью изменения состава, структуры и свойств поверхностных слоев изделий путем диффузионного насыщения их металлами и неметаллами из внешней активной среды.

Влияние основных параметров процесса на толщину диффузионного слоя представлено на рис. 3.25.

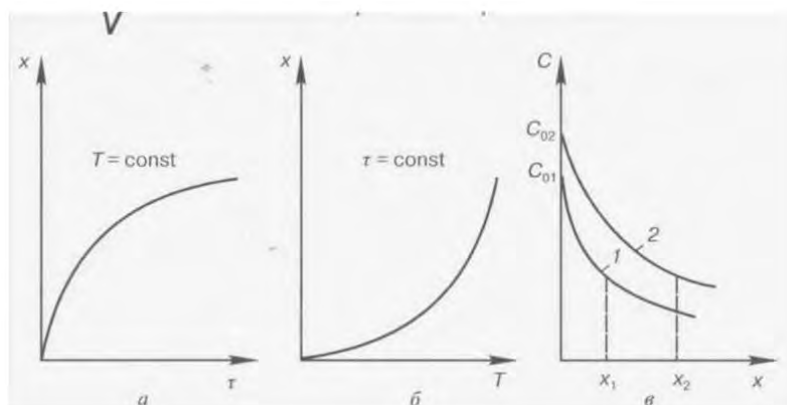


Рисунок 3.25 – Влияние времени насыщения (а), температуры (б) и концентрации диффундирующего элемента (в) на толщину диффузионного слоя

ХТО может быть однокомпонентной:

Цементация – насыщение поверхностного слоя углеродом (получаемые химические соединения – карбиды);

Азотирование – насыщение азотом (нитриды);

Силицирование – насыщение кремнием (силициды);

Алитирование – насыщение алюминием (интерметаллиды);

Хромирование – насыщение хромом (интерметаллиды) и др.

ХТО также может быть многокомпонентной:

Нитроцементация (цианирование) – насыщение азотом и углеродом;

Хромосилицирование – насыщение хромом и кремнием и др.

Цементация

Под цементацией понимают процесс насыщения поверхности углеродом. Ее целью является получение твердой и износостойкой поверхности.

Цементации обычно подвергают низкоуглеродистые стали, содержащие 0,1...0,20 (иногда до 0,30) % С. После обработки поверхностные слои содержат 0,8...1,0 % С, а сердцевина изделий остается вязкой. На цементацию детали обычно поступают после механической обработки. Если цементации следует подвергать часть поверхности детали, то нецементируемые участки защищают или изолируют специальными обмазками.

Цементацию можно провести в твердом карбюризаторе, в виде пасты, в кипящем слое или в газовом карбюризаторе.

Цементацию в твердом карбюризаторе производят в смеси древесного угля (или других углеродсодержащих материалов) и активизатора (BaCO_3 или Na_2CO_3) при температуре 900-950 °С.

Цементация в пастах заключается в нанесении углеродсодержащих материалов в виде обмазки, суспензии или шликера, сушке и нагреве токами высокой частоты. Температура – 910-1050 °С.

За глубину цементованного слоя принимают обычно не общую глубину слоя x_0 , в котором повысилось содержание углерода, а так называемую эффективную глубину x_3 – расстояние от поверхности до участка с содержанием углерода 0,45 %, что соответствует твердости после закалки 50 HRC (рис. 3.26).



Рисунок 3.26 – Распределение углерода по сечению цементованных деталей

При длительности процесса цементации от пяти до 24-х часов глубина цементованного слоя получается от 0,4 до 2,5 мм. Чем дольше длится процесс, тем на большую глубину от поверхности изделия происходит насыщение углеродом. В настоящее время цементация в твердом карбюризаторе применяется довольно редко, так как это малопроизводительный и экологически вредный процесс.

Изменение содержания углерода, твердости и микроструктуры по глубине цементованного слоя представлено на рис. 3.27.

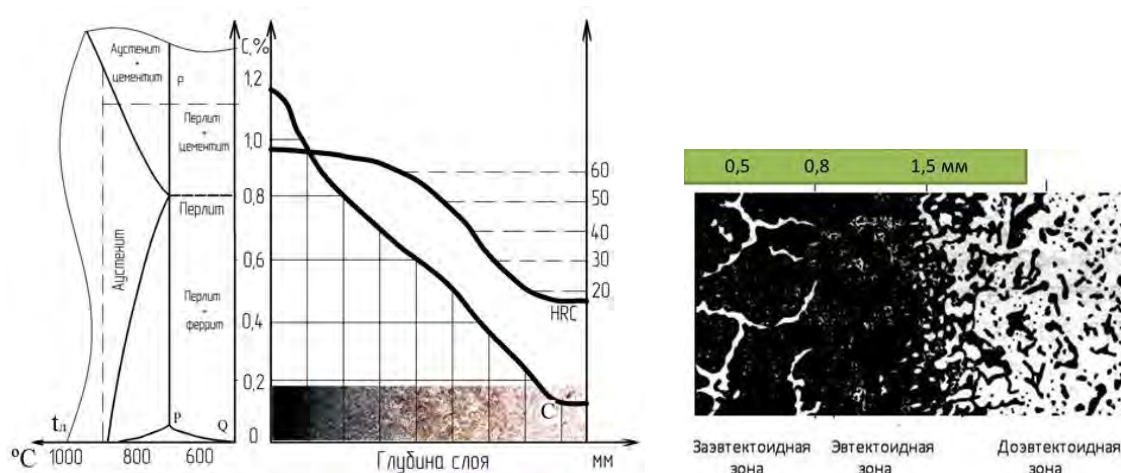


Рисунок 3.27 – Изменение содержания углерода, твердости и микроструктуры по глубине цементованного слоя

Для газовой цементации используются специальные печи (рис. 3.28, 3.29), в которых поддерживается необходимая атмосфера. Этот процесс более производительный, чем в твердом карбюризаторе. Здесь цементованный слой глубиной 0,8–1,2 мм получается за 3–5 часов.

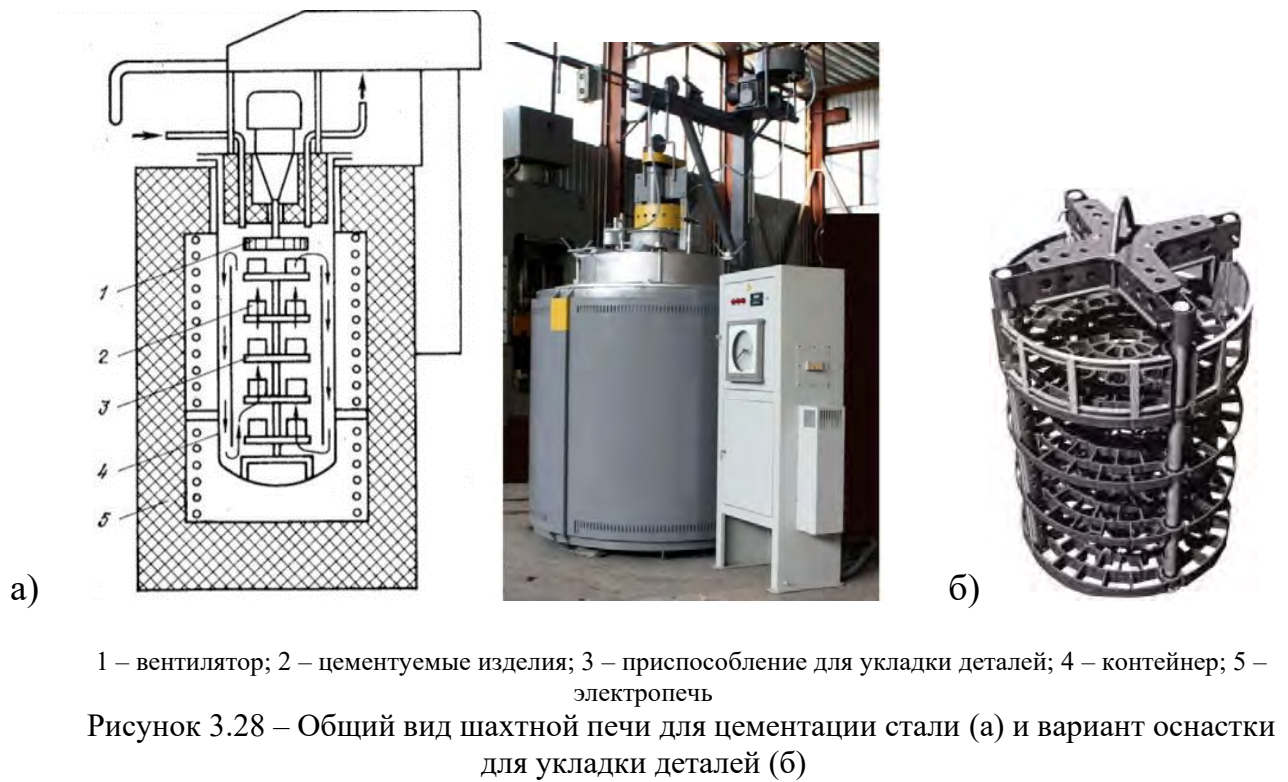


Рисунок 3.29 – Участок для химико-термической обработки

Вакуумные печи для химико-термической обработки сплавов представлены на рис. 3.30.



Рисунок 3.30 – Вакуумные печи для химико-термической обработки сплавов

Термическая обработка цементованных изделий заключается в закалке и низком отпуске. Твердость поверхностного слоя детали достигает 58-62 HRC при твердости сердцевины детали 25-35 HRC и ниже.

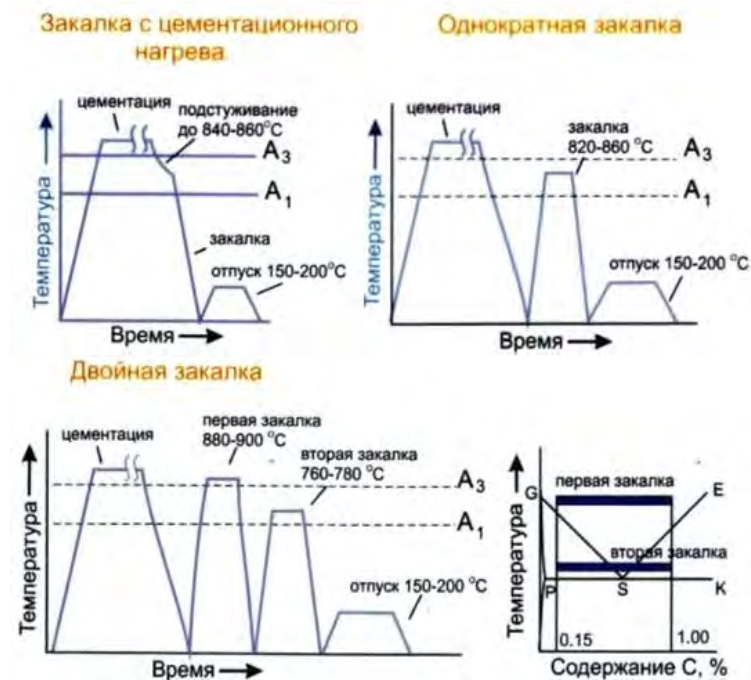


Рисунок 3.31 – Термическая обработка цементованных изделий

Азотирование

При азотировании поверхностный слой деталей насыщается азотом с целью увеличения износостойкости поверхности. При этом процессе получается более высокая твердость, чем при цементации (до 70–72 HRC или 1200 HV), а следовательно, и более высокая износостойкость. Одновременно возрастает коррозионная стойкость стали в атмосфере и усталостная прочность (сопротивление разрушению при знакопеременных нагрузках).

Но азотирование – более длительный процесс, чем цементация, и глубина упрочненного слоя здесь получается меньше. Высокая твердость азотированного слоя сохраняется при нагреве до 500–600 °С. Это существенно выше, чем у цементованного слоя.

Осуществляется процесс азотирования *в атмосфере диссоциированного аммиака при температуре 500–600 °С.*

Поскольку температуры азотирования невысокие и скорость диффузии при этом мала, процесс идет достаточно медленно. Так, азотированный слой глубиной от 0,1 до 0,8 мм при температуре 500–520 °С получается соответственно **за время от трех до 90 часов.**

Попадая в сталь, азот частично растворяется в твердом растворе и образует с железом нитриды Fe_4N , Fe_2N . Если в стали содержатся легирующие элементы, то азот может взаимодействовать и с ними, образуя нитриды этих элементов (например, CrN , MoN).

Эта операция чаще всего является заключительной в технологическом процессе изготовления изделий. Она производится после полной механической обработки и закалки с отпуском.

Для азотирования обычно используются конструкционные среднеуглеродистые стали, легированные хромом, алюминием и другими элементами: 38ХМЮА, 35ХЮА, 30Х2Н2ВФА и др.

Иногда с целью дополнительного увеличения износостойкости азотированию подвергается инструмент, изготовленный из высоколегированной быстрорежущей стали.

Значительное сокращение времени азотирования (в 2...3 раза) получается при азотировании в «тлеющем разряде», т. е. когда обрабатываемую деталь, находящуюся в разреженной атмосфере, содержащей азот, подключают к отрицательному электроду - катоду. В качестве анода служит контейнер. Между катодом и анодом возникает тлеющий разряд. В рабочем пространстве увеличивается концентрация атомарного азота, деталь нагревается до температуры насыщения в результате бомбардировки ионами газа.

Т.о. повысить эффективность процесса азотирования возможно используя процесс ионно-плазменного азотирования, осуществляемый в специальных вакуумных печах (рис. 3.32).

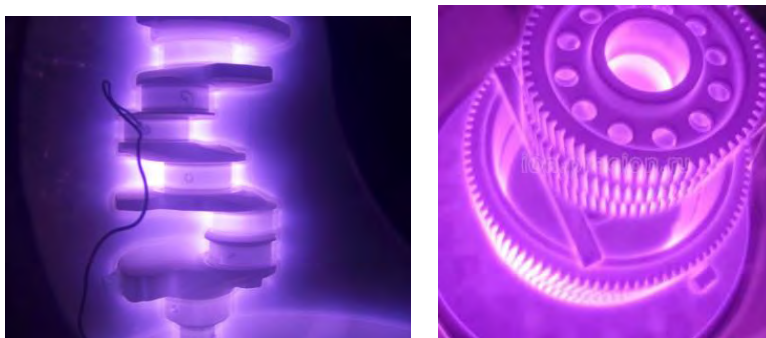


Рисунок 3.32 – Изображение деталей в процессе ионно-плазменного азотирования

Быстрым является азотирование в жидких средах - расплавленных цианистых солях (тенифер-процесс). Как и при газовом азотировании, так и при тенифер-процессе твердость азотированного слоя составляет 300...350 HV для углеродистых сталей, а для легированных может меняться от 600 до 1100 HV. При жидкостном азотировании не происходит ни коробления деталей, ни заметного изменения их размеров. Недостатками этого процесса являются токсичность и высокая стоимость цианистых солей.

Нитроцементация – это одновременное диффузионное насыщение поверхностного слоя деталей азотом и углеродом.

По своим свойствам нитроцементированный слой стали занимает промежуточное положение между цементованным и азотированным слоями. Газовая нитроцементация осуществляется в смеси науглероживающего газа (светильный газ, **метан**, синтин и др.) и **аммиака**. Различают две разновидности этого процесса – высокотемпературный и низкотемпературный. В первом случае нитроцементация идет при температуре 820–850 °С, а во втором – при 530–570 °С.

В практике проведения газовой нитроцементации **длительность процесса обычно составляет от двух до 12 часов**. Иногда **низкотемпературный процесс нитроцементации, особенно в жидкой среде (расплавы цианистых солей), называют цианированием**. Его используют для изделий из теплоустойчивых сталей. Например, такой обработке подвергают инструмент из быстрорежущих сталей. Это обеспечивает повышение его износостойкости.

Глубина насыщенного углеродом и азотом слоя при газовой нитроцементации в зависимости от температуры изменяется нелинейно (рис. 3.33).

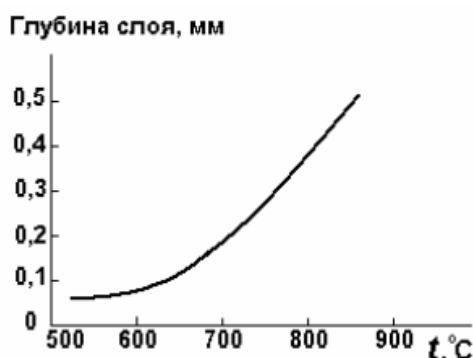


Рисунок 3.33 – Глубина насыщенного углеродом и азотом слоя при газовой нитроцементации (при продолжительности 2 часа)

Диффузионная металлизация

Алитирование

Алитированием называется ХТО, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя сталей и сплавов алюминием при нагреве в порошковой среде, содержащей источник алюминия (порошок чистого алюминия, Fe-Al и др.), галогенидный активатор (AlF_3 , NaF) и инертный наполнитель (Al_2O_3 или SiO_2). Температура процесса 900-1050 °С.

Микроструктура алюминидного покрытия на стали 45Х показана на рис. 3.34.

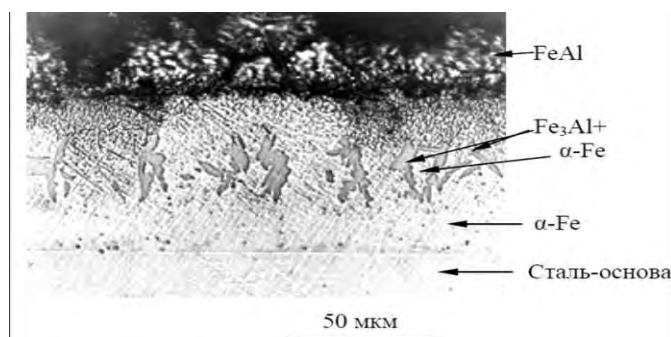


Рисунок 3.34 – Микроструктура алюминидного покрытия на стали 45Х

Термомеханическая обработка

Существует и другая возможность увеличения комплекса механических свойств конструкционных сталей. Это термомеханическая обработка, представляющая собой совмещение пластической деформации с последующей закалкой, т.е. закалку предварительно де-

формированного аустенита. Существуют несколько разновидностей термомеханической обработки. Основными из них являются высокотемпературная (ВТМО) и низкотемпературная термомеханическая обработка (НТМО) (рис. 3.35).

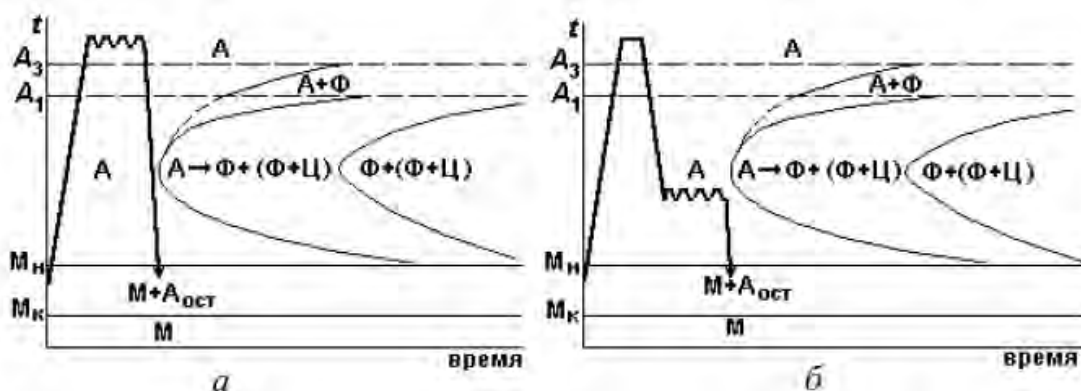


Рисунок 3.35 – ВТМО (а) и НТМО (б) для доэвтектоидной стали

Например, при изготовлении буровых штанг с использованием ВТМО их работоспособность возрастает в 3 раза.

Недостатком термомеханической обработки (особенно НТМО) является усложнение технологического процесса. Поэтому большого распространения в промышленном производстве эти процессы не получили.

Упрочнение также происходит в процессах прокатки, волочения и экструзии. Также применяют процесс накатки деталей роликами (рис. 3.36) и обстрел поверхности дробью.

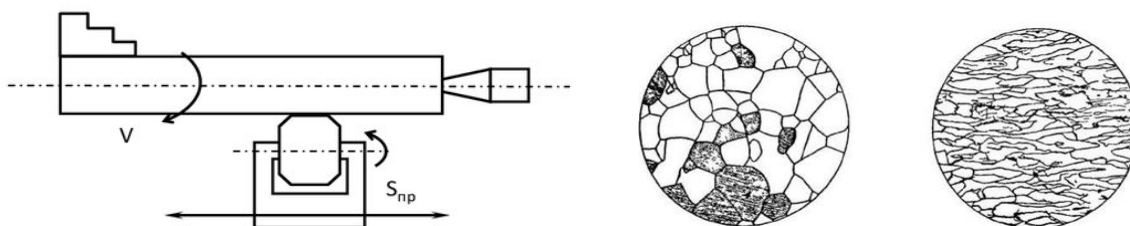
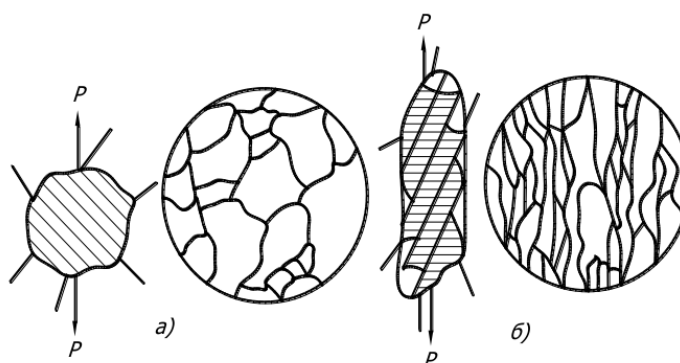


Рисунок 3.36 – Схема накатки поверхности детали роликом и микроструктура поверхностного слоя до и после обработки

Изменение формы зерна металла при деформации представлено на рис. 3.37.



а - схема микроструктуры металла до деформации;

б - схема микроструктуры металла после деформации

Рисунок 3.37 – Изменение формы зерна металла в результате скольжения

Влияние степени пластической деформации на прочность и пластичность бронзы представлено на рис. 3.38.

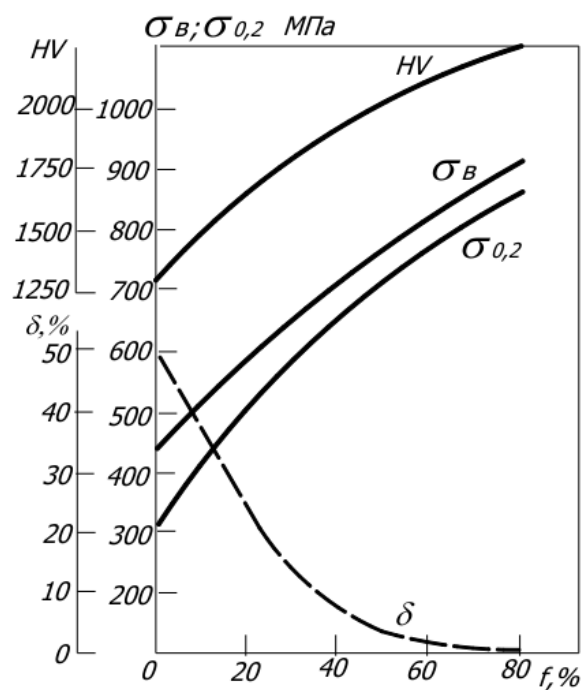


Рисунок 3.38 – Влияние степени пластической деформации f на прочность (σ_B , $\sigma_{0,2}$, HV) и пластичность (δ) бронзы

**ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
«МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»**

для специальности

**6-05-0714-06 «Оборудование и технологии вакуумной, компрессорной и
низкотемпературной техники»
профилизации «Вакуумная и компрессорная техника»**

ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Лабораторный практикум

**по учебной дисциплине для специальности 6-05-0714-06 «Оборудование и технологии
вакуумной, компрессорной и низкотемпературной техники»
профилизации «Вакуумная и компрессорная техника»**

Лабораторная работа № 1

МАКРОСТРУКТУРНЫЙ И МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗЫ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цель работы – изучение устройства и работы металлографического микроскопа, ознакомление с методикой приготовления макро- и микрошлифов, приобретение практических навыков исследования изломов, микро- и макрошлифов, зарисовка простейших микро-структур.

Порядок проведения и задания работы

1. Ознакомиться с методами и приборами, предназначенными для изучения структуры металлов и сплавов.
2. Изучить устройство и принцип работы микроскопа МИ-1.
3. Изучить методику приготовления макро- и микрошлифов.
4. Научиться определять увеличение микроскопа на основании паспортных данных объектива и окуляра.
5. Изучить микроструктуры микрошлифов разных сплавов на микроскопе МИ-1 и зарисовать их.
6. Сделать выводы и составить отчет по работе.

Содержание отчета

1. Название, цель и задачи работы.
2. Принципиальная схема светового микроскопа и описание его работы.
3. Краткое описание методики приготовления микрошлифов.
4. Эскизы микроструктур сплавов, изученных на занятиях.
5. Выводы по работе.

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цель работы – ознакомление с методиками испытаний материалов на твердость, приобретение навыков измерения твердости металлов и сплавов различными методами.

Порядок проведения и задания работы

1. Ознакомиться с методами и приборами для измерения твердости и микротвердости.
2. Изучить устройство и принцип работы ультразвукового твердомера и твердомера динамического действия Импульс-2М.
3. Произвести измерения твердости различных материалов.
4. Данные испытаний твердости занести в таблицу. Показатели твердости, усредненные по различным точкам образца полученные разными твердомерами сравнить друг с другом.
5. Сделать выводы и составить отчет по работе.

Содержание отчета

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

Лабораторная работа № 3

ТЕРМИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ДИАГРАММ СОСТОЯНИЯ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ

Цель работы: изучение оборудования и методики проведения термического анализа, изучение типичных микроструктур сплавов, построение диаграмм состояния двойных систем.

Порядок проведения и задания работы

1. Изучить установку для исследования процесса кристаллизации сплава термическим методом и зарисовать ее схему.
2. Изучить диаграммы состояния и методику построения диаграмм с помощью метода термического анализа.
3. Построить кривые охлаждения (с применением правила Гиббса и пояснением фазовых превращений) для выбранного преподавателем сплава двойной системы.
4. Определить с помощью правила отрезков состав и количественное соотношение фаз для заданной температуры сплава.
5. Посмотреть шлифы сплавов системы с эвтектикой типа Pb–Sb или Sn–Zn, схематично зарисовать их микроструктуры.
6. Сделать выводы и составить отчет по работе.

Содержание отчета

1. Название, цель и задачи работы.
2. Порядок проведения термического анализа, его основное назначение, схема оборудования для осуществления метода.
3. Диаграмма состояния эвтектического типа с кривыми охлаждения, основные определения.
4. Типичные микроструктуры сплавов в двойной металлической системе эвтектического типа.
5. Выводы по работе.

Лабораторная работа № 4 ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗО – УГЛЕРОД

Цель работы: изучение диаграммы состояния железоуглеродистых сплавов, определение фазового и структурного состояния сплавов в зависимости от их состава и температуры.

Порядок проведения и задания работы

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

Соотношение фазовых или структурных составляющих сталей с достаточной точностью можно определить по правилу отрезков.

Правило можно применять только в областях диаграммы, содержащих две составляющие. Например, сталь 40 (0,4 % C) при 400° C имеет структуру Ф + П, процентное содержание ее составляющих такое:

$$\Phi = (0,8 - 0,4) / (0,8 - 0,01) \times 100\% \sim 50\%.$$

$$П = 100 - 50 = 50\%$$

А процентное соотношение фаз (Ф + Ц) в стали 40 следующее:

$$\Phi = (6,67 - 0,4) / (6,67 - 0,01) \times 100\% \sim 94\%$$

$$Ц = 100 - 94 = 6\%$$

7. Сделать выводы и написать отчет по работе.

Содержание отчета

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

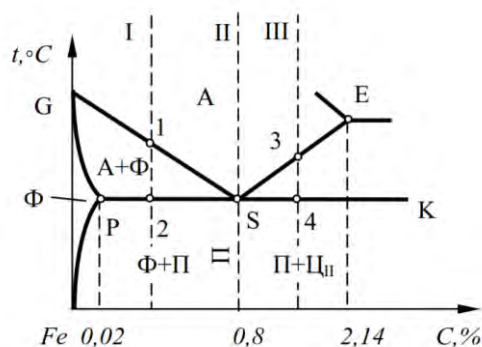
Лабораторная работа № 5

МИКРОСТРУКТУРА, СВОЙСТВА И МАРКИРОВКА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Цель работы – изучение микроструктуры углеродистых сталей в равновесном состоянии и определение марки углеродистой стали по структуре.

Порядок проведения и задания работы

1. Начертить участок диаграммы состояния Fe – Fe₃C с обозначениями фаз, соответствующий углеродистым сталям.



2. Просмотреть набор приготовленных шлифов углеродистых сталей при увеличении 250...500.
3. Подробно рассмотреть шлиф эвтектоидной стали для изучения строения перлита при увеличении не менее 500.

4. Схематично зарисовать изученные микроструктуры сталей.

5. По микроструктуре углеродистых сталей определить содержание в них углерода, изучить их структурно-фазовый состав.

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

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

$$50\% \text{ П } (0,8\% \text{ C}) / 100\% \sim 0,4\% \text{ C}$$

$$50\% \text{ Ф } (0,006\% \text{ C}) / 100\% \sim 0,003\% \text{ C}$$

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

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

$$95\% \text{ П } (0,8\% \text{ C}) / 100\% \sim 0,76\% \text{ C}$$

$$5\% \text{ Ц } (6,67\% \text{ C}) / 100\% \sim 0,33\% \text{ C}$$

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

6. Сделать выводы и составить отчет по работе.

Содержание отчета

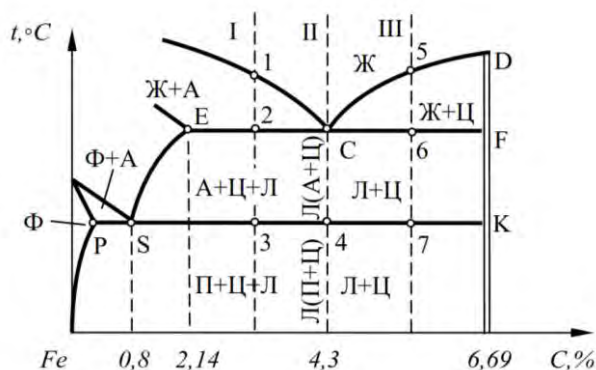
1. Название, цель и задачи работы.
2. Основные представления об углеродистых сталях, их структурное различие, свойства и маркировка.
3. Зарисовки микроструктур углеродистых сталей. Каждую структуру (эвтектоидной, доэвтектоидной и заэвтектоидной стали) нужно подписать, а стрелками указать структурные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

Лабораторная работа № 6 МИКРОСТРУКТУРА, СВОЙСТВА И МАРКИРОВКА ЧУГУНОВ

Цель работы: изучение микроструктуры чугунов разных марок в равновесном состоянии, определение структурно-фазового состава белых чугунов.

Порядок проведения и задания работы

1. Начертить участок диаграммы состояния Fe – Fe₃C с обозначениями фаз, соответствующий белым чугунам.



2. Просмотреть набор приготовленных шлифов белых, серых, ковких, высокопрочных чугунов при увеличении 250...500.
3. Подробно рассмотреть шлиф эвтектического чугуна для изучения строения ледебурита при увеличении не менее 500.
4. Схематично зарисовать изученные микроструктуры чугунов.
5. По микроструктуре белых чугунов определить содержание в них углерода, изучить их структурно-фазовый состав.
6. Сделать выводы и составить отчет по работе.

Содержание отчета

1. Название, цель и задачи работы.
2. Основные представления о чугунах, их структурное различие, свойства и маркировка.
3. Зарисовки микроструктур различных чугунов. Каждую структуру чугуна нужно подписать, а стрелками указать структурные составляющие.
4. Расчет структурно-фазового состава белого чугуна железоуглеродистого сплава, заданного преподавателем.
5. Выводы по работе.

Лабораторная работа № 7 МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ, СФОРМИРОВАННЫХ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

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

Порядок проведения и задания работы

1. Просмотреть набор приготовленных шлифов с диффузионными цементованными и карбидными слоями на углеродистых сталях при увеличении 250...500.
3. Подробно рассмотреть (при увеличении не менее 500) шлиф цементованной стали с целью выявления зон с различным содержанием углерода, которые соответствуют микроструктуре доэвтектоидной, эвтектоидной и заэвтектоидной сталям.
4. Схематично зарисовать стали с различными диффузионными покрытиями.
5. Ознакомиться с режимами и составами диффузионного насыщения сталей, характером влияния на их структуру и свойства.
6. Сделать выводы и составить отчет по работе.

Содержание отчета

1. Название, цель и задачи работы.
2. Классификация методов ХТО по назначению, по виду и количеству насыщаемых компонентов, по агрегатному состоянию насыщающих сред.
3. Зарисовки микроструктур покрытий, полученных при диффузионном насыщении сталей углеродом и карбидообразующими металлами. Каждую структуру нужно подписать, а стрелками указать структурные составляющие.
4. Указать области применения, режимы ХТО и свойства изучаемых покрытий.
5. Выводы по работе.

Лабораторная работа № 8 **МИКРОСТРУКТУРА, СВОЙСТВА И МАРКИРОВКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СПЛАВОВ**

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

Порядок проведения и задания работы

1. Просмотреть набор приготовленных шлифов углеродистых, быстрорежущих и штамповых сталей, твердых сплавов при увеличении 250...500.
2. Подробно рассмотреть шлиф закаленной быстрорежущей стали Р18 с целью определения размера зерна при увеличении не менее 500.
3. Схематично зарисовать изученные микроструктуры сталей и твердых сплавов.
4. Ознакомиться с режимами термообработки рассмотренных сталей, характером влияния на их структуру и свойства.
5. Сделать выводы и составить отчет по работе.

Содержание отчета

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

**ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
«МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»**

**для студентов специальности
6-05-0714-06 «Оборудование и технологии вакуумной, компрессорной и
низкотемпературной техники»
профилизации «Вакуумная и компрессорная техника»**

РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

Список контрольных вопросов по дисциплине:

1. Классификация металлов, применяемых в машиностроении. Основные свойства черных и цветных металлов. Получение чугуна и стали. Сравнение основных свойств железа, меди, алюминия, титана.
2. Атомно-кристаллическое строение металлов. Кристаллизация металлов. Типы кристаллических решеток. Полиморфизм. Анизотропия. Аморфное состояние.
3. Дефекты кристаллических решеток. Влияние плотности дислокаций на прочность. Влияние пластической деформации на структуру и свойства металлов.
4. Виды изломов. Методы исследования структуры материалов. Строение металлического слитка. Дефекты структуры.
5. Методы исследования структуры металлов: макроскопический анализ.
6. Методы исследования структуры металлов: микроскопический анализ.
7. Методы исследования структуры и дефектов металлов: рентгеноструктурный анализ, ПЭМ, СЭМ, УЗИ и магнитопорошковый метод
8. Методы определения твердости материалов. Понятия «твердость материала», «индентор».
9. Определение твердости материалов по методу Бринелля. Обозначение твердости по Бринеллю на машиностроительных чертежах.
10. Определение твердости материалов по методу Роквелла. Обозначение твердости по Роквеллу на машиностроительных чертежах.
11. Определение твердости материалов по методу Виккерса. Обозначение твердости по Виккерсу на машиностроительных чертежах.
12. Механические свойства металлов, определяемые при испытании на растяжение и сжатие. Упругая и пластическая деформация. Характеристики пластичности. Виды диаграмм растяжения и сжатия и их характерные участки.
13. Механические свойства металлов, определяемые при испытании на ударную вязкость. Хрупкий и вязкий излом. Температурный порог хладноломкости.
14. Понятие металлического сплава. Понятия «компонент», «фаза», «структура». Типы структур сплавов.
15. Строение металлического сплава: твердые растворы, механические смеси и химические соединения.
16. Диаграмма состояния эвтектического типа. Диаграммы состояния сплавов с ограниченной растворимостью.
17. Диаграмма состояния системы, в которой компоненты образуют непрерывный ряд твердых растворов.
18. Диаграммы сплавов с устойчивым химическим соединением, диаграммы состояний сплавов с перитектическим превращением. Изменение свойств сплавов в соответствии с их диаграммой состояния.
19. Диаграмма состояния железо-углерод.
20. Фазы и структуры в системе железо-углерод, их краткие характеристики.
21. Стали обыкновенного качества. Маркировка. Автоматные стали.
22. Углеродистые инструментальные стали. Характеристика и маркировка.
23. Углеродистые качественные конструкционные стали.
24. Чугун. Влияние формы углерода на свойства чугуна. Структуры чугунов. Маркировка чугунов.
25. Марки чугунов. Специальные чугуны (антифрикционный, жаростойкий и жаропрочный чугун).
26. Классификация легированных сталей.
27. Инструментальные легированные стали. Штамповые стали. Быстрорежущие стали.
28. Быстрорежущие стали. Свойства и маркировка.

29. Легированные стали с особыми свойствами. Коррозионностойкие, жаростойкие, жаропрочные, износостойкие. Влияние легирующих элементов на свойства. Примеры марок.

30. Твердые инструментальные сплавы. Классификация, маркировка. Сравнение с инструментальными сталями.

31. Упрочняющая и разупрочняющая термическая обработка металлов. Критические точки. Превращения аустенита при охлаждении.

32. Отжиг и нормализация как виды термической обработки стали.

33. Объемная закалка стали. Охлаждающие среды. Закаливаемость и прокаливаемость сталей. Поверхностная закалка.

34. Внутренние напряжения в закаленной стали. Отпуск стали.

35. Виды химико-термической обработки стали. Диффузионное насыщение поверхности металлами и неметаллами.

36. Цементация стали.

37. Азотирование стали.

38. Нитроцементация и цианирование стали.

39. Медь и ее сплавы. Свойства. Маркировка.

40. Алюминий и его сплавы. Свойства. Маркировка.

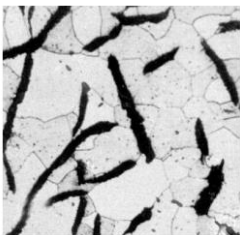
41. Неметаллические машиностроительные материалы. Композиционные материалы.

Примеры тестов для контроля знаний

Тест содержит 20 вопросов. К каждому заданию даны 5 вариантов ответа, среди которых только 1 является верным.

Вариант 1

№	Задание	Варианты ответов
1	Какой буквой в марках стали обозначают цирконий	1) С; 2) Ц; 3) М; 4) Ю; 5) Д
2	Существование одного металла в нескольких кристаллических формах носит название:	1) полиморфизм; 2) анизотропия; 3) кристаллизация; 4) текстура; 5) изотропия
3	Состав твердого сплава ВК20 содержит	1) ванадий и кобальт; 2) карбид вольфрама и кобальт; 3) ванадий и кальций; 4) висмут и кобальт; 5) вольфрам и кальций
4	При испытаниях на маятниковом копре определяют:	1) предел прочности при растяжении; 2) ударную вязкость; 3) относительное удлинение; 4) предел ползучести; 5) пределы текучести, упругости, пропорциональности
5	Какой буквой в марках цветных сплавов обозначают магний	1) Мц; 2) Г; 3) М; 4) Мг; 5) Мш
6	Чугунами называют:	1) сплавы железа с углеродом, содержащие до 0,02 % С; 2) сплавы железа с углеродом, содержащие от 0,02 до 2,14 % С; 3) сплавы железа с углеродом, содержащие от 2,14 до 6,67 % С; 4) сплавы железа с углеродом, содержащие 0,8 % С; 5) сплавы железа с углеродом, содержащие более 6,67 % С.

7	Чугун, в котором весь углерод находится в виде химического соединения Fe_3C , называется:	1) серым; 2) ковким; 3) белым; 4) высокопрочным; 5) жаропрочным
8	Минимальное значение предела прочности чугуна СЧ25 в МПа равно:	1) 25; 2) 150; 3) 250; 4) 2500; 5) 10
9	При закалке углеродистых сталей со скоростью $V > V_{\text{кр}}$ образуется:	1) перлит; 2) графит; 3) мартенсит; 4) ледебурит; 5) феррит
10	Какой буквой в марках цветных сплавов обозначают никель	1) Мц; 2) Г; 3) М; 4) Б; 5) Н
11	Буква А в конце при маркировке стали (например, 39ХМЮА, У12А) обозначает:	1) азот; 2) высококачественную сталь; 3) автоматную сталь; 4) сталь ферритного класса; 5) алюминий
12	Какая из сталей относится к подшипниковым?	1) 40Х; 2) АС4; 3) ШХ15; 4) 18ХГТ; 5) Ст3
13	Металлические материалы, способные сопротивляться разрушению в агрессивных средах, называются:	1) жаростойкими; 2) жаропрочными; 3) коррозионностойкими; 4) износостойкими; 5) броневыми
14	К каким сталям относится марка Р9	1) углеродистым обыкновенного качества; 2) быстрорежущим; 3) жаростойким; 4) жаропрочным; 5) коррозионностойким
15	К каким сталям относится марка 12Х17	1) углеродистым обыкновенного качества; 2) быстрорежущим; 3) с высоким сопротивлением износу при ударных нагрузках; 4) жаропрочным; 5) коррозионностойким
16	Высокая коррозионная стойкость алюминиевых сплавов обусловлена:	1) типом кристаллической решетки; 2) наличием тонкой окисной плёнки Al_2O_3 ; 3) наличием примесей; 4) легированием хромом; 5) высоким содержанием углерода
17	Какому материалу соответствует представленная микроструктура 	1) эвтектоидная перлитная сталь; 2) ферритный серый чугун; 3) медь; 4) ферритная сталь; 5) алюминий
18	Состав стали марки 3Х2В8Ф со-	1) хром; ванадий; фтор;

	держит	2) хром; вольфрам; фтор; 3) хром; вольфрам; ванадий; 4) хром; висмут; фтор; 5) хром; вольфрам; франций
19	Какие стали при маркировке обозначают буквами Ст и цифрой, указывающий порядковый номер стали: Ст0, Ст1, Ст2, Ст3 ...?	1) инструментальные углеродистые; 2) стали обыкновенного качества; 3) легированные стали; 4) быстрорежущие стали; 5) коррозионностойкие стали
20	Что такое цементит?	1) смесь аустенита с ферритом; 2) химическое соединение железа и углерода; 3) смесь перлита с ферритом; 4) твердый раствор углерода в железе; 5) марка цемента повышенной прочности

Вариант 2

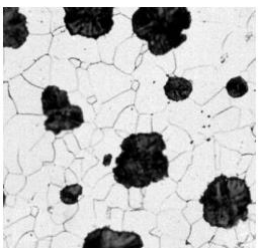
№	Задание	Варианты ответов
1	Какой буквой в марках стали обозначают вольфрам	1) С; 2) Г; 3) В; 4) Ю; 5) Д
2	Зависимость свойств кристалла от направления, возникающая в результате упорядоченного расположения атомов в пространстве, называется:	1) полиморфизмом; 2) анизотропией; 3) аллотропией; 4) аморфизацией; 5) кристаллизацией.
3	К каким сталям относится марка 02Х18	1) углеродистым обыкновенного качества; 2) быстрорежущим; 3) с высоким сопротивлением износу при ударных нагрузках; 4) жаропрочным; 5) коррозионностойким
4	При испытании образца на растяжение определяются:	1) предел прочности σ_B ; 2) твердость по Роквеллу HRC; 3) твердость по Бринеллю HB; 4) ударная вязкость KCU; 5) магнитная проницаемость μ
5	Какой буквой в марках цветных сплавов обозначают медь	1) Мц; 2) Г; 3) М; 4) Б; 5) Мш
6	Твердый раствор внедрения углерода в α -Fe называется:	1) цементитом; 2) ферритом; 3) аустенитом; 4) ледебуритом; 5) перлитом
7	В каких сталях в наибольшей степени удален кислород?	1) в кипящих «кп»; 2) в спокойных «сп»; 3) в полуспокойных «пс»; 4) в низкоуглеродистых; 5) в пердеельных
8	Чугуны, в которых графит имеет шаровидную форму, называются:	1) серыми; 2) ковкими; 3) белыми; 4) высокопрочными; 5) светлыми
9	Какие стали целесообразно подвергать цементации?	1) содержащие свыше 0,25 % С; 2) содержащие менее 0,25 % С;

		3) эксплуатируемые при температурах выше 500 °С; 4) эксплуатируемые в газовых средах; 5) высокоуглеродистые
10	Состав твердого сплава ВК6 содержит	1) ванадий и кобальт; 2) карбид вольфрама и кобальт; 3) ванадий и кальций; 4) висмут и кобальт; 5) вольфрам и кальций
11	Латунь Л80. Цифра в маркировке обозначает:	1) твёрдость; 2) временное сопротивление; 3) содержание меди; 4) содержание цинка; 5) содержание лантана
12	Какое свойство алюминия используют для изготовления теплообменников в промышленных и бытовых холодильных установках?	1) отражательную способность; 2) коррозионную стойкость; 3) теплопроводность; 4) электрическую проводимость; 5) высокую температуру плавления
13	К каким сталям относится марка Р18К5Ф2	1) углеродистым обыкновенного качества; 2) быстрорежущим; 3) жаростойким; 4) жаропрочным; 5) коррозионностойким
14	Коррозионностойкие (хромистые) стали содержат хрома не менее	1) 5%; 2) 7%; 3) 10%; 4) 12%; 5) 32%
15	В маркировке легированных сталей буквой Г обозначают	1) хром; 2) вольфрам; 3) молибден; 4) марганец; 5) германий
16	Какому материалу соответствует представленная микроструктура 	1) эвтектоидная перлитная сталь; 2) феррито-перлитный серый чугун; 3) медь; 4) ферритная сталь; 5) алюминий
17	Какой буквой в марках цветных сплавов обозначают олово	1) С; 2) Г; 3) М; 4) Б; 5) О
18	Линией «Ликвидус» называют температуру, соответствующую:	1) началу кристаллизации; 2) полиморфному превращению; 3) эвтектическому превращению; 4) концу кристаллизации; 5) возникновению ликвации
19	Минимальное значение предела прочности чугуна ВЧ50 в МПа равно:	1) 500; 2) 50; 3) 5; 4) 0,5; 5) 5000
20	Какая из сталей относится к износостойким	1) 40Х; 2) АС4;

		3) 110Г13Л; 4) 18ХГТ; 5) 45
--	--	-----------------------------------

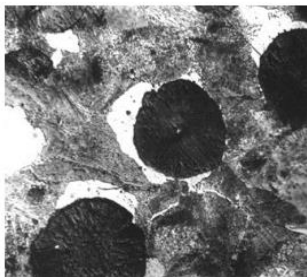
Вариант 3

№	Задание	Варианты ответов
1	Какой буквой в марках стали обозначают кобальт	1) С; 2) К; 3) М; 4) Ю; 5) Д
2	Одна из аллотропных форм углерода это:	1) нитрид; 2) графит; 3) карбид; 4) карбон; 5) гидрид.
3	Измерение твердости, основанное на том, что в плоскую поверхность металла вдавливают под постоянной нагрузкой закаленный шарик, используется:	1) в методе Бринелля; 2) в методе Шора; 3) в методе Роквелла по шкалам А и С; 4) в методе Виккерса; 5) в методе Мооса
4	Ферромагнетиками являются следующие металлы:	1) Al, Cu, Cr; 2) Au, Ag, Pt; 3) W, Mo, Re; 4) Fe, Ni, Co; 5) Zn, Ca, Zr
5	Процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали одновременно азотом и углеродом называется:	1) легированием; 2) азотированием; 3) нитроцементацией; 4) нормализацией; 5) отпуском
6	Какой буквой в марках цветных сплавов обозначают марганец	1) Мц; 2) Г; 3) М; 4) Мг; 5) Мш
7	Какие карбиды составляют основу твердого сплава Т5К10?	1) карбид титана и карбид вольфрама; 2) карбид хрома и карбид молибдена; 3) карбид марганца и карбид хрома; 4) карбид молибдена и карбид вольфрама; 5) карбид железа и карбид алюминия
8	В углеродистых инструментальных сталях впереди маркировки ставится буква	1) И; 2) А; 3) У; 4) В; 5) К
9	В маркировке легированных сталей буквой Ф обозначают	1) фосфор; 2) фтор; 3) ванадий; 4) вольфрам; 5) бор
10	Сплав меди с цинком называется	1) сталью; 2) латунию; 3) дюралюминием; 4) баббитом; 5) ситаллом
11	Состав твердого сплава Т15К6 содержит	1) карбид ванадия, нитрид титана и кобальт; 2) карбид вольфрама, карбид титана и кобальт; 3) тантал и кальций; 4) карбид тантала и кобальт;

		5) карбид тантала и кальций
12	Чем насыщается поверхностный металлический слой при алитировании?	1) углеводородом; 2) алюминием; 3) кремнием; 4) кислородом; 5) серой
13	К каким сталям относится марка 02Х21Т	1) углеродистым обыкновенного качества; 2) быстрорежущим; 3) с высоким сопротивлением износу при ударных нагрузках; 4) жаропрочным; 5) коррозионностойким
14	К каким сталям относится марка Р10К5Ф5	1) углеродистым обыкновенного качества; 2) быстрорежущим; 3) жаростойким; 4) жаропрочным; 5) коррозионностойким
15	Какому материалу соответствует представленная микроструктура 	1) эвтектоидная перлитная сталь; 2) ферритный высокопрочный чугун; 3) медь; 4) ферритная сталь; 5) алюминий
16	Минимальное значение предела прочности чугуна КЧ37–12 в МПа равно:	1) 37; 2) 3,7; 3) 370; 4) 12; 5) 1,2
17	Признаками неисправимого брака при термической обработке стали является:	1) образование мелкозернистой структуры; 2) образование крупного зерна; 3) получение мартенситной структуры; 4) появление участков оплавления по границам зерна и их окисление; 5) растворение углерода
18	Какие структуры термообработанной стали образованы бездиффузионным превращением переохлажденного аустенита?	1) Троостит отпуска, сорбит отпуска; 2) перлит; 3) графит; 4) мартенсит; 5) сорбит, троостит
19	При нормализации деталь охлаждают:	1) на воздухе; 2) в воде; 3) с печью; 4) в масле; 5) в расплаве солей
20	Какая из сталей относится к автоматным:	1) 40А; 2) А12; 3) 08пс; 4) 18ХГТ; 5) У10А

Вариант 4

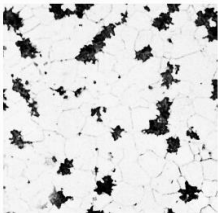
№	Задание	Варианты ответов
1	При расположении атомов одного компонента в узлах кристаллической решетки другого компонента (растворителя) образуются:	1) твердые растворы внедрения; 2) химические соединения; 3) смеси; 4) твердые растворы замещения; 5) аморфные соединения
2	Какой буквой в марках стали обозначают никель	1) С; 2) Н; 3) М; 4) Ю; 5) Д
3	Какой буквой в марках цветных сплавов обозначают кадмий	1) К; 2) Г; 3) М; 4) Кд; 5) Д
4	К каким сталям относится марка Р9К10	1) углеродистым обыкновенного качества; 2) быстрорежущим; 3) жаростойким; 4) жаропрочным; 5) коррозионностойким
5	Металлические материалы, способные сопротивляться ползучести и разрушению при высоких температурах при длительном действии нагрузки, называются:	1) жаростойкими; 2) жаропрочными; 3) коррозионно-стойкими; 4) износостойкими; 5) кислотоупорными
6	Какой легирующий элемент обозначается буквой С при маркировке сталей?	1) селен; 2) углерод; 3) кремний; 4) сурьма; 5) алюминий
7	Какие карбиды составляют основу твердого сплава ВК8?	1) Карбид вольфрама и карбид титана; 2) карбид хрома и карбид молибдена; 3) карбид вольфрама; 4) карбид молибдена и карбид вольфрама; 5) карбид ванадия и карбиды кремния
8	При испытаниях образцов на твердость используется	1) диффузор; 2) индентор; 3) конвектор; 4) инвертор; 5) гранулятор
9	Какие материалы относятся к группе материалов высокой электрической проводимости:	1) тантал и рений; 2) медь и алюминий; 3) графит и пиролитический углерод; 4) цинк и хром; 5) железо и кобальт
10	Вид стали, расплав которой выходит из металлургических печей в слабо окисленном состоянии	1) кипящая «кп»; 2) спокойная «сп»; 3) полуспокойная «пс»; 4) высокоуглеродистая; 5) пердевальная
11	Выберите марку жаропрочного чугуна:	1) СЧ-30; 2) КЧ-37-12; 3) ВЧ60; 4) ЧН11Г7Х2Ш; 5) КЧ-60-3
12	Какие из инструментальных материалов работоспособны при температурах 800–1000 °С?	1) У10; 2) Р6М5; 3) ХВГ;

		4) Т15К6; 5) У13
13	Из предложенных марок сплавов выберите марку свинцовистой бронзы:	1) БрА7; 2) ЛК 80–3; 3) БрОЦ4-3; 4) БрС30; 5) БрОФ6,5-0,4
14	Недостатком закалки в одной среде является	1) неравномерное охлаждение и термические напряжения. 2) сложность определения точного времени охлаждения. 3) большая продолжительность процесса. 4) большие затраты на процесс; 5) недостаточная скорость охлаждения
15	Процесс насыщения поверхностного слоя одновременно азотом и углеродом в расплавленных цианистых солях называется	1) азотированием. 2) нитроцементацией. 3) цианированием. 4) цементацией; 5) цинкованием
16	Какой чугун можно ковать?	1) чугуны не коуют; 2) белый; 3) серый; 4) ковкий; 5) высокопрочный
17	К каким сталям относится марка Р18	1) углеродистым обыкновенного качества; 2) быстрорежущим; 3) жаростойким; 4) жаропрочным; 5) коррозионностойким
18	Какому материалу соответствует представленная микроструктура 	1) эвтектоидная перлитная сталь; 2) феррито-перлитный высокопрочный чугун; 3) медь; 4) ферритная сталь; 5) алюминий
19	Керамические материалы получают:	1) путем вытягивания из расплава; 2) путем свободного охлаждения расплава; 3) путем ускоренного охлаждения расплава; 4) путем формования и термообработки; 5) путем медленного охлаждения расплава с последующей термообработкой
20	Форма нахождения углерода в структуре чугуна марки ВЧ60:	1) пластинчатый графит; 2) цементит; 3) хлопьевидный графит; 4) шаровидный графит; 5) углерод отсутствует

Вариант 5

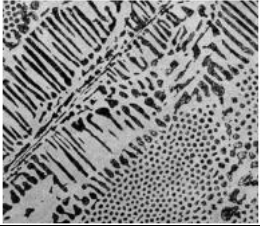
№	Задание	Варианты ответов
1	Какой буквой в марках цветных сплавов обозначают кремний	1) А; 2) Г; 3) М; 4) К; 5) Д
2	Какие дефекты кристаллической решетки являются линейными?	1) вакансия; 2) примесный атом внедрения; 3) дислокация; 4) межузельный атом;

		5) неметаллические включения
3	Измерение твердости, основанное на том, что в плоскую поверхность металла вдавливают под постоянной нагрузкой алмазный индентор в виде конуса с углом при вершине 120° , используется:	1) в методе Бринелля; 2) в методе Шора; 3) в методе Роквелла по шкалам А и С; 4) в методе Виккерса; 5) в методе Мооса
4	Какой буквой в марках стали обозначают редкоземельные элементы	1) Ч; 2) Г; 3) М; 4) Ю; 5) Д
5	Какие карбиды составляют основу твердого сплава Т15К6?	1) карбид марганца и карбид хрома; 2) карбид хрома и карбид молибдена; 3) карбид титана и карбид вольфрама; 4) карбид молибдена и карбид вольфрама; 5) карбид железа и карбид алюминия
6	К каким сталям относится марка 02Х19Н	1) углеродистым обыкновенного качества; 2) быстрорежущим; 3) с высоким сопротивлением износу при ударных нагрузках; 4) жаропрочным; 5) коррозионностойким
7	При введении какого легирующего компонента в сталь повышается твердость, прочность, коррозионная стойкость. В больших количествах делает сталь нержавеющей.	1) марганец; 2) алюминий; 3) молибден; 4) хром; 5) сера
8	При увеличении содержания в стали углерода	1) повышается твердость; 2) повышается пластичность; 3) понижается твердость; 4) пластичность не изменяется; 5) твердость не изменяется
9	Укажите марку качественной стали:	1) 20; 2) Ст4; 3) АС14; 4) Ст3Гпс; 5) Ст6
10	Какой буквой в марках цветных сплавов обозначают свинец	1) Мц; 2) Г; 3) М; 4) Б; 5) С
11	СЧ15 – одна из марок серого чугуна с пластинчатым графитом. Цифра 15 означает:	1) содержание углерода в процентах; 2) относительное удлинение; 3) предел прочности при растяжении; 4) твердость по Бринеллю; 5) ударная вязкость
12	К каким сталям относится марка Р9К5	1) углеродистым обыкновенного качества; 2) быстрорежущим; 3) жаростойким; 4) жаропрочным; 5) коррозионностойким
13	Какому материалу соответствует представленная микроструктура	1) эвтектоидная перлитная сталь; 2) ферритный ковкий чугун; 3) медь; 4) ферритная сталь; 5) алюминий

		
14	Максимальное содержание (растворимость) углерода в аустените составляет	1) 0,1%; 2) 0,8%; 3) 1,5 %; 4) 2,14%; 5) 6,67%
15	Процесс насыщения поверхностного слоя одновременно азотом и углеродом в газовой среде называется	1) азотированием. 2) нитроцементацией. 3) цианированием. 4) цементацией; 5) цинкованием
16	Состав стали марки 10X17Г6Н4Д2 содержит	1) 10 % хром; 17% германий; ниобий; дубний; 2) 17 % хром; 6% марганец; никель; медь; 3) 10 % хром; 17% германий; никель; дубний; 4) 17 % хром; 6% марганец; никель; дубний; 5) 17 % хром; 6% германий; никель; медь
17	К каким сталям относится марка Р18	1) углеродистым обыкновенного качества; 2) быстрорежущим; 3) углеродистым качественным; 4) жаростойким; 5) коррозионностойким
18	Каким способом производят нагрев деталей при поверхностной закалке	1) в газовых печах; 2) в печах с инертным газом; 3) в электрических печах с нагревателями сопротивления; 4) индукционными токами высокой частоты; 5) электродуговым
19	Какие параметры необходимо учитывать при закалке стали	1) температуру нагрева; 2) температуру нагрева и скорость охлаждения; 3) скорость нагрева и температуру плавления стали; 4) скорость охлаждения; 5) температуру плавления стали
20	Какие полимеры являются термопластичными?	1) которые обратимо затвердевают при охлаждении без протекания химических реакций; 2) с пространственной структурой; 3) необратимо затвердевающие вследствие протекающих химических реакций; 4) с редкосетчатой структурой; 5) имеющие сверхпластичность при низких температурах

Вариант 6

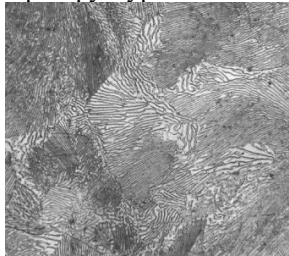
№	Задание	Варианты ответов
1	Для изготовления мелкогазмерных режущих (слесарных) инструментов (метчиков, напильников, развёрток и др.) применяются:	1) У10А – У13А; 2) 18ХГТ, 20ХГМ; 3) 110Г13Л; 4) 03Х18Н10, 17Х18Н9; 5) ШХ15
2	Неоднородность сплава по химическому составу, структуре и неметаллическим включениям, образующаяся при кристаллизации, называется:	1) ликвацией; 2) дендритами; 3) изотропией; 4) полиморфизмом; 5) диффузией
3	Какой буквой в марках цветных сплавов обозначают сурьму	1) С; 2) Г; 3) М; 4) Б;

		5) Су
4	К каким сталям относится марка 20Х13	1) углеродистым обыкновенного качества; 2) быстрорежущим; 3) с высоким сопротивлением износу при ударных нагрузках; 4) жаропрочным; 5) коррозионностойким
5	Перлит содержит углерода	1) 0,1 %; 2) 0,8%; 3) 2,14%; 4) 4,3 %; 5) 6,67%
6	Измерение твердости, основанное на том, что в плоскую поверхность металла вдавливают под нагрузкой алмазный индентор в виде пирамиды, используется:	1) в методе Бринелля; 2) в методе Шора; 3) в методе Роквелла по шкалам А и С; 4) в методе Виккерса; 5) в методе Мооса
7	Укажите характеристику, используемую для обозначения (маркировки) чугунов:	1) Предел прочности при сжатии 2) Предел прочности при растяжении 3) Предел прочности при сдвиге 4) Предел прочности при скручивании 5) Предел прочности при срезе
8	Признак качества стали определяется содержанием:	1) Железа и углерода 2) Марганца и кремния 3) Фосфора и серы 4) Силикокальция и силикоалюминия 5) Ферросилиция и ванадия
9	Какой буквой в марках стали обозначают хром	1) С; 2) Г; 3) Х; 4) Ю; 5) Д
10	Какую высококачественную сталь при маркировке обозначают буквой «Р»?	1) электротехническая; 2) шарикоподшипниковая; 3) автоматная; 4) быстрорежущая; 5) жаропрочная
11	Для повышения вязкости стали и снижения внутренних напряжений после закалки обязательной термической операцией является:	1) обжиг; 2) отпуск; 3) нормализация; 4) отжиг; 5) цементация
12	Выберите из предложенных сплав на основе титана	1) Ст6; 2) ВТ6; 3) ВК6; 4) Х6ВФ; 5) Р6М5
13	Состав стали марки 12Х15Г9НД содержит	1) 12 % хром; 15% германий; ниобий; дубний; 2) 15 % хром; 9% марганец; никель; медь; 3) 12 % хром; 15% германий; никель; дубний; 4) 15 % хром; 9% марганец; никель; дубний; 5) 15 % хром; 9% германий; никель; медь
14	Какому материалу соответствует представленная микроструктура 	1) техническое железо; 2) эвтектический белый чугун; 3) медь; 4) ферритная сталь; 5) алюминий

15	Какая сталь применяется при изготовлении трансформаторного сердечника?	1) автоматная; 2) углеродистая; 3) электротехническая; 4) инструментальная; 5) быстрорежущая
16	С какой целью модифицируется чугун в процессе выплавки?	1) чтобы увеличить устойчивость к коррозии; 2) для измельчения зерна; 3) чтобы изменить структуру основы; 4) чтобы изменить форму графитных включений; 5) чтобы удалить вредные примеси
17	К каким сталям относится марка Р9М4К8	1) углеродистым обыкновенного качества; 2) быстрорежущим; 3) жаростойким; 4) жаропрочным; 5) коррозионностойким
18	Состав твердого сплава ВК3 содержит	1) ванадий и кобальт; 2) карбид вольфрама и кобальт; 3) ванадий и кальций; 4) висмут и кобальт; 5) вольфрам и кальций
19	Стеклотекстолит это:	1) полимерный материал; 2) композиционный материал; 3) керамический материал; 4) пропиточное вещество; 5) жидкое стекло
20	Какой буквой в марках стали обозначают селен	1) С; 2) Г; 3) М; 4) Е; 5) Д

Вариант 7

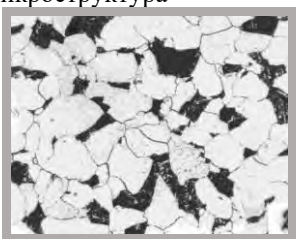
№	Задание	Варианты ответов
1	Уменьшение объема металла при переходе из жидкого состояния в твердое называется	1) ковкостью. 2) усадкой. 3) жидкотекучестью. 4) температурой плавления; 5) пластичностью
2	Самопроизвольное разрушение твердых материалов, вызванное химическими или электрохимическими процессами, развивающимися на их поверхности при взаимодействии с внешней средой, называется:	1) коррозией; 2) диффузией; 3) эрозией; 4) адгезией; 5) когезией
3	К каким сталям относится марка Р14Ф4	1) углеродистым обыкновенного качества; 2) быстрорежущим; 3) жаростойким; 4) жаропрочным; 5) коррозионностойким
4	Состав стали марки Р10К5Ф5 содержит	1) рутений; калий; фтор; 2) вольфрам; кальций; франций; 3) вольфрам; кобальт; ванадий; 4) рений; кобальт; франций; 5) рубидий; кальций; ванадий
5	Какой буквой в марках цветных сплавов обозначают фосфор	1) Мц; 2) Г; 3) М; 4) Б; 5) Ф

6	К каким сталям относится марка 25X2M1Ф	1) углеродистым обыкновенного качества; 2) быстрорежущим; 3) с высоким сопротивлением износу при ударных нагрузках; 4) жаропрочным; 5) углеродистым качественным
7	Что входит в состав твердых сплавов ТК	1) WC+TiC+Co; 2) Fe ₃ C+Mo+Ca; 3) Cr+Ti+Si; 4) SiC+Co+Fe; 5) SiC+Mo+Zr
8	Минимальное значение предела прочности чугуна КЧ30-6 в МПа равно:	1) 6; 2) 300; 3) 100; 4) 60; 5) 600
9	Какой буквой в марках стали обозначают молибден	1) С; 2) Г; 3) М; 4) Ю; 5) Д
10	Какими элементами легирована сталь марки 12Х18Н10Т	1) хром 1,8%; никель 0,1%, титан; 2) хром 18%; никель 10%, титан; 3) хром 18%; никель 10%, теллур; 4) хром 18%; никель 10%, тантал; 5) хром 1,8%; никель 1,0%, тантал
11	Состав твердого сплава ВК8 содержит	1) ванадий и кобальт; 2) карбид вольфрама и кобальт; 3) ванадий и кальций; 4) висмут и кобальт; 5) вольфрам и кальций
12	Какому материалу соответствует представленная микроструктура 	1) техническое железо; 2) серый чугун; 3) медь; 4) перлитная сталь; 5) алюминий
13	Метод Роквелла используется при измерении	1) ударной вязкости; 2) твердости; 3) предела прочности; 4) предела текучести; 5) ползучести
14	Какой буквой в марках стали обозначают бор	1) С; 2) Г; 3) Р; 4) Ю; 5) Д
15	Какой металл наиболее часто применяется в электротехнике:	1) Медь; 2) Ртуть; 3) Титан; 4) Молибден; 5) Кальций
16	Состав стали марки 20Х13 содержит	1) 13 % хром; 20% углерод; 2) 1,3% хром; 2,0% углерод; 3) 13 % хром; 0,2% углерод; 4) 20 % хром; 13% другие легирующие элементы; 5) 0,13% хром; 2,0% углерод

17	Аустенит это	1) твердый раствор углерода в α -Fe; 2) смесь перлита и цементита; 3) химическое соединение Fe_3C ; 4) твердый раствор углерода в γ -Fe; 5) пересыщенный твердый раствор углерода в α -Fe
18	В методе Бринелля в поверхность материала вдавливают	1) алмазный конус; 2) стальной закаленный шарик; 3) алмазную пирамиду; 4) медный шарик; 5) стальной конус
19	Выберите из предложенных сплав называемый дюралю	1) Ст6; 2) ВТ6; 3) ВК6; 4) Х6ВФ; 5) Д19
20	Что такое наклеп	1) увеличение прочности металлов и сплавов в процессе пластической деформации; 2) процесс термической обработки; 3) результат термической обработки; 4) уменьшение прочности металлов в процессе пластической деформации; 5) скрепление листов металла заклепками

Вариант 8

№	Задание	Варианты ответов
1	Компоненты, не способные к взаимному растворению в твердом состоянии и не вступающие в химическую реакцию с образованием соединения, образуют:	1) твердые растворы внедрения; 2) химические соединения; 3) смеси; 4) твердые растворы замещения; 5) аморфные соединения.
2	Цементит это	1) твердый раствор углерода в α -Fe; 2) твердый раствор углерода в β -Fe; 3) химическое соединение Fe_3C ; 4) твердый раствор углерода в γ -Fe; 5) пересыщенный твердый раствор углерода в α -Fe
3	Латуни и бронзы – это сплавы на основе:	1) алюминия; 2) меди; 3) цинка; 4) магния; 5) железа
4	При отжиге деталь охлаждают:	1) на воздухе; 2) в воде; 3) с печью; 4) в масле; 5) в расплавах солей
5	Какой буквой в марках цветных сплавов обозначают титан	1) Т; 2) Г; 3) М; 4) Б; 5) Мш
6	Линия на фазовых диаграммах выше которой находится только жидкость	1) солидус; 2) ликвидус; 3) сольвус; 4) конода; 5) линия эвтектического превращения
7	К каким сталям относится марка 10Х17Г6Н4Д2	1) углеродистым обыкновенного качества; 2) быстрорежущим; 3) с высоким сопротивлением износу при ударных нагрузках; 4) углеродистым качественным; 5) коррозионностойким

8	Минимальное значение предела прочности чугуна КЧ30-6 в МПа равно:	1) 6; 2) 300; 3) 100; 4) 60; 5) 600
9	Какой буквой в марках стали обозначают кремний	1) С; 2) Г; 3) М; 4) Ю; 5) Д
10	Температура нагрева заэвтектоидной углеродистой стали при закалке составляет	1) 150 °С; 2) 320 °С; 3) 580 °С; 4) 790 °С; 5) 1360 °С
11	К каким сталям относится марка 12Х18Н10Т	1) углеродистым обыкновенного качества; 2) быстрорежущим; 3) с высоким сопротивлением износу при ударных нагрузках; 4) жаропрочным; 5) углеродистым качественным
12	К каким сталям относится марка Р6М3	1) углеродистым обыкновенного качества; 2) быстрорежущим; 3) жаростойким; 4) жаропрочным; 5) коррозионностойким
13	Какими элементами легирована сталь марки 15Х5М	1) хром; марганец; 2) хром; магний; 3) хлор; молибден; 4) хром; молибден; 5) хром; медь
14	Выберите из предложенных сталь для штампов холодного деформирования	1) 20; 2) Р6М5 3) ХВСГ 4) Ст3; 5) Ст1кп
15	Какому материалу соответствует представленная микроструктура 	1) техническое железо; 2) высокопрочный чугун; 3) медь; 4) сталь; 5) алюминий
16	Какой буквой в марках цветных сплавов обозначают алюминий	1) А; 2) Г; 3) М; 4) Ю; 5) Д
17	Состав стали марки 02Х21Т содержит	1) 21 % хром; 2% углерод; титан; 2) 2,1% хром; 0,2% углерод; тантал 3) 21 % хром; менее 0,02% углерод; титан; 4) 2 % хром; 21% титан; 5) 21% хром; 2% углерод; теллур
18	Состав стали марки Р6М5 содержит	1) 6 % рутений; 5% молибден; 2) 6 % вольфрам; 5% медь; 3) 6 % вольфрам; 5% молибден; 4) 6 % рений; 5% магний; 5) 6 % рубидий; 5% медь
19	Выберите из предложенных сплав на	1) Ст6;

	основе алюминия	2) ВТ6; 3) ВК6; 4) Х6ВФ; 5) АК6
20	Как называют сталь 110Г13Л (сталь Гадфильда)	1) низкоуглеродистая; 2) высокомарганцовистая; 3) высококремнистая; 4) высокохромистая; 5) медистая

**ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
«МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»**

для студентов специальности

**6-05-0714-06 «Оборудование и технологии вакуумной, компрессорной и
низкотемпературной техники»**

профилизации «Вакуумная и компрессорная техника»

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

Учебная программа учреждения высшего образования

**по учебной дисциплине для специальности 6-05-0714-06 «Оборудование и технологии
вакуумной, компрессорной и низкотемпературной техники»**

профилизации «Вакуумная и компрессорная техника»

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Учебная программа по учебной дисциплине «Материаловедение» разработана для специальности 6-05-0714-06 «Оборудование и технологии вакуумной, компрессорной и низкотемпературной техники», профилизации «Вакуумная и компрессорная техника».

Данный курс направлен на подготовку студентов вышеназванных специальностей к усвоению дисциплин специального цикла, таких как «Теория резания и инструмент», «Технология машиностроения», «Проектирование и изготовление заготовок» и других. Программа разработана для студентов дневной и заочной формы обучения.

Перечень дисциплин, усвоение которых студентами желательно для изучения дисциплины «Материаловедение»: химия, физика и др.; в большинстве случаев для понимания материала достаточно хороших школьных знаний этих предметов.

Целью изучения учебной дисциплины «Материаловедение» является сформировать у студентов целостное представление о строении и свойствах основных машиностроительных материалов (черных, цветных металлов и сплавов, пластмасс), взаимосвязи их химического состава и структуры с механическими и эксплуатационными свойствами, развить умение и навыки, опыт исследовательской деятельности, а также профессионально важных качеств личности в процессе изучения материаловедения.

Основными задачами преподавания учебной дисциплины являются:

- ознакомиться с современными теориями строения, кристаллизации, прочности и разрушения металлов и сплавов;
- изучить диаграммы равновесного состояния различных типов, в том числе диаграмму «железо-углерод»;
- изучить маркировку, микроструктуру и свойства углеродистых, легированных сталей и чугунов машиностроительного назначения;
- ознакомиться с основными видами механических испытаний машиностроительных материалов;
- изучить теорию и практику термической и химико-термической обработки сталей и сплавов;
- изучить маркировку, микроструктуру и свойства легированных сталей и сплавов инструментального и специального назначения;
- изучить маркировку, микроструктуру и свойства цветных сплавов на основе алюминия, меди, титана, никеля и других металлов;
- ознакомиться с различными видами пластмасс, полимеров и керамик.

В результате изучения учебной дисциплины «Материаловедение» студент должен:

знать:

- теоретические основы строения и кристаллизации металлов и сплавов
- теоретические основы прочности и разрушения материалов, процессы наклепа и рекристаллизации;
- основные эксплуатационные свойства металлов и сплавов
- принципы построения диаграмм состояния;
- основные процессы превращения в структуре при термической и химико-термической обработке металлов и сплавов;
- основные виды термической обработки;
- классификацию металлов и сплавов;
- классификацию пластмасс, полимеров и керамик.

уметь:

- разбираться в маркировке, структуре, назначении машиностроительных материалов;
- распознавать в структуре сплава фазы и другие составляющие;
- проводить основные виды механических испытаний и анализировать их результаты;
- грамотно выбирать материал исходя из конкретных условий работы детали, инструмента и изделия;
- назначать режимы термической обработки и других видов упрочнения.

иметь навык:

- оптимального выбора современных машиностроительных материалов в промышленности с учетом специфики Республики Беларусь.

Освоение данной учебной дисциплины обеспечивает формирование следующих компетенций:

БПК-8. Использовать знания о свойствах конструкционных материалов, критериях их выбора, способах их производства, получения из них заготовок и деталей машин для решения прикладных инженерных задач.

Согласно учебным планам на изучение учебной дисциплины отведено:

- для очной (дневной) формы получения высшего образования всего 100 часов, из них аудиторных - 52 часа;

- для заочной формы получения высшего образования, интегрированного со средним специальным образованием всего 100 часов, из них аудиторных - 12 часов.

Распределение аудиторных часов по курсам, семестрам и видам занятий приведено в таблицах 1, 2.

Таблица 1.

Очная форма получения высшего образования					
Курс	Семестр	Лекции, ч.	Лабораторные занятия, ч.	Практические занятия, ч.	Форма промежуточной аттестации
1	1	34	18	-	экзамен

Таблица 2.

Заочная форма получения высшего образования, интегрированного со средним специальным образованием					
Курс	Семестр	Лекции, ч.	Лабораторные занятия, ч.	Практические занятия, ч.	Форма промежуточной аттестации
1	2	4	4	4	экзамен

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Раздел I. ОСНОВНЫЕ ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

Тема 1.1. Предмет материаловедения. Типы связей в кристаллических решетках.

Кристаллы и их несовершенства

Введение. Предмет «Материаловедение». Взаимосвязь состава, структуры и свойств. Способы воздействия на структуру – термическая, химико-термическая и деформационная обработка. Классификация материалов. Кристаллические решетки твердых веществ. Типы связей в кристаллических решетках.

Кристаллическое строение металлов. Типы кристаллической решетки. Реальное строение кристаллов. Зерна. Дислокации. Кривая Бочвара-Одинга.

Изотропия, квазиизотропия и анизотропия свойств. Текстура. Полиморфизм и аллотропия. Примеры превращений в твердом состоянии.

Тема 1.2. Методы изучения строения материалов

Металлографические исследования. Исследование макроструктуры. Дефекты макроструктуры объектов (усадочные раковины, газовые пузыри, неметаллические включения, трещины и др.). Исследование изломов. Исследование микроструктуры. Приготовление микрошлифов. Методы микроскопического исследования металлов. Устройство микроскопа. Типы и конструкции микроскопов. Предел разрешающей способности микроскопа.

Просвечивающая электронная микроскопия. Косвенный и прямой методы исследования. Конструкция и принцип работы электронного микроскопа.

Растровая (сканирующая) электронная микроскопия. Принцип действия. Разрешение. Классификация микроскопов. Неразрушающие методы контроля структуры (ультразвуковой, магнитопорошковый и др.)

Основные понятия о стереологии, рентгеноструктурном, микрорентгеноспектральном и химическом фазовом анализе.

Тема 1.3. Механические свойства материалов и методы их изучения

Классификация механических испытаний: статические, динамические, усталостные и длительные высокотемпературные. Методы определения механических свойств.

Измерение твердости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу. Микротвердость. Их применимость для различных материалов.

Напряжения и деформации. Физическая природа и механизмы деформации. Разрушение металлов. Вязкое и хрупкое разрушение.

Графическая зависимость деформации от напряжения. Модуль упругости. Предел пропорциональности. Предел упругости. Пластическое деформирование. Понятие пластичности. Предел текучести. Относительное удлинение, относительное сужение.

Испытания на растяжение. Параметры, получаемые в результате испытаний. Виды разрушения образцов. Типовые диаграммы.

Испытания на сжатие. Особенности. Типы образцов. Типовые диаграммы. Типовые виды разрушений.

Испытания на кручение. Испытания на срез и изгиб.

Ударная вязкость. Схема копра. Типы образцов.

Испытания на усталость. Схема нагружения. Диаграмма изменения напряжений. Кривая усталости.

Испытания на ползучесть.

Тема 1.4. Кристаллизация. Поликристаллы, монокристаллы, аморфные материалы и наноматериалы

Три состояния вещества и области их существования. Ближний и дальний порядок. Температура плавления. Равновесная и фактическая температуры кристаллизации. Типовые кривые охлаждения. Степень переохлаждения. Скрытая теплота кристаллизации.

Механизм процесса кристаллизации: зарождение центров и рост зерен. Кинетическая кривая кристаллизации. Зависимости скорости кристаллизации (с.к.) и числа центров (ч.ц.) от степени переохлаждения (кривые Таммана). Зависимость размера кристаллов от соотношения с.к. и ч.ц. Критический размер зародыша. Влияние скорости отвода тепла при кристаллизации. Дендриты. Строение слитка. Структурные зоны в слитке. Транскристаллизация и другие дефекты слитка: усадочная раковина, пористость.

Виды монокристаллов. Методы получения. Структура, свойства и применение монокристаллов.

Виды аморфных материалов и условия их получения. Состав, структура, свойства и применение аморфных материалов.

Виды наноматериалов. Методы получения. Состав, структура и свойства наноматериалов. Перспективы применения наноматериалов.

Тема 1.5. Диаграммы состояния: построение, фазы, виды диаграмм 1, 2, 3, 4 рода

Понятие сплава. Виды взаимодействий веществ, входящих в сплав. Твердый раствор (внедрения, замещения) на базе одного растворяемого компонента. Ограниченные и неограниченные твердые растворы. Механическая смесь. Химическое соединение. Твердые растворы на базе химического соединения (растворы вычитания). Упорядоченные твердые растворы (сверхструктуры).

Диаграмма состояния (равновесия). Внешние и внутренние факторы: температура, давление, концентрация. Определения: компонент, фаза, число степеней свободы. Правило фаз (закон Гиббса). Закон Гиббса при постоянном давлении.

Термический анализ металлов и сплавов.

Построение диаграмм 1 рода (сплавы образующие механические смеси). Анализ и построение диаграмм состояния на примере кривых охлаждения сплавов системы свинец-сурьма. Связь кривых охлаждения с правилом фаз Гиббса. Перенесение точек на диаграмму. Понятие точек начала и конца кристаллизации - ликвидус и солидус. Линии ликвидус и солидус. Понятие эвтектики. Правило отрезков №1 (концентрации компонентов). Правило отрезков №2 (количественное соотношение фаз).

Анализ диаграмм 2 рода (сплавы с неограниченной растворимостью).

Анализ диаграмм 3-го рода (сплавы с ограниченной растворимостью).

Анализ диаграмм 4-го рода (сплавы, компоненты которых образуют химические соединения). Связь между типом диаграмм состояния и свойствами сплавов. Закон (правила) Курнова.

Тема 1.6. Диаграмма состояния железо-углерод

Диаграмма: железо-цементит (углерод). Влияние содержания углерода на температуры плавления и кристаллизации сплава и промышленное получение железистых сплавов. Понятие феррита, аустенита, цементита, перлита и ледебурита. Характерные точки и линии диаграммы. Три основные реакции: перитектическая, эвтектическая, эвтектоидная.

Раздел II. СТРУКТУРА, СВОЙСТВА И НАЗНАЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Тема 2.1. Углеродистые стали

Определение стали. Технологические особенности выплавки. Влияние неизбежных постоянных примесей. Неметаллические включения. Влияние углерода на механические свойства стали. Влияние углерода и примесей на свариваемость стали. Классификация и маркировка углеродистой стали. Примеры изделий. Структуры углеродистой стали. Нагартованная сталь. Листовая сталь для холодной штамповки. Автоматные стали. Обрабатываемость резанием.

Тема 2.2. Чугуны

Получение чугуна. Классификация. Основные сведения о процессе графитизации. Влияние примесей.

Классификация чугуна по структуре металлической основы и форме графитных включений. Структура и свойства чугуна. Маркировка серых и высокопрочных чугунов. Чугун с вермикулярным графитом.

Ковкий чугун. Состав и структура. Маркировка и механические свойства.

Чугуны со специальными свойствами. Примеры изделий и деталей из различных чугунов.

Тема 2.3. Классификация легированных сталей. Конструкционные стали

Влияние легирующих элементов на структуру и свойства сталей. Классификации легированных сталей и их маркировка.

Конструкционные стали. Назначение. Принцип выбора. Цементуемые и улучшаемые стали.

Высокопрочные стали. Состав, свойства.

Строительные стали. Понятие свариваемости. Понятие порога хладноломкости. Арматурные стали. Пружинная сталь. Шарикоподшипниковая сталь.

Тема 2.4. Инструментальные стали и сплавы

Инструментальные стали пониженной и повышенной прокаливаемости. Быстрорежущие стали. Понятие красностойкости.

Штамповые стали для горячей и холодной штамповки. Маркировка. Химический состав. Основные свойства.

Твердые сплавы. Маркировка, Химический состав и свойства.

Тема 2.5. Жаростойкие, жаропрочные, нержавеющие, износостойкие стали и сплавы

Понятия «жаростойкость (окалиностойкость)» Особенности состава жаростойких сталей. Понятия «жаропрочность», «длительная прочность», «ползучесть». Особенности состава и структуры жаропрочных сталей. Группы жаропрочных сталей: котельные, аустенитные, силхромы. Никелевые и кобальтовые сплавы. Нимоники. Составы, области применения.

Понятие коррозии. Пути борьбы с коррозией. Коррозионностойкие стали. Три класса нержавеющих сталей: хромистые (ферритные, мартенситные, мартенсито-ферритные), хромоникелевые, хромомарганцевоникелевые.

Понятие износостойкости. Особенности состава и структуры износостойких сталей. Сталь Гадфильда.

Тема 2.6. Цветные металлы и сплавы.

Особенности цветных металлов. Их классификация.

Алюминий. Способы получения. Классификация алюминиевых сплавов. Свойства и назначение алюминиевых сплавов. Силумины. Дуралюмины. Понятие «старение».

Медь. Сплавы меди: латуни и бронзы. Их свойства и применение.

Титан и его сплавы. Свойства и применение.

Сплавы никеля. Общие сведения и назначение никелевых сплавов.

Сплавы магния: литейные, деформируемые. Их свойства и применение.

Тема 2.7. Неметаллические материалы: полимеры, пластмассы, стекла, керамики

Понятие «полимеры», их особенности. Классификация полимеров.

Понятие «пластмассы», их достоинства и недостатки. Термопласты и реактопласты. Полиэтилен. Поливинилхлорид. Полистирол. Их свойства, достоинства и недостатки.

Стеклопластики.

Стекла. Особенности и области применения.

Керамические материалы, свойства, применение.

Раздел III. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УПРОЧНЕНИИ И РАЗУПРОЧНЕНИИ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Тема 3.1. Теория и технология термической обработки сталей

Основные понятия: конструкционная прочность, долговечность, жесткость, надежность и др. Реализация различных механизмов упрочнения. Виды механической обработки материалов и способы улучшения обрабатываемости давлением и обрабатываемости резанием. Понятие наклепа. Виды разупрочняющей обработки. Термическая обработка, как составная часть технологии металлов. Основные параметры термообработки: температура и время.

Образование аустенита. Процесс роста аустенитного зерна. Понятия: действительное зерно, наследственное зерно. Шкалы размеров зерна.

Распад аустенита. Скорость распада. Скорость роста и число центров кристаллизации перлита. Кинетическая кривая превращения аустенита в перлит (сорбит, троостит). Бейнитное (промежуточное) превращение: механизм, особенности.

Мартенситное превращение. Кристаллическая решетка мартенсита и ее характерные особенности.

Основные виды термической обработки стали. Классификация. Обозначения критических точек. Отжиг первого рода, отжиг второго рода. Нормализация. Закалка. Принцип выбора времени нагрева и охлаждения. Закалочные среды. Дефекты закалки. Понятие прокаливаемости. Критический диаметр. Поверхностная закалка. Виды нагрева. Отпуск. Превращения при отпуске. Влияние термообработки на свойства стали.

Тема 3.2. Химико-термическая и термомеханическая обработка сталей и сплавов

Химико-термическая обработка. Сущность, назначение, классификация.

Цементация. Виды. Газовые среды.

Азотирование. Назначение и область использования. Нитроцементация. Диффузионная металлизация.

Термомеханическая обработка (высокотемпературная ВТМО и низкотемпературная НТМО). Влияние ТМО на механические свойства.

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБ-
НОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**
очная (дневная) форма получения высшего образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество ауди- торных часов			Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия		
	1 семестр					
1.	Основные объекты и методы изучения в материаловедении					
1.1	Предмет материаловедения. Типы связей в кристаллических решетках. Кристаллы и их несовер- шенства	2				
1.2	Методы изучения строения материалов	2				
	Лабораторная работа №1 Макроструктурный и микроструктурный анализы металлов и сплавов			2		Защита отчета по лаб. работе
1.3	Механические свойства материалов и методы их изучения	2				
	Лабораторная работа №2 Определение твердости металлов и сплавов			2		Защита отчета по лаб. работе
1.4	Кристаллизация. Поликристаллы, монокристаллы, аморфные материалы и наноматериалы	2				
1.5	Диаграммы состояния: построение, фазы, виды диаграмм 1, 2, 3, 4 рода	4				
	Лабораторная работа №3 Термический метод построения диаграмм состояния двойной системы			2		Защита отчета по лаб. работе
1.6	Диаграмма состояния железо-углерод	2				
	Лабораторная работа №4 Диаграмма состояния железо-углерод			2		Защита отчета по лаб. работе
2.	Структура, свойства и назначение материалов					
2.1	Углеродистые стали	2				
	Лабораторная работа №5 Микроструктура, свойства и маркировка углеродистых сталей			2		Защита отчета по лаб. работе
2.2	Чугуны	2				
	Лабораторная работа №6 Микроструктура, свойства и маркировка чугунов			2		Защита отчет а по лаб. работе

2.3	Классификация сталей. Конструкционные стали	2				
2.4	Инструментальные стали и сплавы	2				
	Лабораторная работа №7 Микроструктура, свойства и маркировка инструментальных сплавов			2		Защита отчета по лаб. работе
2.5	Жаростойкие, жаропрочные, нержавеющие, износостойкие стали и сплавы	2				
2.6	Цветные металлы и сплавы	2				
2.7	Неметаллические материалы: полимеры, пластмассы, стекла, керамики	2				
3.	Общие сведения об упрочнении и разупрочнении сталей и сплавов					
3.1	Теория и технология термической обработки сталей	4				
3.2	Химико-термическая и термомеханическая обработка сталей и сплавов	2				
	Лабораторная работа №8 Микроструктура и свойства поверхностных слоев, сформированных химико-термической обработкой			4		Защита отчета по лаб. работе
	Итого за семестр	34		18		экзамен
	Всего аудиторных часов	52				

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБ-
ной дисциплины**
**заочная форма получения высшего образования, интегрированного со средним специальным
образованием¹**

Номер раздела, тема	Название раздела, темы	Количество ауди- торных часов			Количество ча- сов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практиче- ские	Лабора- торные		
	1 семестр					
1.	Основные объекты и методы изучения в материаловедении					
	Лабораторная работа №1 Макроструктурный и микроструктурный анализы металлов и сплавов			2		Защита отче- та по лаб. работе
	Лабораторная работа №2 Термический метод построения диаграмм состояния двойной системы			2		Защита отче- та по лаб. работе
1.6	Диаграмма состояния железо-углерод	2				
	Практическая работа №1 Определение твердости металлов и сплавов		2			
2.	Структура, свойства и назначение материалов					
	Практическая работа №2 Микроструктура, свойства и маркировка инструментальных сплавов		2			
3.	Общие сведения об упрочнении и разупрочнении сталей и сплавов					
3.2	Химико-термическая и термомеханическая обработка сталей и сплавов	2				
	Итого за семестр	4	4	4		экзамен
	Всего аудиторных часов	12				

¹ Темы учебного материала, не указанные в Учебно-методической карте, отводятся на самостоятельное изучение студента

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Список литературы

Основная литература

- 1 Арзамасов, В.Б. Материаловедение / В.Б. Арзамасов, А.А. Черепяхин. – М.: Изд-во Экзамен, 2009. – 350 с.
- 2 Богодухов, С.И. Материаловедение: [учебник] / С.И. Богодухов, Е.С. Козик. – Москва: Машиностроение, 2015. – 503 с.: ил.
- 3 Чередниченко, В.С. Материаловедение. Технология конструкционных материалов / В.С. Чередниченко. – М.: Изд-во Омега, 2008. – 752 с.
- 4 Зоткин, В.Е. Методология выбора материалов и упрочняющих технологий в машиностроении: [учебное пособие] / В.Е. Зоткин. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Форум. Инфра-М, 2015. – 320 с.
- 5 Комаров, О.С. Материаловедение и технология конструкционных материалов: [учебник для технических специальностей вузов] / О.С. Комаров [и др.]; под общ. ред. О.С. Комарова. – 3-е изд., испр. и доп. – Минск: Новое знание, 2009. – 670 с.
- 6 Шматов, А.А. Материаловедение. Лабораторный практикум / А.А. Шматов, И.А. Иванов. – Минск: БНТУ, 2013. – 90 с.

Дополнительная литература

7. Материаловедение / Б.Н. Арзамасов [и др.]. – М.: Машиностроение, 2005. – 648 с.
8. Марочник сталей и сплавов / В.Г.Сорокин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
9. Худокормова, Р.Н. Материаловедение. Лабораторный практикум / Р.Н. Худокормова, Ф.И. Пантелеенко. – Минск: Вышэйшая школа, 1988. – 224 с.
10. Фетисов, Г.П. Материаловедение и технология металлов / Фетисов Г.П., Ф.А. Гарифуллин. – М.: Изд-во Оникс, 2007. – 624 с.
11. Лахтин, Ю.М. Материаловедение / Ю.М. Лахтин., В.П. Леонтьева. –М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.

Средства диагностики результатов учебной деятельности

Оценка уровня знаний студента производится по десятибалльной шкале в соответствии с критериями, утвержденными Министерством образования Республики Беларусь.

Для оценки достижений студента рекомендуется использовать следующий диагностический инструментарий:

- выполнение текущих контрольных заданий по отдельным темам;
- защита выполненных на лабораторных занятиях заданий;
- защита выполненных в рамках самостоятельной работы индивидуальных заданий;
- выступление студента на конференции по подготовленному реферату;
- сдача экзамена.

Тематика рефератов

1. Способы воздействия на структуру – термическая, химико-термическая и деформационная обработка.
2. Металлографические исследования.
3. Классификация механических испытаний: статические, динамические, усталостные и длительные высокотемпературные.
4. Виды аморфных материалов и условия их получения. Состав, структура, свойства и применение аморфных материалов.

5. Понятие сплава. Виды взаимодействий веществ, входящих в сплав.
6. Влияние содержания углерода на температуры плавления и кристаллизации сплава и промышленное получение железоуглеродистых сплавов.
7. Влияние углерода и примесей на свариваемость стали.
8. Классификация чугуна по структуре металлической основы и форме графитных включений.
9. Влияние легирующих элементов на структуру и свойства сталей. Классификации легированных сталей и их маркировка.
10. Инструментальные стали пониженной и повышенной прокаливаемости.
11. Никелевые и кобальтовые сплавы.
12. Особенности цветных металлов. Их классификация.
13. Понятие «полимеры», их особенности. Классификация полимеров.
14. Основные понятия: конструкционная прочность, долговечность, жесткость, надежность.
15. Химико-термическая обработка. Сущность, назначение, классификация.

Перечень контрольных вопросов и заданий для самостоятельной работы студентов

Перечень вопросов и заданий для студентов по каждой выше указанной лабораторной работе подробно изложен в лабораторном практикуме по курсу Материаловедение [6] (см. список литературы).

Методические рекомендации по организации и выполнению самостоятельной работы студентов

При изучении дисциплины рекомендуется использовать следующие формы самостоятельной работы:

- решение индивидуальных задач;
- подготовка и сдача отчетов по каждой из запланированных лабораторных работ по темам;
- подготовка сообщений по заданным темам;
- проработка вопросов, вынесенных на самостоятельное изучение.