

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

А.А. Андрушевич, Т.К. Романова

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
высших учебных заведений Республики Беларусь
по образованию в области сельского хозяйства в качестве
учебно-методического комплекса для студентов высших
учебных заведений группы специальностей
74 06 Агроинженерия*

**Минск
2008**

УДК 669.01(7)

ББК 34.2.я7

А66

Рекомендовано научно-методическим советом факультета
«Технический сервис в АПК» БГАТУ
Протокол № 5 от 17 июня 2008 г.

Рецензенты:

кафедра «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов»
Белорусского национального технического университета (зав. ка-
федрой – д-р техн. наук., проф., чл.-кор. НАН Беларуси
Ф.И. Пантелеенко);

д-р техн. наук, проф. каф. материаловедения в машиностроении
Белорусского национального технического университета
М.В. Ситкевич

Андрушевич, А.А.

А66 Материаловедение : учеб.-метод. комплекс / А. А. Андру-
шевич, Т. К. Романова. – Минск : БГАТУ, 2008. – 192 с.

ISBN 978-985-519-051-7

Учебно-методический комплекс «Материаловедение» вклю-
чает учебно-методические материалы по изучению строения и
свойств материалов, взаимосвязи между их составом, структурой и
свойствами.

Предназначается для студентов и учащихся агроинженерных
специальностей, а также может быть использован магистрантами,
аспирантами и специалистами предприятий, работающими в обла-
сти технологии сельскохозяйственного машиностроения и ремонта
сельскохозяйственной техники.

УДК 669.01(7)

ББК 64.2.я7

ISBN 978-985-519-051-7

© БГАТУ, 2008

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Материаловедение. Технология конструкционных материалов» относится к циклу профессиональных дисциплин и входит в учебные планы, подготовленные в соответствии с общегосударственными стандартами Республики Беларусь для группы специальностей 74 06 Агроинженерия.

Предметом дисциплины является изучение строения и свойств конструкционных материалов, освоение физико-химических основ процессов изготовления заготовок и деталей методами литья, обработки давлением, резания, сварки, способов их упрочнения термической, термомеханической обработкой, наплавкой и напылением.

Дисциплина относится к числу основополагающих учебных дисциплин для специальностей инженерного профиля. Проектирование рациональных, конкурентоспособных изделий, организация их производства, эксплуатации и ремонта невозможны без должного технологического обеспечения и достаточного уровня знаний в области материаловедения и производственных технологий. Последние являются важнейшим показателем образованности инженера в области техники.

Изучение дисциплины дает студентам требующуюся общепрофессиональную, технологическую подготовку, закладывает основы знаний, необходимых при работе на производстве. При конструировании и изготовлении сельскохозяйственной техники, организации ее эксплуатации и ремонта инженер в повседневной работе сталкивается с машиностроительными материалами, их использованием, эксплуатацией и ремонтом. Для успешного решения многих практических задач нужны знания современных материалов, их свойств, способов получения и обработки, технологических приемов управления этими свойствами и рациональных областей применения.

Цель дисциплины – подготовка будущего инженера в области строения и свойств конструкционных материалов, физико-химических основ процессов изготовления заготовок и деталей методами литья, обработки давлением, резания, сварки, способов их упрочнения термической, термомеханической обработкой, наплавкой и напылением.

Дисциплина состоит из трех разделов: «Материаловедение», «Горячая обработка металлов» и «Обработка материалов резанием».

В УМК представлены материалы по изучению раздела «Материаловедение», который включает курс лекций, задания и образцы выполнения для самостоятельной работы и контроля учебной деятельности студентов очной и заочной форм обучения.

Изучение данного раздела необходимо для решения вопросов, связанных с экономией материалов, уменьшением массы машин и механизмов, повышением надежности и долговечности работы автотракторной и сельскохозяйственной техники. Учитывая, что основными материалами при этом являются металлы и их сплавы, в рамках данного УМК им уделено основное внимание.

Учебной программой дисциплины «Материаловедение. Технология конструкционных материалов» предусмотрено общее количество аудиторных часов – 136, в т.ч. 34 часа – на изучение раздела «Материаловедение».

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА "МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ"

1.1 ГЛОССАРИЙ

АЗОТИРОВАНИЕ — насыщение конструкционных легированных сталей азотом.

АЛЛОТРОПИЯ (ПОЛИМОРФИЗМ) — способность металла изменять тип кристаллической решетки при различных температурах.

АНИЗОТРОПИЯ — различие свойств кристалла по различным кристаллографическим плоскостям.

АУСТЕНИТ — твердый раствор внедрения углерода (С) в $\gamma\text{-Fe-Fe}_\gamma(\text{C})$.

БАББИТЫ — подшипниковые сплавы скольжения на основе олова или свинца с твердыми включениями химических соединений.

БОРИРОВАНИЕ — насыщение сталей бором.

БРОНЗА — сплав на основе меди с любым компонентом, кроме цинка. Цинк может присутствовать в бронзах, когда имеются другие компоненты.

ВАКАНСИЯ — точечный дефект, связанный с отсутствием атома в узле кристаллической решетки.

ДИСЛОКАЦИЯ — линейный дефект кристаллической решетки (искажение кристаллографической плоскости).

ДЮРАЛЮМИН — деформируемый сплав на основе алюминия. Обычно сплав алюминия с медью и марганцем.

ЗАКАЛКА — операция термической обработки, назначаемая для получения неравновесной структуры мартенсит (структура очень твердая).

ЗАКАЛКА ТВЧ — поверхностная закалка с нагревом токами высокой частоты (индукционный нагрев).

КОМПОНЕНТ — элемент, входящий в состав сплава.

КРИВАЯ ОХЛАЖДЕНИЯ — зависимость изменения температуры при охлаждении сплава данного состава от времени.

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ — процесс перехода металла из жидкого в твердое состояние.

КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ РЕШЕТКА — минимальное пространственное изображение расположения атомов металлов в трех измерениях.

КРИТИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ ЗАКАЛКИ — наименьшая скорость охлаждения, при которой образуется мартенсит.

КРИТИЧЕСКАЯ ТОЧКА — температура сплава, при котором изменяется его фазовое состояние.

ЛАТУНЬ — сплав меди с цинком.

ЛЕДЕБУРИТ — равномерная механическая смесь аустенита и цементита.

МАРТЕНСИТ — перенасыщенный твердый раствор углерода в α -Fe.

МЕТАЛЛИЗАЦИЯ — насыщение сталей металлами.

НИТРОЦЕМЕНТАЦИЯ — одновременное насыщение сталей углеродом и азотом в газовых средах. В основном идет насыщение углеродом.

НОРМАЛИЗАЦИЯ — операция термической обработки, при которой стали, нагретые до определенных температур, охлаждаются на воздухе (структура равновесная, более мелкозернистая по сравнению со структурой, получаемой после отжига).

ОТЖИГ — операция термической обработки с медленным охлаждением, назначаемая для получения равновесной структуры (структура мягкая, пластичная).

ОТПУСК — операция термической обработки, назначаемая после закалки стали для формирования необходимой структуры (свойств) и снятия внутренних напряжений.

ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ — изменение фазового состояния твердого сплава.

ПЕРЛИТ — равномерная механическая смесь феррита и цемента.

СИЛУМИН — литейный сплав на основе алюминия. Обычно сплав алюминия с кремнием.

СОРБИТ — среднедисперсная ферритно-цементитная структура HRC 30...35, обладающая высокой вязкостью, достаточной прочностью и твердостью.

СТАЛЬ — сплав железа с углеродом, содержащий от 0,025 до 2,14% углерода, а также ряд других элементов.

Высококачественная сталь — сталь с низким содержанием вредных примесей (обычно фосфора не более 0,025% и серы не более 0,025%), обладающая повышенными механическими свойствами.

Высоколегированная сталь — легированная сталь, в которой сумма легирующих элементов составляет более 10%.

Высокоуглеродистая сталь — сталь, содержащая более 0,6% углерода.

Инструментальная сталь — сталь, применяемая для обработки материалов резанием или давлением, а также для изготовления измерительного инструмента; обладает высокой твердостью, прочностью, износостойкостью.

Качественная сталь — сталь с регламентированным содержанием вредных примесей (обычно фосфора и серы не более 0,035 % каждого).

Кипящая сталь — низкоуглеродистая недостаточно раскисленная сталь, продолжающая “кипеть” после заливки в изложницу.

Конструкционная сталь — сталь, предназначенная для изготовления различных деталей машин, механизмов и конструкций в машиностроении, строительстве и обладающая необходимым комплексом механических, физических и химических свойств.

Легированная сталь — сталь со специально введенным одним или более легирующим элементом.

Низколегированная сталь — легированная сталь, в которой сумма легирующих элементов не превышает 2,5%.

Низкоуглеродистая сталь — углеродистая сталь с содержанием углерода до 0,25%.

Основная сталь — сталь, выплавленная на основном поду под основным шлаком.

Особо высококачественная сталь — сталь с содержанием вредных примесей не более: фосфора 0,025%, и серы 0,015%.

Полуспокойная сталь — сталь, полученная при раскислении жидкого металла менее полным, чем при выплавке спокойной стали, но большем, чем при выплавке кипящей стали; в изложнице такая сталь не “кипит”, происходит рост головной части слитка.

Спокойная сталь — сталь, раскисленная до такой степени, что при затвердевании слитка не происходит взаимодействия растворенных в ней углерода и кислорода.

Среднелегированная сталь — легированная сталь, в которой сумма легирующих элементов составляет от 2,5 до 10,0%.

Среднеуглеродистая сталь — углеродистая сталь, содержащая от 0,25 до 0,6% углерода.

Углеродистая сталь — сталь, не содержащая специально введенных легирующих элементов.

СПЛАВ — соединение двух и более компонентов, полученное сплавлением (спеканием).

СТАРЕНИЕ — термическая обработка, связанная с нагревом закаленных деталей до температуры 160°C и длительной выдержкой. При комнатной температуре до нескольких суток.

ТРООСТИТ — тонкодисперсная ферритно-цементитная структура HRC 40...45, обладающая высокой упругостью, достаточной прочностью и твердостью.

ФАЗА — однородная часть сплава (системы), имеющая одинаковый состав, свойства, кристаллическую решетку, имеющую поверхность раздела.

ФЕРРИТ — твердый раствор внедрения углерода (C) в α -Fe-Fe_α(C).

ЦЕМЕНТАЦИЯ — насыщение низкоуглеродистых сталей углеродом.

ЦЕМЕНТИТ — химическое соединение железа с углеродом Fe₃C (карбид железа).

ЦИАНИРОВАНИЕ — одновременное насыщение сталей углеродом и азотом в жидких средах. В основном идет насыщение азотом.

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

ЭВТЕКТИКА — это равномерная механическая смесь, получаемая при кристаллизации жидкого сплава определенного состава при минимальной температуре плавления для данной системы.

ЭВТЕКТОИД — это равномерная механическая смесь, кристаллизующаяся из твердого раствора определенного состава при постоянной температуре для данной системы.

1.2 ТЕМЫ ЛЕКЦИЙ И ИХ СОДЕРЖАНИЕ

Тема 1. Введение. Атомно-кристаллическое строение металлов и процесс кристаллизации

Введение в дисциплину "Материаловедение. Технология конструкционных материалов".

Атомно-кристаллическое строение металлов. Строение реальных металлов, понятие о дислокациях. Процесс кристаллизации.

Литература: [1], стр. 11–59; [2], стр. 3–51.

Тема 2. Теория сплавов

Понятие о сплавах. Твердые растворы. Химические соединения. Механические смеси. Основные типы диаграмм состояния двухкомпонентных сплавов.

Закон Н. С. Курнакова для двухкомпонентных сплавов.

Литература: [1], стр. 97–158; [2], стр. 52–77.

Тема 3. Железоуглеродистые сплавы

Железо и его свойства. Кривая охлаждения чистого железа. Компоненты и фазы в системе железо – углерод. Анализ диаграммы состояния сплавов железо – цементит.

Структурные и фазовые превращения в железоуглеродистых сплавах. Диаграмма состояния железо–графит.

Литература: [1], стр. 159–179; [2], стр. 78–87.

Тема 4. Углеродистые стали и чугуны. Легированные стали

Углеродистые стали. Влияние углерода и примесей на свойства сталей. Классификация и маркировка сталей.

Чугуны. Классификация чугунов. Влияние примесей на структуру и свойства чугунов.

Легированные стали. Влияние легирующих элементов. Классификация и маркировка легированных сталей.

Литература: [1], стр. 180–222, 341–410, 448–508; [2], стр. 88–100.

Тема 5. Теория термической обработки

Основные понятия термической обработки. Превращения в стали при нагреве. Диаграмма изотермического превращения аустенита. Превращения в стали при охлаждении.

Мартенситное превращение в стали. Превращения в закаленной стали при отпуске.

Литература: [1], стр. 223–255; [2], стр. 102–126.

Тема 6. Технология термической обработки сталей

Классификация видов термической обработки стали. Отжиг, виды, применение. Закалка, виды, применение, дефекты. Отпуск, виды, применение.

Термомеханическая обработка стали.

Литература: [1], стр. 256–278; [2], стр. 123–133.

Тема 7. Поверхностное упрочнение сталей

Поверхностная закалка сталей. Виды поверхностной закалки.

Основы теории химико-термической обработки. Виды химико-термической обработки. Цементация, азотирование, нитроцементация, цианирование, борирование.

Диффузионная металлизация.

Литература: [1], стр. 279–302; [2], стр. 134–150.

Тема 8. Инструментальные стали и сплавы

Классификация и свойства инструментальных сталей. Инструментальные стали различной прокаливаемости. Инструментальные стали с разной теплостойкостью. Быстрорежущие стали. Штамповые стали. Твердые сплавы и сверхтвердые материалы.

Литература: [1], стр. 411–448; [2], стр. 179–189.

Тема 9. Цветные металлы и сплавы. Подшипниковые сплавы

Общие сведения. Классификация цветных металлов. Алюминий и его сплавы, силумин, дуралюмин. Медь и ее сплавы, латунь, бронза. Подшипниковые сплавы, баббиты,

Литература: [1], стр. 564–628; [2], стр. 190–207.

1.3 ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Тема 1

Введение. Атомно-кристаллическое строение металлов и процесс кристаллизации

Введение.

Основные задачи дисциплины "Материаловедение. Технология конструкционных материалов"

Дисциплина «Материаловедение. Технология конструкционных материалов» (М.ТКМ) состоит из трех основных разделов: материаловедение, горячая обработка металлов, резание металлов, включает лекции, лабораторные работы, учебную и технологическую заводскую практики.

Для успешного решения многих практических вопросов, связанных с использованием техники в различных отраслях хозяйства, в т. ч. сельском хозяйстве, необходимы сведения о современных прогрессивных материалах, о способах их производства и обработки.

Материалы в технике классифицируют по назначению: конструкционные, инструментальные, строительные и т. д.

В качестве материалов используют металлы и их сплавы, пластмассы, резинотехнические изделия, стекло, керамику, древесину и т. д. Каждый из перечисленных материалов имеет специфические свойства и (в определенных условиях) используется с оптимальным эффектом. Однако наибольшее распространение получили сплавы на железной основе (стали и чугуны), что объясняется наличием у них комплекса высоких механических и эксплуатационных свойств при сравнительно невысокой стоимости и распространенности в природе.

В связи с этим в разделе «Материаловедение» за основу принято изучение металлов и их сплавов.

Металловедение – это наука, изучающая структуру и свойства металлов и устанавливающая связь между их составом, внутренним строением и свойствами.

Применение металлических материалов в технике требует глубокого знания их свойств. Изучив свойства металлов, мы получим знания, позволяющие использовать металлы с определенными свойствами наиболее эффективно. Металл в технике – вещество, «имеющее металлический блеск и пластичность».

Свойства простых металлов и сплавов, состоящих из нескольких элементов, зависят от *природы* самих элементов, их количественно-го соотношения – *состава*, а также от *состояния* – закаленного, отожженного, деформированного и т. д. В целом свойства металлов определяются их внутренним строением – *структурой*. Структура представляет собой порядок расположения частиц (атомов, молекул), из которых состоит металл, или их более крупных скоплений, называемых кристаллическими образованиями.

Изменение междоатомной или кристаллической структуры приводит к изменению свойств металлов, поэтому (для установления свойств металлов), нужно знать их структуру.

«Металловедение» изучает внутреннее строение и свойства металлов и сплавов в их взаимосвязи. Изучив основные факторы, влияющие на структуру металлов (состав, обработка давлением, термическая обработка), и управляя ими, мы сможем придавать металлам требуемые свойства. Поэтому металловедение является научной основой технологических процессов, связанных с пластической деформацией и термической обработкой металлов и их сплавов.

Развитие металловедения как науки. История материальной культуры человечества неразрывно связана с использованием металлов. Переход от каменных орудий труда к металлическим инструментам оценивается как величайшее достижение человечества, вызвавшее бурный рост производительных сил.

Семь-шесть тысяч лет до нашей эры человек начал использовать самородные металлы (золото, серебро, медь). В четвертом-пятом тысячелетиях до нашей эры началась выплавка из руд меди, олова и свинца. В третьем тысячелетии до нашей эры появилась бронза – сплав меди и олова. Применение железа и его сплавов относится к концу второго тысячелетия до нашей эры.

До нашей эры были известны следующие металлы: золото, серебро, медь, олово, железо, ртуть, свинец. К началу XVIII века были открыты цинк, висмут, сурьма, платина, мышьяк. В настоящее время известно около 80 металлов.

Несмотря на то, что металлы с незапамятных времен применялись человечеством, которое умело их обрабатывать и практически использовать, это познание не было научным (пока не возникло учение о структуре металлов). Учение дало научное толкование процессам, происходящим в металлах и сплавах при их получении и обработке.

Впервые существование связи между строением стали и ее свойствами было установлено русским ученым П. П. Аносовым в начале XIX века.

Основы теории и научного обоснования технологии термической обработки стали были заложены также русским ученым - академиком Д. К. Черновым в 1868 году. Он показал, что в стали в твердом состоянии при нагревании и охлаждении происходят фазовые превращения, вызывающие изменения ее свойств. Работы Д. К. Чернова создали фундамент современного металловедения и термической обработки стали.

К началу XX века были построена диаграмма состояния железо-углерод и объяснены превращения в строении стали при медленном охлаждении.

Современное состояние металловедения как науки характеризуется применением самых современных методов исследования, в т. ч. оптической и электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и т. д.

Атомно-кристаллическое строение металлов

Металлы в твердом состоянии обладают рядом характерных свойств:

- металлический блеск;
- повышенная способность к пластической деформации;
- высокая тепло- и электропроводность;
- положительный температурный коэффициент электрического сопротивления, т. е. с повышением температуры увеличивается электросопротивление металла;
- термоэлектронная эмиссия, т. е. способность испускать электроны при нагреве.

Все эти специфические свойства металлов обусловлены их атомным строением и типом связи между атомами.

Типичным атомным строением металлов является наличие малого количества валентных электронов на внешней электронной оболочке. Валентные электроны слабо связаны с ядром, поэтому (под воздействием внешних сил при затратах сравнительно небольшой энергии) они могут покидать свои орбиты.

При сближении изолированных атомов внешние электронные их оболочки начинают перекрываться и взаимодействовать между собой, в результате чего изменяют их строение. В зависимости от ха-

рактера изменения строения валентных электронных оболочек различают четыре основных типа связи между атомами:

- ионную (гетерополярную);
- ковалентную (гомеополярную);
- полярную (связь Ван-дер-Ваальса);
- металлическую (является основной для металлов).

Когда число валентных электронов в атоме мало, осуществляется *металлический* тип связи между атомами. В этом случае свободных электронных оболочек имеется значительно больше, чем электронов для их заполнения. Поэтому (при перекрытии внешних электронных оболочек) электроны отрываются от своих атомов и свободно перемещаются в разных направлениях по незанятым электронным оболочкам между положительно ионизированными атомами (ионами), образуя вокруг них свободный, так называемый, электронный газ. Между положительными ионами и свободным электронным газом возникают силы электростатического взаимопритяжения, которые и обуславливают металлический тип связи между атомами.

Металл – коллектив положительно заряженных ионов, окруженный свободными, отрицательно заряженными электронами. Ионы образуют кристаллическую решетку, а электроны заполняют промежутки между ними и принадлежат не одному, а всей совокупности атомов.

Все металлы и сплавы – тела *кристаллические*, атомы расположены в пространстве закономерно, устойчиво, в определенной последовательности (в отличие от аморфных тел с хаотическим расположением атомов).

Закономерность расположения атомов в пространстве является непосредственным следствием фундаментального закона природы: устойчивыми оказываются состояния, при которых энергия системы **минимальна**. В нашем случае «система» – это кристалл, а «энергия» – сумма энергий взаимодействия между всеми парами атомов, составляющих кристалл. Взаимодействие – это конкуренция сил притяжения и отталкивания между атомами одновременно. Эти силы электрического происхождения стремятся оттолкнуть друг от друга положительно заряженные ионы и сблизить атомы вследствие совместного действия обобществленных электронов.

Минимальное взаимодействие сил между атомами возможно на определенном расстоянии между ними. Энергия системы в это время имеет наибольшее отрицательное значение. С повышением температуры, когда тепловая энергия атомов возрастает, увеличивается

не только амплитуда их колебаний, но и увеличивается «равновесное» расстояние между атомами. Происходит тепловое расширение кристалла.

При закономерном расположении положительных ионов атомов металла внешние электроны теряют связь с отдельными атомами, становятся общими и свободно перемещаются между ионами. С повышением температуры усиливаются колебания ионов, что затрудняет перемещение электронов в электрическом поле, в результате чего электрическое сопротивление растет. И, наоборот, снижение температуры уменьшает электросопротивление, а при очень низких температурах у некоторых металлов возможна сверхпроводимость.

Каждый металл имеет свою атомно-кристаллическую структуру (с учетом размеров атомов и равновесных расстояний между ними). Кристалл состоит из атомов (ионов), расположенных в определенном порядке, который периодически повторяется в трех измерениях. При этом в кристалле каждый атом имеет одно и то же количество ближайших атомов-соседей, расположенных на одинаковом расстоянии, т. е. кристаллическое строение можно представить в виде пространственной решетки, в узлах которой находятся атомы.

Для описания вариантов взаимного расположения атомов в кристалле используются различные способы. Воображаемые линии, проведенные через центры атомов, образуют решетку, так называемую *кристаллографическую плоскость* (рисунок 1.1), в узлах которой расположены атомы. Многократное построение кристаллографических плоскостей, расположенных параллельно, воспроизводит пространственную кристаллическую решетку, узлы которой являются местом расположения атомов.

Наименьший объем кристалла, дающий представление об атомной структуре металла во всем объеме, получил название *элементарной кристаллической ячейки*.

Наиболее простой и распространенный среди металлов является кубическая система, при которой элементарная ячейка представляет собой куб.

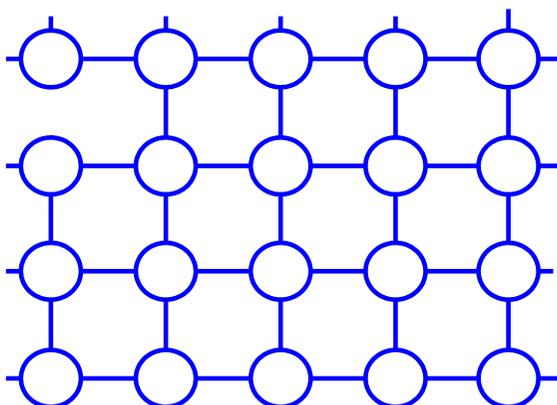


Рисунок 1.1 – Расположение атомов в кристаллографической плоскости

подавляющее большинство технически важных металлов образуют одну из следующих высоко симметричных решеток с плотной упаковкой атомов:

- кубическую объемно-центрированную – ОЦК (рисунок 1.2, а);
- кубическую гранецентрированную – ГЦК (рисунок 1.2, б);
- гексагональную плотноупакованную (рисунок 1.2, в).

Размеры кристаллической решетки характеризуются параметрами или *периодами* решетки, под которыми понимают расстояние между центрами соседних атомов, находящихся в узлах кристаллической решетки и образующими элементарную ячейку. Кубическую решетку определяет один параметр – длина ребра куба **a** (рисунок 1.2, а). Параметры имеют величины порядка атомных размеров и измеряются в нанометрах (ангстремах). Период решетки металлов находится в пределах от 10 до 60 нм.

Другой характеристикой строения и свойств кристаллических решеток является *координационное число* (**K**), под которым понимают число атомов, находящихся на равном и наименьшем расстоянии от данного атома.

Для обозначения кристаллической решетки с указанием ее типа и координационного числа принята следующая система:

- 1) простая кубическая (**K**) – **K6**;
- 2) кубическая объемно-центрированная (ОЦК) – **K8**;
- 3) кубическая гранецентрированная (ГЦК) – **K12**;

4) гексагональная плотноупакованная (ГПУ) – ($c/a = 1,633$) – К12;

5) гексагональная (Г) – К6.

Коэффициент компактности K_k равен отношению объема атомов к объему кристаллической решетки:

$$K_k = V_{ат} / V_{реш} < 1$$

Наибольший коэффициент компактности у металлов:

с гранецентрированной кубической решеткой ($K_k = 0,74$);

с гексагональной решеткой ($K_k = 0,72$);

с объемно-центрированной ($K_k = 0,68$).

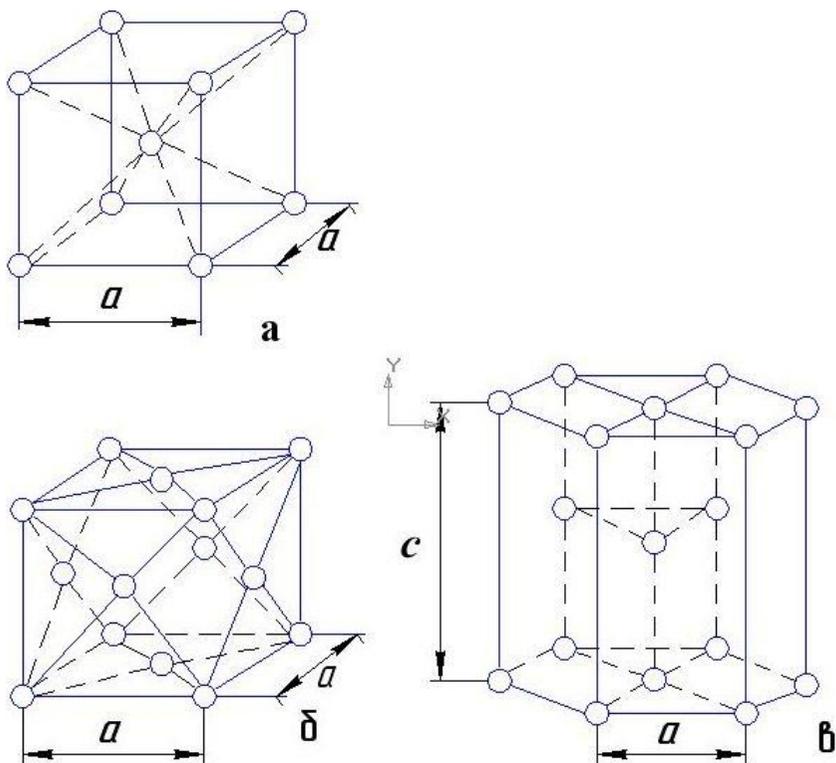


Рисунок 1.2 – Кристаллические решетки металлов

Особенности кристаллического строения металлов приводят к тому, что металлы обладают следующими специфическими свойствами:

аллотропия – способность одного и того же металла менять тип кристаллической решетки при различных температурах (например, железо);

анизотропия – различие свойств металлов по разным металлографическим плоскостям.

Строение реальных кристаллов, понятие о дислокациях

В соответствии с законами физики все металлы в твердом состоянии имеют строго определенную кристаллическую структуру. Однако в действительности каждая кристаллическая решетка имеет различные дефекты.

Кристаллы имеют небольшие размеры, поэтому любой металл состоит из большого числа кристаллов.

Металлы не являются однородными, в них есть химические и физические нарушения – дефекты (образуются в процессе кристаллизации из жидкого раствора). Простой металл состоит из множества мелких кристаллов (поликристаллов), имеющих неправильную внешнюю форму, называемых зернами и сочлененных по границам, т. е. *кристаллитов*. Причины образования дефектов много. Наиболее распространенными дефектами являются:

1) *точечные дефекты*. Имеют малые размеры в трех измерениях, сопоставимые с размерами атомов.

Во-первых, атом металла, расположенный на поверхности кристаллической решетки, окружен другими атомами не со всех сторон. Положение кристаллической решетки неустойчиво, необходимо сравнительно меньше затрат энергии, чтобы удалить атом с занимаемого положения.

Во-вторых, в кристаллической решетке дефектов мало только в условиях высокой чистоты металла. В реальных условиях примеси в металлах есть всегда. В технике преимущественно используются сплавы, а не чистые металлы.

В-третьих, атомы не зафиксированы в каком-то месте, а совершают колебательные перемещения, иногда попадая в то место, которое для них наиболее вероятно. Характер и амплитуда колебаний атомов зависят от температуры, приложенных к металлу усилий, потока движущихся электронов под влиянием электрических напряжений. При энергетических воздействиях отдельные атомы

оказываются вырванными из своего места в кристаллической решетке, попадают в междоузлие, а их место оказывается незаполненным каким-либо атомом (рисунок 1.3).

ДИСЛОЦИРОВАННЫЙ АТОМ

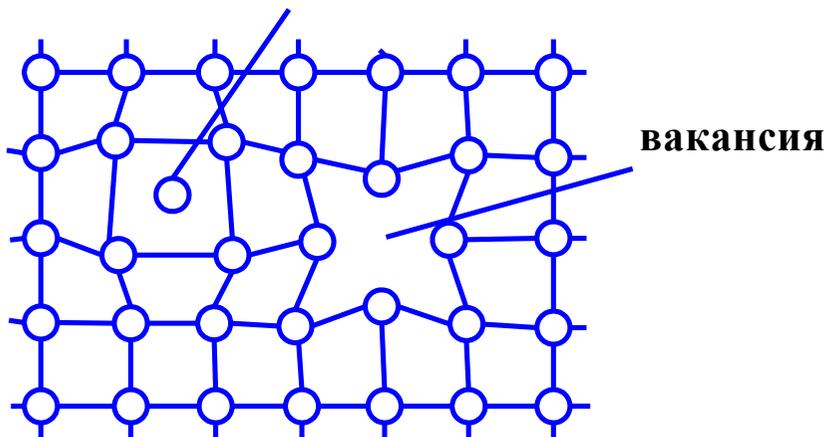


Рисунок 1.3 – Дефекты в кристаллической решетке

Атом, оказавшийся в междоузлии, называется *дислоцированным*. Он создает напряженное состояние в кристаллической решетке. Место в кристаллической решетке, оказавшееся без атома, называется *вакансией*.

Вакансии оказывают большое влияние на диффузию в металлах. Концентрация вакансий в металле определяется величиной, которая зависит от температуры;

2) *линейные дефекты*. Линейные несовершенства имеют малые размеры в двух измерениях и большую протяженность в третьем измерении, достигая размеров кристалла. Этими несовершенствами могут быть ряд вакансий или ряд междоузельных атомов. Видами линейных несовершенств являются *краевые* и *винтовые* дислокации

Краевая линейная дислокация представляет собой локализованное искажение кристаллической решетки, вызванное наличием в ней «лишней» атомной полуплоскости.

Винтовая дислокация – это прямая линия, вокруг которой атомные плоскости изогнуты по винтовой поверхности;

3) *поверхностные дефекты* малы только в одном измерении. Они представляют собой поверхности раздела между отдельными зернами или субзернами в поликристаллическом металле. Металлы и сплавы практически в любом состоянии имеют несовершенства кристаллической решетки, которые можно охарактеризовать *плотностью дислокаций*.

Атомы в зоне дислокации смещены относительно их равновесного состояния, стремятся занять более равновесное положение. Поэтому энергия для перемещения дислокации значительно меньше, чем энергия для сдвига идеальной решетки.

Механические свойства металлов зависят от количества дислокаций и способности их к перемещению и размножению.

Влияние плотности дислокаций на сопротивление деформированию металла можно представить графически (рисунок 1.4). Дефекты, искажающие кристаллическую решетку, повышают энергию поликристалла, что выражается в виде внутренних напряжений.

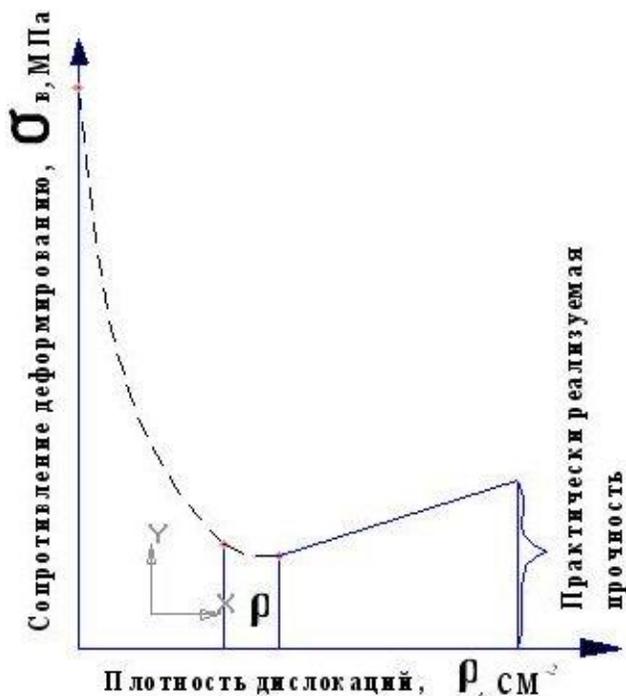


Рисунок 1.4 – Зависимость сопротивления деформированию от плотности дислокации

При низкой плотности дислокаций наблюдается высокое сопротивление деформированию. Отсутствие дислокаций и других дефектов в кристаллической решетке приближает механические свойства материалов к теоретическим свойствам идеального кристалла. Увеличение плотности дислокаций уменьшает сопротивление деформированию только до критического значения $\rho = 10^6 \text{ см}^{-2}$. После этого начинает преобладать взаимодействие однозначных дислокаций, что увеличивает сопротивление деформированию.

Для чистого железа теоретическое сопротивление сдвигу составляет 2300–11 000 МПа, а реально – только 200–300 МПа, т. е. в сотни раз меньше.

В настоящее время процессы кристаллизации, пластической деформации, термической обработки объясняются на современных позициях только с учетом наличия вакансий и перемещения дислокаций.

Процесс кристаллизации

Кристаллизацией называется процесс перехода металла из жидкого состояния в твердое (при определенной температуре и с образованием кристаллической структуры). Кристаллизация может проходить и в твердом состоянии при переходе металла из одного фазового состояния в другое (*перекристаллизация*). Кристаллизация осуществляется вследствие перехода вещества к термодинамически более устойчивому состоянию, с меньшей свободной энергией. Энергетическое состояние системы, имеющей большое число охваченных тепловым движением частиц, характеризуется особой термодинамической функцией E , называемой свободной энергией:

$$E = H - TS,$$

где H – внутренняя энергия системы;

T – абсолютная температура;

S – энтропия (функция состояния).

На рисунке 1.5 показано изменение свободной энергии металла в жидком и твердом состоянии в соответствии с изменением температуры. Свободная энергия того и другого состояния снижается с повышением температуры, однако наклон кривых на графике различен. При какой-то конкретной температуре T_s свободная энергия твердого и жидкого состояний совпадает (пересечение кривых на графике). Эта температура является температурой плавления. При данной температуре оба состояния вещества имеют одинаковую устойчивость. Повысить температуру системы означает повысить

устойчивость жидкого состояния, понизить температуру – повысить устойчивость твердого состояния. Чем больше $T_s - T_k$, тем выше скорость кристаллизации. При температуре плавления кристаллизация невозможна, так как отсутствует разница свободных энергий $E_{ж}$ и $E_{т}$.

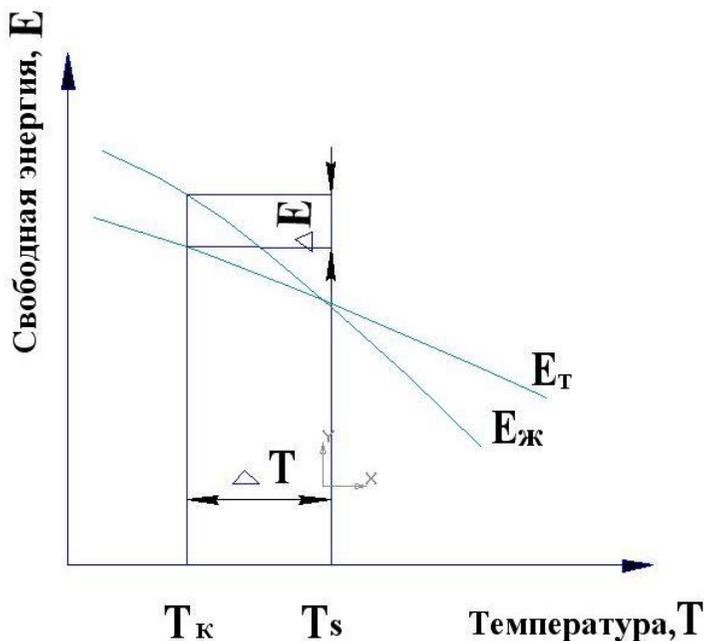


Рисунок 1.5 – Кривые изменения свободной энергии жидкого и твердого состояния тела в зависимости от температуры

T_s – равновесная температура превращения жидкости в кристаллический металл или теоретическая (равновесная) температура кристаллизации;

T_k – фактическая температура кристаллизации, при которой практически начинается кристаллизация;

$T_s - T_k$ – степень переохлаждения.

Для начала кристаллизации необходимо, чтобы процесс был термодинамически выгоден системе и сопровождался уменьшением свободной энергии системы. Охлаждение жидкости ниже равновесной температуры кристаллизации ($T_s - T_k$) называется *переохлаждением*.

При достижении равновесной температуры T_s на кривой охлаждения возникает горизонтальная площадка, так как отвод тепла компенсируется выделением при затвердевании скрытой теплоты кристаллизации.

Процесс кристаллизации состоит из двух стадий:

- образование зародышей (центров кристаллизации) – N ;
- рост центров (скорость кристаллизации) – V .

В поликристаллическом металле кристаллы с различной ориентацией в процессе затвердевания соприкасаются друг с другом и искажают внешнюю форму. Такие кристаллы с правильным внутренним строением и искаженной внешней формой называются *зернами*. Явления, протекающие при кристаллизации, сложны и разнообразны. Можно выделить следующие:

1) в жидком состоянии атомы совершают произвольное перемещение по всему объему металла, сохраняется так называемый *ближний порядок*, т. е. упорядоченное расположение атомов распространяется на очень небольшое расстояние. С понижением температуры степень ближнего порядка возрастает;

2) при температурах близких к равновесной T_s в жидком металле возможно образование небольших группировок, в которых атомы расположены также, как в кристаллах. Такие образования постепенно превращаются в *зародыши (центры кристаллизации)*. Зародыши растут только в случае, если при этом уменьшается свободная энергия системы. И этот рост тем больше, чем выше степень переохлаждения металла и, следовательно, больше разница свободных энергий системы (рисунк 1.5);

3) первоначально в объеме металла возникают центры кристаллизации. Они постоянно растут, доля жидкой фазы при этом уменьшается. Процесс завершается полным затвердеванием металла.

Изложенный процесс образования центров кристаллизации справедлив только для *спонтанной* (самопроизвольной) кристаллизации, когда центрами служат флуктуации (отклонения по температуре, давлению, концентрации) в относительно чистом, свободном от примеси металле;

4) в реальных металлах центрами кристаллизации (наряду с флуктуациями) могут быть не растворившиеся частички кристаллизующегося или постороннего вещества, стенки формы. Такая кристаллизация называется *вынужденной*. В этом случае мы можем изменять число центров и степень переохлаждения (зависит от скорости охлаждения) в процессе кристаллизации, управлять этим процессом;

5) на процесс кристаллизации существенно влияет число зародышей (N), возникающих в единицу времени, и скорость роста (V) этих зародышей. Сильный перегрев ведет к росту зерна из-за уменьшения числа зародышей N ;

6) в зависимости от условий кристаллизации и степени чистоты металлов могут возникать кристаллы разной формы: пластинчатые, игольчатые, сфероидные. Наиболее распространенный дендритный механизм роста кристаллов обнаружен Д. Н. Черновым в слитке при его затвердевании.

Вопросы для самоконтроля

1. Укажите параметры кристаллической решетки.
2. Что такое анизотропия сплавов?
3. Опишите типы кристаллических решеток.
4. Что такое аллотропия?
5. Как влияет плотность дислокаций на механические свойства металлов?
6. Как изменяется свободная энергия вещества в твердом и жидком состояниях? Поясните соответствующим графиком.
7. Чему равна свободная энергия сплава?
8. Что является движущей силой процесса кристаллизации?
9. Назовите основные этапы процесса кристаллизации.
10. Укажите механизм спонтанной кристаллизации.
11. Укажите механизм вынужденной кристаллизации.
12. Что влияет на величину зерна при кристаллизации?

Тема 2 Теория сплавов

Понятие о сплавах

Чистые металлы обладают низкой прочностью по сравнению со сплавами, поэтому в технике, как правило, применяются не чистые металлы, а сплавы.

Сплавом называется вещество, полученное сплавлением двух или более компонентов. Вещества, образующие сплавы, называются *компонентами*. Компонентами могут быть чистые элементы, химические соединения. Основным компонентом должен быть металл, а сплав, приготовленный в основном из металлов, называется металлическим сплавом.

Для рассмотрения строения, превращений и свойств сплавов в металловедении используются понятия *фаза* и *структура*.

Фазой называется однородная часть системы (сплава), имеющая одинаковый состав, свойства, тип решетки, и отделенная от остальных частей поверхностью раздела. Под системой понимают совокупность фаз, находящихся в равновесии.

Структурой называют строение сплава, видимое в микроскопе, т. е. взаимное расположение фаз, их форма и размеры. Структурные составляющие могут состоять из одной, двух и более фаз (например, эвтектика). Между структурой сплава и его свойствами существует качественная связь.

Сплав может находиться в равновесном и метастабильном состояниях. *Равновесное* состояние соответствует минимальному значению свободной энергии. Равновесное состояние называют также *стабильным*, так как оно не подвергается самопроизвольному изменению во времени. Такое состояние достигается только при очень малых скоростях охлаждения сплава. Однако в технике это состояние достигается редко.

Под *метастабильным* состоянием понимают состояние, переходящее под влиянием внешних воздействий в более устойчивые состояния. Необходимо отметить, что сплавы в метастабильном состоянии показывают, как правило, наиболее высокие механические свойства.

В жидком состоянии компоненты, в основном, неограниченно растворимы, т. е. в любой части общего объема сплава соотношение компонентов или их процентное содержание одинаковы. Расплавы обычно однородны, представляют одну фазу. В твердом же состоя-

нии каждый сплав имеет свою кристаллическую решетку с конкретными геометрическими параметрами. В зависимости от целого ряда факторов в сплавах возможно образование следующих соединений:

- твердые растворы;
- химические соединения;
- механические смеси.

Твердым раствором называют соединение, в котором один из компонентов *A* сохраняет кристаллическую решетку – *растворитель*, а другой компонент *B* не сохраняет своей решетки и отдает свои атомы в решетку первого компонента. Таким образом, твердый раствор – это соединение, получаемое при приготовлении металлического сплава, когда атомы растворимого элемента располагаются в решетке растворителя. Твердый раствор, состоящий из нескольких компонентов, имеет один тип решетки и представляет одну фазу. Обозначение – *A (B)*.

Различают *твердые растворы замещения* (рисунок 2.1, а) и *твердые растворы внедрения* (рисунок 2.1, б). В твердом растворе замещения атомы растворенного компонента замещают часть атомов растворителя в его кристаллической решетке. Размещение растворенных атомов в решетке неупорядоченно, произвольно.

В твердых растворах внедрения атомы растворенного компонента располагаются в межатомных промежутках кристаллической решетки растворителя.

Размеры атомов растворителя и растворенного вещества всегда различаются, поэтому при образовании твердого раствора кристаллическая решетка всегда искажается (рисунок 2.2). Изменение параметров кристаллической решетки – важный момент, определяющий изменение свойств сплавов.

Твердые растворы замещения могут быть *неограниченными* и *ограниченными*, т. е. их существование возможно либо при любой концентрации, либо в ограниченной области концентраций компонентов.

Существование твердых растворов замещения с неограниченной растворимостью возможно при соблюдении следующих условий:

1) компоненты должны обладать одинаковыми по типу кристаллическими решетками (условие изоморфности), например, сплавы Cu–Ni, ОЦК, К12;

2) различие в атомных размерах компонентов и в периодах кристаллической решетки не должно превышать 8 %. При различии этих размеров в пределах 8...15 % возможно образование ограниченных твердых растворов. При различии в размерах атомов более

15 % искажение кристаллической решетки становится столь велико, что образование твердых растворов становится невозможным.

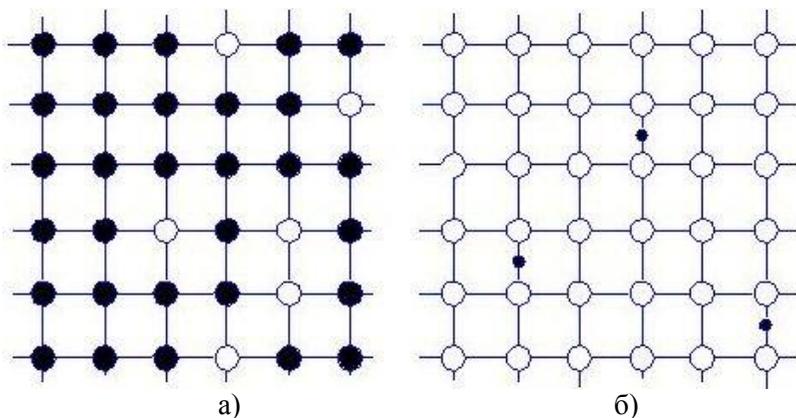


Рисунок 2.1 – Расположение атомов в твердых растворах

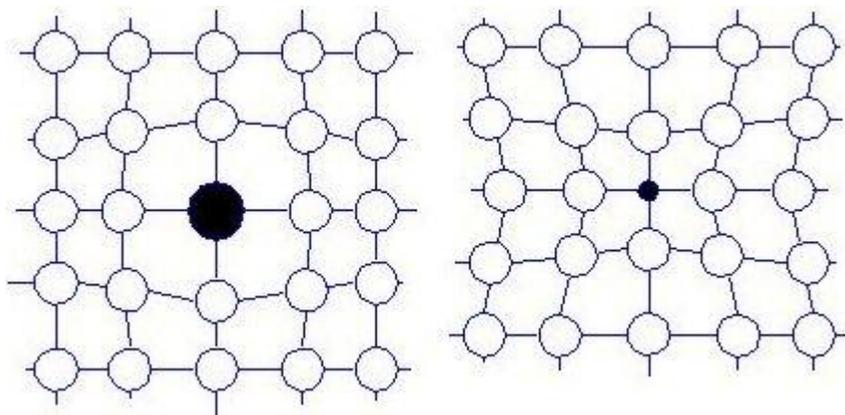


Рисунок 2.2 – Искажение кристаллической решетки в твердом растворе замещения

Образование твердых растворов внедрения возможно в тех случаях, когда диаметр растворенного вещества элемента не превышает размеров пор кристаллической решетки. Твердые растворы внедрения образуются только при ограниченной растворимости компо-

ментов, они сохраняют металлический тип связи. Например, сплавы переходных металлов с элементами, имеющими малые размеры атомов С, N, Н, О, В.

Химические соединения между металлами образуются довольно часто. Отличие химических соединений от твердых растворов заключается в следующем:

1) химическое соединение имеет кристаллическую решетку, которая отличается от кристаллической решетки элементов, образующих это соединение;

2) в соединениях всегда сохраняется простое кратное весовое соотношение элементов (их состав можно выразить формулой A_nB_m , где A и B – соответствующие элементы, а n и m – простые целые числа), отсутствует металлический тип связи;

3) свойства химического соединения и свойства образующих его элементов резко отличаются. Как правило, это высокая твердость, электрическое сопротивление;

4) химическое соединение имеет постоянную температуру плавления.

Механическая смесь компонентов A и B образуется тогда, когда они не способны к взаимному растворению в твердом состоянии и не вступают в химическую реакцию с образованием соединения. При образовании механической смеси кристаллические решетки фаз не изменяются. Фазы, образующие такую структуру, отчетливо обнаруживаются микроанализом.

Различают *простую*, *эвтектическую* и *эвтектоидную* механические смеси.

Простая механическая смесь образуется при любом процентном соотношении компонентов (сплавы железа со свинцом).

Эвтектическая механическая смесь имеет определенный химический состав, образуется при постоянной наименьшей температуре плавления данной системы (например, ледебурит в железоуглеродистых сплавах).

Эвтектоидная механическая смесь имеет определенный химический состав, образуется при постоянной температуре, но только при распаде твердого раствора определенного химического состава (перлит в сталях).

Основные типы диаграмм состояния двухкомпонентных сплавов

Процесс кристаллизации металлических сплавов и строение сплавов в твердом и жидком состояниях наглядно описывается с помощью *диаграмм состояния*, которые показывают изменения состояния сплавов в зависимости от концентрации компонентов и температуры. Диаграммы состояния строятся на основе экспериментальных данных термического, металлографического, рентгеновского и других анализов.

Диаграмма состояния – графическое изображение фазовых превращений в зависимости от температуры и концентрации. Диаграммы строятся при условии равновесия, поэтому превращения можно фиксировать только в условиях медленного изменения температуры (также называют диаграммами равновесия).

Состояние сплава характеризуется числом и концентрацией фаз и зависит от *внешних факторов*: температуры и давления. Общие закономерности изменения числа фаз в сплаве определяются *правилом фаз* (законом Гиббса). Правило фаз в математической форме устанавливает зависимость между числом фаз и выражается уравнением

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

$$\text{или } C = K + 2 - \Phi,$$

где C – степень свободы;

K – число компонентов, образующих систему;

Φ – число фаз, находящихся в равновесии;

n – число внешних факторов.

Под *числом степеней свободы* (вариантностью) понимается число внешних и внутренних факторов (температура, давление и концентрация), которые можно изменять без изменения числа фаз в системе.

При использовании правила фаз к металлам практически переменным считают только один фактор – *температуру*, т. к. давление оказывает малое влияние, и исследования ведутся при постоянном давлении на фазовое состояние системы.

Поэтому уравнение принимает вид

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

Анализ уравнения показывает, что в системе с двумя компонентами в равновесии может находиться не более трех фаз. Если в си-

стеме находится максимальное число фаз, то число степеней свободы равно 0 ($C = 0$), и такое равновесие называется *инвариантным*. Это возможно в определенных условиях (при постоянной температуре и определенном составе находящихся в равновесии фаз).

Диаграмму состояния двухкомпонентной системы строят экспериментально в координатах «температура – концентрация» (рисунок 2.3). На оси абсцисс откладывают концентрацию компонентов в весовых процентах, сумма которых составляет 100. Поэтому каждая точка на оси абсцисс соответствует определенному содержанию каждого его компонента.

Для построения диаграмм состояния используется термический анализ. С этой целью получают кривые охлаждения сплавов различной концентрации компонентов *A* и *B*, а по их перегибам и останковкам, связанным с тепловыми эффектами превращений, определяют температуры соответствующих превращений (критические точки).

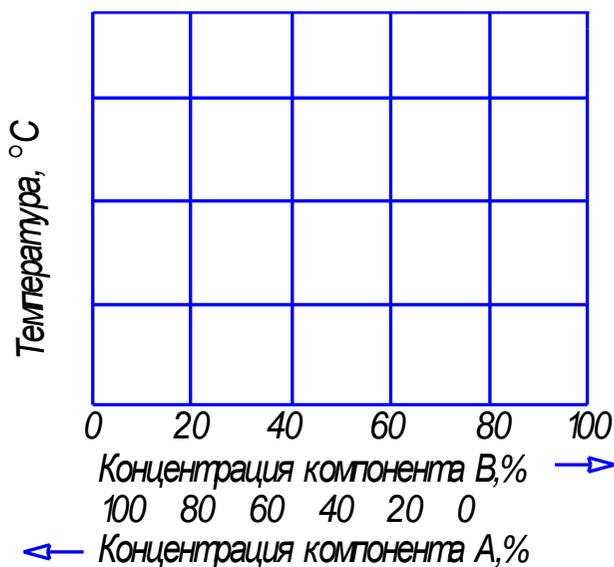


Рисунок 2.3 – Координаты для изображения диаграммы состояния двухкомпонентной системы

Кривые охлаждения – это графические зависимости изменения температуры сплава (T) от времени охлаждения (τ). Точки перегиба и остановки характеризуют начало и конец фазовых превращений.

На рисунке 2.4 дано построение диаграммы состояния методом термического анализа для случая, когда компоненты находятся в твердом состоянии, имеют разные кристаллические решетки, образуют механическую смесь двух твердых фаз и не образуют твердых растворов, химических соединений.

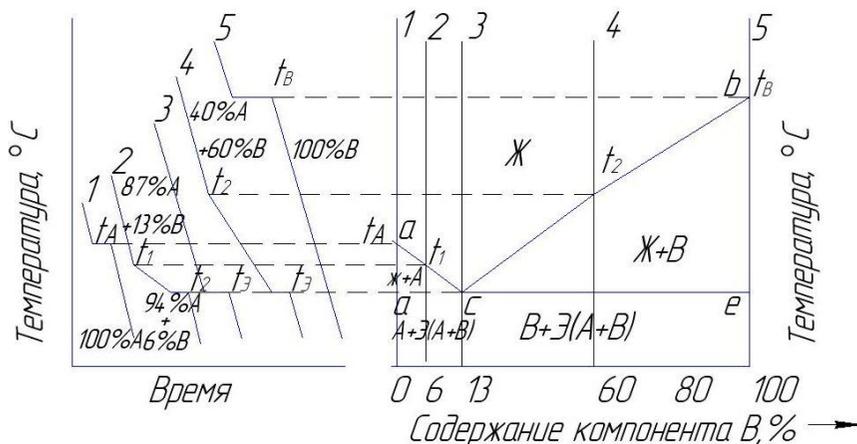


Рисунок 2.4 – Построение диаграммы состояния сплавов, образующих механическую смесь в твердом состоянии: Ж – жидкая фаза; Э – эвтектика

Температура охлаждающегося чистого компонента A равномерно понижается до t_A (кривая 1), при которой компонент A затвердевает. На кривой фиксируется остановка (горизонтальная часть кривой), т. к. в соответствии с правилом фаз процесс кристаллизации чистого компонента должен протекать при постоянной температуре

$$(C = 1 + 1 - 2 = 0).$$

После затвердевания компонента A вновь возобновляется равномерное понижение температуры. Процесс охлаждения компонента B протекает аналогично (кривая 5).

При охлаждении сплава, содержащего 94% A и 6% B температура равномерно понижается до t_1 (кривая 2). При этой температуре начинается процесс кристаллизации. На кривой охлаждения отмечается перегиб (критическая точка), связанный с уменьшением ско-

рости охлаждения вследствие выделения скрытой теплоты кристаллизации. Это вызвано образованием твердой фазы, которая целиком состоит из компонента A .

Процесс выделения компонента A из жидкой фазы продолжается до температуры t_3 . При t_3 на кривой охлаждения образуется горизонтальная площадка, что означает кристаллизацию оставшейся части жидкого сплава при постоянной температуре (вторая критическая точка).

Сплав, содержащий 87% A и 13% B (кривая 3), при охлаждении остается жидким до температуры t_3 . При достижении t_3 отмечается остановка снижения температуры, связанная с процессом затвердевания всего сплава при постоянной температуре.

Сплав, содержащий 40% A и 60% B (кривая 4), имеет кривую охлаждения подобно кривой 2. Кристаллизация этого сплава начинается при температуре t_2 (из жидкой фазы выделяется компонент B), окончательная кристаллизация происходит при постоянной температуре t_3 . Анализ кривых охлаждения показывает, что все сплавы в системе $A - B$ окончательно затвердевают при постоянной температуре t_3 . Кристаллизации при эвтектической температуре t_3 подвергается только сплав с содержанием компонентов 87% A и 13% B . Такой сплав, в котором происходит одновременная кристаллизация компонентов при постоянной и самой низкой для данной системы сплавов температуре, называется *эвтектическим*.

Структура, состоящая из механической смеси двух или более твердых фаз, одновременно кристаллизовавшихся из жидкого сплава, называется *эвтектикой*. Все сплавы, имеющие соотношение компонентов, отличное от эвтектического соотношения, кристаллизуются при переменной температуре (интервале температуры), причем первоначально кристаллизуются компоненты, избыточные по сравнению с эвтектическим сплавом.

Состояние системы для эвтектического сплава при температуре кристаллизации (одновременно существует две твердые и одна жидкая фаза) имеет *инвариантное равновесие*:

$$C = 2 + 1 - 3(\mathcal{J} + A + B) = 0.$$

Процесс кристаллизации из жидкого сплава избыточного компонента (A или B) протекает в интервале температур, т. к. система имеет одну степень свободы:

$$C = 2 + 1 - 2(\mathcal{J} + A) = 1.$$

Если найденные критические точки перенести на диаграмму (рисунок 2.4), а одноименные критические точки (т. е. отражающие одинаковый физический процесс) соединить кривыми, то получится диаграмма состояния системы сплавов A и B . В данном случае диаграмма соответствует системе сплавов $Pb - Sb$.

Начало затвердевания сплавов происходит при температурах, отвечающих линии acb , которую называют линией *ликвидус*. При температурах, соответствующих линии ac начинает кристаллизоваться чистый компонент A , а по линии cb – чистый компонент B .

Полное затвердевание всех сплавов происходит при постоянной температуре t_3 , отвечающей на диаграмме состояния горизонтальной линии dce . Эту линию называют *солидус*.

В точке C (эвтектическая точка) происходит одновременная кристаллизация компонентов A и B с образованием только эвтектической смеси (эвтектический сплав).

На диаграмме состояния указаны структурные составляющие сплавов различного состава. Фазовыми составляющими любого сплава рассматриваемой системы ниже линии солидус будут кристаллы компонентов A и B .

Диаграмма состояния сплавов с *полной растворимостью компонентов в жидком и твердом состояниях* показана на рисунке 2.5.

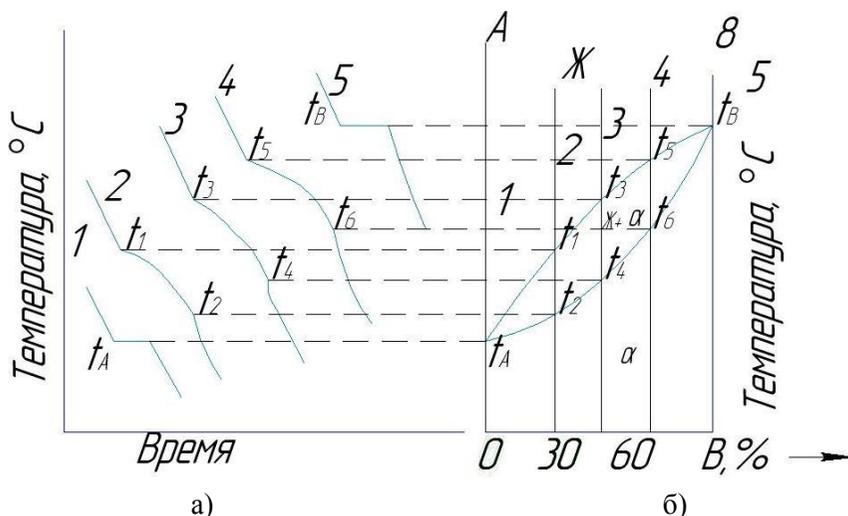


Рисунок 2.5 – Построение диаграммы состояния для случая полной взаимной растворимости компонентов A и B в твердом состоянии

Верхняя линия $t_A t_1 t_3 t_5 t_B$ (линия ликвидус) на рисунке 2.5 указывает температуры начала кристаллизации сплавов, а нижняя линия $t_A t_1 t_3 t_5 t_B$ (линия солидус) – на температуры окончания кристаллизации.

Выше линии ликвидус существует только жидкая фаза \mathcal{J} . В области ниже линии ликвидус устойчив α -твердый раствор. В области между линиями ликвидус и солидус в равновесии находятся жидкая фаза и α -твердый раствор.

Построение диаграммы состояния методом термического анализа осуществляется по кривым охлаждения сплавов различной концентрации компонентов A и B (рисунок 2.5), на которых отмечаются точки перегибов, характеризующих начало и конец фазовых превращений.

Температура охлаждаемого компонента A равномерно понижается до температуры t_A , при которой компонент полностью затвердевает. На кривой 1 отмечается горизонтальная линия, т. к. согласно правилу фаз только при постоянной температуре могут существовать две фазы:

$$C = 1 + 1 - 2(\mathcal{J} + A) = 0.$$

После затвердевания температура снова понижается.

Характер кривой охлаждения 5 чистого компонента B аналогичен.

При охлаждении любого сплава из компонентов A и B температура понижается до температуры ликвидус, при которой начинается процесс кристаллизации, и на кривой охлаждения отмечается перегиб (критическая точка t_1). Окончание кристаллизации также отмечается точкой перегиба (t_2).

Если найденные критические точки ($t_A, t_1, t_3, t_5, t_2, t_4, t_B$) перенести на сетку координат, то получится диаграмма состояния сплавов A и B , образующих непрерывный ряд твердых растворов. Примером может служить сплав Cu-Ni (ОЦК, К12, $a_{\text{Cu}} = 1,28 \text{ нм}$, $a_{\text{Ni}} = 1,24 \text{ нм}$, разница в периодах составляет 3,2%).

Построение диаграмм состояния сплавов, образующих *ограниченные твердые растворы*, приведено на рисунке 2.6. Диаграмма сочетает две рассмотренные диаграммы.

Линия $асв$ – линия ликвидус. При температурах, соответствующих линии $ас$ из жидкого сплава выделяются кристаллы α (твердый раствор компонента B в компоненте A), а по линии $св$ – кристаллы β (твердый раствор компонента A в компоненте B). Линия $адсев$ – линия солидус.

Точка d характеризует предельную растворимость компонента B в компоненте A , а точка e – предельную растворимость компонента A в компоненте B .

Сплавы, расположенные левее точки d и правее точки e , кристаллизуются так же, как и сплавы с *неограниченной растворимостью*. Например, кристаллизация сплава 1 начинается при температуре t_1 и заканчивается при t_2 .

Затвердевший сплав состоит только из кристаллов твердого раствора α . Фазовых превращений при дальнейшем понижении температуры в твердом состоянии не происходит. Сплавы, лежащие правее точки e , состоят только из кристаллов β .

Кристаллизация сплава 2 происходит следующим образом. Когда температура охлаждающего жидкого сплава достигнет t_3 (ликвидус), появляются первые кристаллы α . При дальнейшем понижении температуры увеличивается доля затвердевшего сплава. При достижении температуры t_3 оставшаяся часть жидкого сплава кристаллизуется при постоянной температуре, причем образуется эвтектическая смесь двух твердых фаз α и β .

Кристаллизация сплава 3 осуществляется при постоянной температуре, t_3 – эвтектический сплав.

Фазовый состав сплавов ниже линии солидус в условиях равновесия зависит от соотношения компонентов следующим образом:

- 1) сплавы, расположенные левее точки f , являются однофазными и состоят из одной α -фазы;
- 2) сплавы, состав которых лежит между точками f и k , являются двухфазными, и состоят из фаз α и β ;
- 3) сплавы, расположенные правее точки k , являются однофазными и состоят из фазы β .

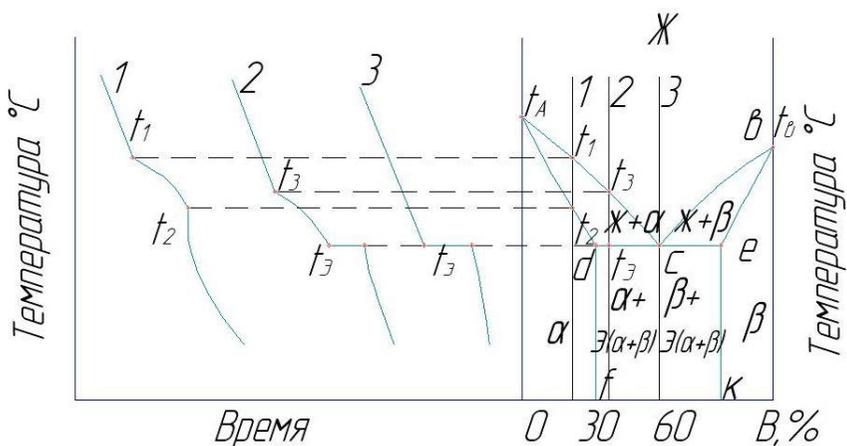


Рисунок 2.6 – Кривые охлаждения и диаграмма состояния сплавов, образующих ограниченные твердые растворы

Структура доэвтектических двухфазных сплавов состоит из α -твердого раствора и эвтектики, заэвтектических – из β -твердого раствора и эвтектики. Структура сплава, концентрация которого соответствует точке *c*, представляет собой только зерна эвтектики.

Диаграмма состояния сплавов, образующих *устойчивые химические соединения*, неограниченно растворимых в жидком состоянии и нерастворимых в твердом состоянии, показана на рисунке 2.7.

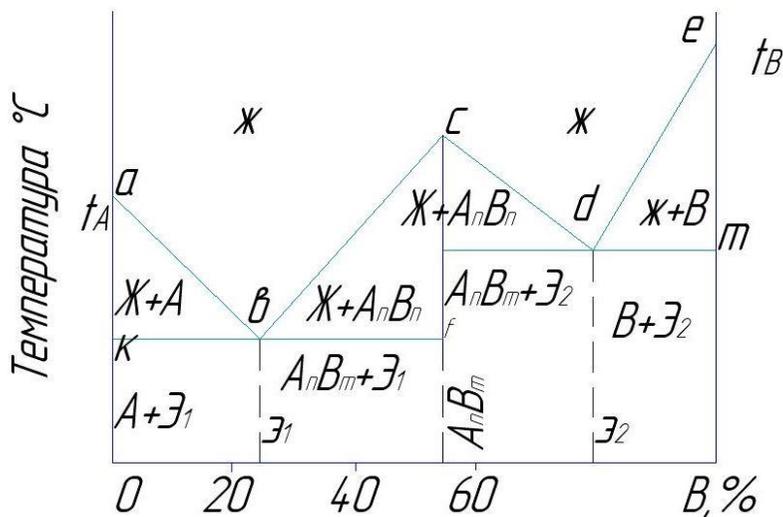


Рисунок 2.7 – Диаграмма состояния сплавов с устойчивым химическим соединением

Такая диаграмма может быть представлена как две простые диаграммы с кристаллизацией сплавов, образующих механическую смесь кристаллов чистых компонентов и химического соединения.

Диаграмма имеет одну жидкую и три твердые фазы: A , B и A_nB_m . Структурные составляющие твердых сплавов приведены на диаграмме. Возникшее химическое соединение A_nB_m является компонентом и делит диаграмму состояния на две $A - A_nB_m$ и $A_nB_m - B$. Тип диаграммы зависит от свойств компонентов A , B и A_nB_m .

Закон Н. С. Курнакова для двухкомпонентных сплавов

Известно, что вид диаграммы состояния зависит от того, какие фазы образуют оба компонента. Свойства сплава также зависят от того, какие соединения или какие фазы образовали компоненты сплава.

Как впервые установил русский академик Н. С. Курнаков, между составом и структурой сплава, определяемой типом диаграммы состояния, и свойствами сплава существует определенная графическая зависимость (рисунок 2.8). В основу построения зависимостей положен разработанный им физико-химический анализ, который является главным методом изучения сплавов и широко используется при исследовании происходящих в них структурных превращениях при нагреве и охлаждении.

На рисунке 2.8 приведены следующие четыре случая:

а) в случае образования механических смесей свойства сплава изменяются по *линейному закону*;

б) при образовании неограниченных твердых растворов свойства сплава изменяются по *криволинейной зависимости*, причем некоторые свойства, например, электрическое сопротивление, могут сильно отличаться от свойств компонентов;

в) в случае образования ограниченных твердых растворов, свойства в интервале концентрации, отвечающем однофазным твердым растворам, изменяются по *криволинейной зависимости*, а в двухфазной области диаграммы – по *прямолинейному закону*;

г) в случае образования химического соединения на диаграмме «концентрация – свойство» составу химического соединения соответствует *максимум* указанных свойств.

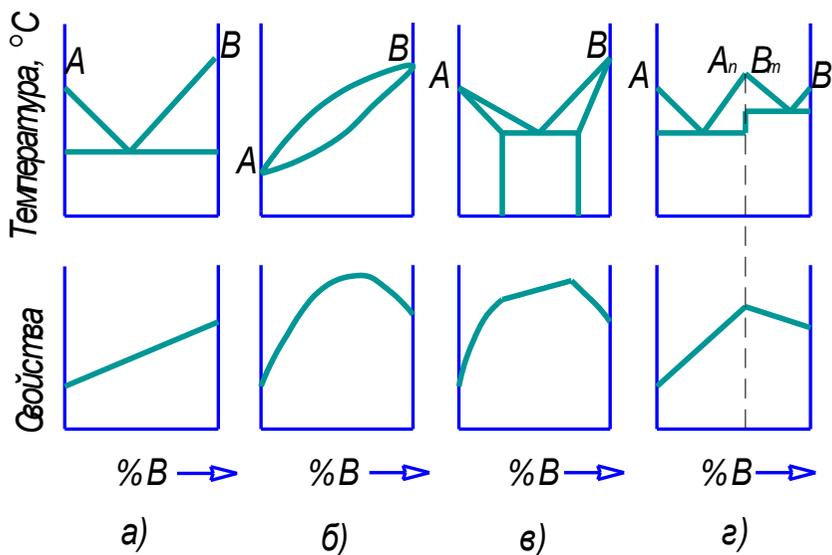


Рисунок 2.8 – Схема зависимости свойств сплавов от типа диаграммы состояния

Существует также определенная связь между диаграммой состояния и технологическими, в частности, литейными свойствами. Эвтектические сплавы обладают высокой жидкотекучестью и малой усадкой, однако пластичность их невысока (чугуны). Наоборот, сплавы в области однофазных твердых растворов пластичны, хорошо куется и прокатываются (например, стали).

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое компонент, фаза, сплав?
2. Запишите в математической форме правило фаз.
3. Что подразумевается под числом степеней свободы систем?
4. Что такое диаграмма состояния сплавов?
5. Как определяют критические точки?
6. Как строится диаграмма двойных сплавов?
7. Укажите основные типы диаграмм двойных сплавов.
8. Что такое эвтектика и эвтектоид?
9. Что такое ликвидус и солидус?
10. Изобразите диаграмму состояния двойных сплавов при образовании в твердом состоянии механической смеси.

11. Изобразите диаграмму состояния двойных сплавов при неограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии.
12. Изобразите диаграмму состояния двойных сплавов при ограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии.
13. Изобразите диаграмму состояния двойных сплавов с образованием химического соединения.
14. Укажите взаимосвязь между видом диаграммы и свойствами двойных сплавов (закон Н. С. Курнакова).

Тема 3 Железоуглеродистые сплавы

Железо и его свойства.

Кривая охлаждения чистого железа

Сплавы железа с углеродом нашли наиболее широкое применение в современной технике в качестве конструкционных материалов. Это объясняется:

- 1) сравнительно высоким содержанием железа в земной коре;
- 2) возможностью использования высокопроизводительных процессов получения сплавов железа с углеродом;
- 3) возможностью придания и изменения в широких пределах механических свойств сплавов железа с углеродом посредством термической обработки или пластической деформации;
- 4) низкой стоимостью.

Твердость железа составляет 50–60 НВ, прочность – 200–250 МПа, пластичность (относительное удлинение) – 50–60%.

Железо – металл серебристо-серого цвета, атомный номер 26, атомная масса 55,65, плотность его при комнатной температуре составляет 7,88 г/см³. Температура плавления железа 1539 °С.

На практике применяется технически чистое железо, т. к. обычно железо всегда содержит примеси (суммарное количество примесей не превышает 0,1–0,2%, в т. ч. углерода 0,02%).

Железо относится к полиморфным металлам. *Полиморфизмом* или *аллотропией* называется способность металла (в зависимости от температуры) существовать в различных модификациях, иметь различные кристаллические решетки и, следовательно, иметь различные свойства. Железо известно в двух основных полиморфных модификациях α и γ . α -железо существует при температурах ниже 910°С и выше 1392°С, γ -железо существует в интервале температур 910–1392°С.

Кривая охлаждения чистого железа образует четыре горизонтальные площадки (рисунок 3.1). При температуре 1539°С происходит кристаллизация металла, образуются кристаллы с кубической объемно-центрированной ячейкой, параметры решетки $a = 0,293$ нм (2,93 Å). Тип кристаллической решетки ОЦК совпадает с типом решетки чистого железа при температуре ниже 910°С, а параметры решетки различаются, поэтому в технической литературе используется также обозначение δ -железо для его модификации при температуре выше 1392°С, решетка ОЦК.

Вторая горизонтальная площадка при температуре 1392°C отражает процессы перекристаллизации α (δ) ОЦК \leftrightarrow γ ГЦК. Эту критическую точку обозначают A_{r4} (при охлаждении) или A_{c4} (при нагревании). γ -железо имеет кристаллическую решетку с ячейкой в виде гранцентрированного куба с параметром решетки $0,365$ нм ($3,6545 \text{ \AA}$). Плотность γ -железа выше, чем α -железа, и равна $8,0-8,1 \text{ г/см}^3$.

Критическая точка (и соответственно площадка на кривой охлаждения) при 910°C характеризует процесс перекристаллизации $\gamma \leftrightarrow \alpha$. Эту критическую точку обозначают A_{r3} (при охлаждении) или A_{c3} (при нагревании); α -железо при температуре ниже 910°C имеет кристаллическую решетку с ячейкой в виде объемно-центрированного куба ОЦК с параметром $a = 0,286$ нм ($2,86 \text{ \AA}$). Иногда парамагнитное железо обозначают β (α).

Критическая точка при температуре 768°C (A_{r2} – точка Кюри) соответствует магнитному превращению, т. е. переходу из парамагнитного в ферромагнитное состояние. Тип кристаллической решетки во время магнитного превращения не меняется, остается ОЦК, изменяются только параметры решетки, $a = 0,28$ нм ($2,8 \text{ \AA}$).

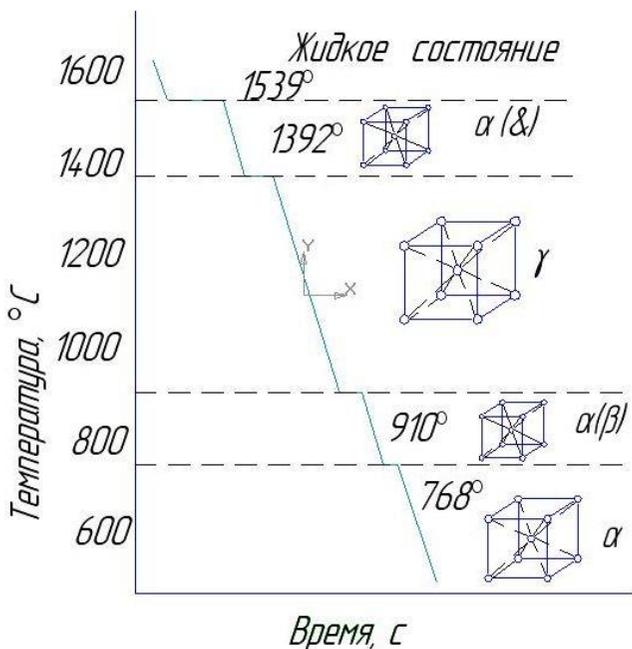


Рисунок 3.1 – Кривая охлаждения чистого железа

Компоненты и фазы в системе железо–углерод

Первым компонентом сплавов системы является железо в различных модификациях. Второй составляющей железоуглеродистых сплавов является углерод.

Углерод (графит) – неметаллический элемент, атомный номер 6, атомная масса 12; кристаллическая структура слоистая, расстояние между плоскостями 0,34 нм. Графит обладает очень низкой твердостью, прочностью, пластичностью (0,5–1,0%). Плотность 2,5 г/см³, температура плавления 3500°С. Его образование характерно для высокоуглеродистых сплавов при малых скоростях охлаждения.

Углерод может также соединяться с железом, образуя неустойчивое химическое соединение Fe₃C, называемое *цементитом*, которое может быть вторым компонентом в системе этих сплавов. Цементит содержит 6,67% углерода.

Анализ диаграмм состояния сплавов, компоненты которых образуют химические соединения, показывает, что каждое химическое соединение можно рассматривать как компонент. Диаграмма рассматривается по частям. Поэтому (при изучении диаграммы состояния железо – углерод) практически рассматривают только ту ее часть, которая заключена в пределах содержания углерода 0–6,67%. Это тем более правомерно, что сплавы железа с содержанием углерода более 5% в технике практически не используются.

Цементит тверд ($\cong 800$ НВ) и хрупок ($\delta \cong 0$), прочность его на растяжение невысока ($\sigma_b \cong 40$ МПа). Цементит в диаграмме состояния сплавов является и *компонентом*, и *фазой*. Образование цементита в сплавах железа с углеродом происходит при сравнительно высоких скоростях охлаждения. Если же сплав охлаждается медленно, то вероятно образование более стабильной фазы – графита (представляет собой углерод в чистом виде).

Диаграмма железо – цементит является диаграммой *метастабильного равновесия* системы Fe – Fe₃C. Если же условия охлаждения создают предпосылки для кристаллизации графита, то рассматривается диаграмма *стабильного равновесия* системы Fe – C, где вторым компонентом является графит. В условиях производства в результате ускоренного процесса кристаллизации обычно образуется цементит.

Углерод растворим в железе в жидком и твердом состоянии и образует с железом *твердые растворы внедрения*. Растворимость углерода в кристаллических решетках с объемно-центрированной кубической и гранецентрированной ячейками сильно различается,

что создает большие возможности для изменения механических свойств сплавов железа с углеродом посредством термической обработки. Твердые растворы углерода в кристаллической решетке железа представляют собой две различные фазы, вероятность существования которых определяется температурой и концентрацией.

Феррит – это твердый раствор внедрения углерода в α -железе. В диаграмме железо – углерод (рисунок 3.2) существование феррита возможно ниже линии *GSK*. Высокотемпературный феррит (δ -феррит) существует в зоне *ABIN*.

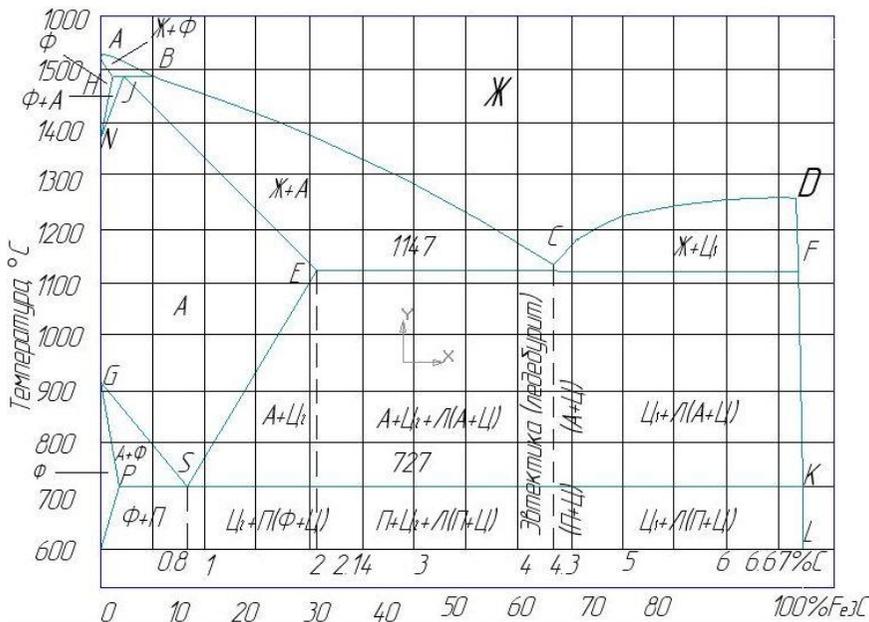


Рисунок 3.2 – Диаграмма состояния сплавов системы железо–цементит

Максимальная растворимость углерода в феррите не превышает 0,02%, минимальная (при комнатной температуре) – 0,006%. Соответственно, свойства феррита мало отличаются от свойств чистого железа: $80\text{--}100\text{ НВ}$; $\sigma_{\text{в}} = 250\text{ МПа}$; $\delta = 50\%$; $\Psi = 80\%$.

Аустенит – это твердый раствор углерода в γ -железе. Существование аустенита возможно в зоне *NHBCFKPG* (рисунок 3.2). Максимальная растворимость углерода в аустените достигает 2,14% при температуре 1147°C; минимальная – 0,8% С при 727°C; ниже 727°C

аустенит распадается. Растворенный углерод (как и другие примеси) упрочняет аустенит, механические свойства которого значительно выше, чем у феррита (например, 160–200 НВ).

Соответственно диаграмма сплавов железо – углерод имеет: два компонента (железо и цементит (графит));

пять фаз: жидкий сплав (Ж), цементит (Ц), графит (Гр.), феррит (Ф) и аустенит (А).

Анализ диаграммы состояния сплавов железо–цементит

Метастабильная диаграмма состояния Fe–Fe₃C объясняет превращения в сталях и белых чугунах и является основанием для выбора режимов термической обработки железоуглеродистых сплавов.

Каждая точка диаграммы состояния Fe–Fe₃C (рисунок 3.2) характеризует строго определенный состав сплава при соответствующей температуре и концентрации. Точка *A* (1539°C) отвечает температуре плавления железа, а точка *D* (1250°C) – температуре плавления цементита, точки *N* (1392°C) и *G* (910°C) соответствуют полиморфному превращению $\alpha \Leftrightarrow \gamma$ (рисунок 3.1), т. е. компонентам, а ординаты между ними – двойным сплавам. В системе Fe–Fe₃C возможны одна жидкая (Ж) и три твердые фазы (Ф, А, Ц).

Линия *ABCD* – линия *ликвидус*. Выше этой линии все железоуглеродистые сплавы находятся в жидком состоянии, представляющем собой жидкий раствор – жидкую фазу (Ж) (рисунок 3.2).

Линия *ANIECF* – линия *солидус*. Ниже этой линии все сплавы находятся в твердом состоянии. Все остальные линии ниже линии *солидус* отражают начало или конец фазовых превращений в твердом состоянии.

Горизонтальные линии отвечают трехфазным равновесным состояниям сплавов ($C = 2+1 - 3 = 0$).

Во всех сплавах с концентрацией $C > 0,02\%$ происходит *эвтектоидное* превращение при температуре 727°C (прямая *PSK*), заключающееся в распаде аустенита на дисперсную механическую смесь чередующихся пластинок Ф и Ц, которую называют *перлитом*. Цементит может образовываться при охлаждении из жидкой и твердой фаз. Цементит, образующийся из жидкой фазы, называется *первичным*, из аустенита – *вторичным*, из феррита – *третичным*.

В сплавах с содержанием углерода от 2,14 до 6,67% С при 1147°C (линия *ECF*) происходит *эвтектическое* превращение: из

жидкой фазы одновременно выпадают кристаллы А и Ц. Такая механическая смесь называется *ледебуритом*.

В сплавах с содержанием углерода от 0,1 до 0,5% С при 1499°С происходит *перитектическая* реакция (линия *НВ*), когда из жидкой фазы и феррита образуется аустенит.

Кристаллизация некоторых сплавов, содержащих различное количество углерода, изображена на рисунке 3.3.

Сплав 1, содержащий 0,6% углерода, начинает кристаллизоваться при температуре t_1 появлением первых кристаллов аустенита. На кривой охлаждения сплава 1 фиксируется точка перегиба, связанная с замедлением охлаждения сплава. Заканчивается кристаллизация при температуре t_2 . Структура закристаллизовавшегося сплава – аустенит (А).

Сплав 2, содержащий 0,8% углерода, кристаллизуется в интервале температур от t_5 до t_6 . Структура закристаллизовавшегося сплава – аустенит.

Сплав 3, содержащий 1,3% углерода, начинает кристаллизоваться при температуре t_7 . Первые кристаллы – это аустенит с содержанием углерода, соответствующим точке пересечения *коноды*, исходящей из точки t_7 , и линии *солидус*. При снижении температуры сплава доля закристаллизовавшегося аустенита повышается, содержание углерода в аустените изменяется соответственно линии солидус, содержание углерода в жидкой фазе изменяется соответственно линии *ликвидус*. При температуре t_8 содержание углерода в аустените соответствует точке 1, а содержание углерода в жидкой фазе – точке 2. Соотношение количества аустенита и жидкой фазы можно определить по обратному соотношению отрезков $1 - t_8$ и $t_8 - 2$. Заканчивается кристаллизация при температуре t_9 . Структура закристаллизовавшегося сплава – аустенит.

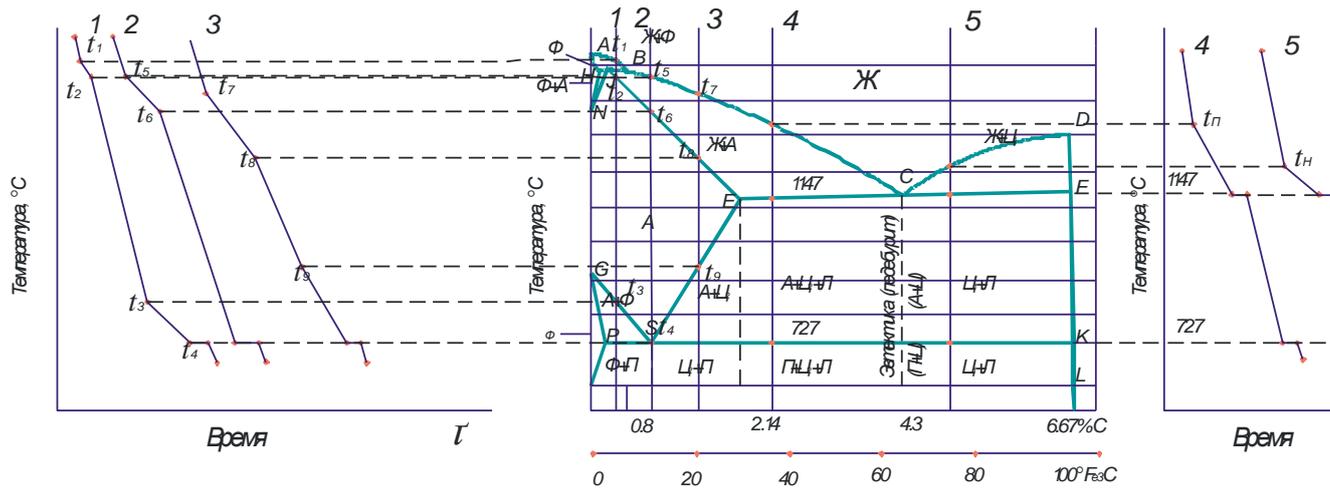


Рисунок 3.3 – Диаграмма состояния Fe-Fe₃C и кривые охлаждения сталей (а), чугунов (б)

Кристаллизация сплава 4, содержащего 2,5% углерода, начинается при температуре t_{11} с появлением кристаллов аустенита. При понижении температуры содержание углерода в жидкой фазе повышается. Например, при температуре t_{12} содержание углерода в жидкой фазе соответствует точке 4.

При достижении температуры t_{13} содержание углерода в жидкой фазе составляет 4,3%, что соответствует точке эвтектического превращения С. Поэтому оставшаяся часть жидкого сплава кристаллизуется при постоянной температуре $t_{13} = 1147^\circ\text{C}$ сразу в две твердые фазы: *аустенит* и *цементит*, механическая смесь которых представляет *ледебурит*. Структура закристаллизовавшегося сплава 4 – аустенит А и ледебурит Л (А + Ц).

Кристаллизация сплава 5, содержащего 5% углерода, начинается при температуре t_{14} выделением кристаллов цементита, который обычно называют первичным, отражая его появление из жидкой фазы. При понижении температуры доля твердой фазы (цементита) увеличивается, содержание углерода в жидкой фазе понижается. При этом содержание углерода в цементите не изменяется. При достижении температуры t_{15} содержание углерода в жидкой фазе составляет 4,3%. Оставшаяся часть жидкого сплава имеет эвтектическую концентрацию и кристаллизуется при постоянной температуре. На кривой охлаждения 5 это отражается образованием горизонтальной площадки. Структура закристаллизовавшегося сплава – цементит Ц, и ледебурит Л (А + Ц).

Ледебурит – это эвтектика, механическая смесь двух твердых фаз: аустенита и цементита. Ледебурит имеет либо зернистое, либо пластинчатое строение и характеризуется высокой хрупкостью. Механические свойства ледебурита: 500–600 НВ; $\sigma_{\text{в}} = 1000 \text{ МПа}$; $\delta = 1 - 2\%$.

Железоуглеродистые сплавы, имеющие в своей структуре ледебурит, обладают низкими пластическими свойствами, их трудно деформировать. Ледебурит в структуре сплавов появляется при содержании углерода 2,14%. Эта граница (точка *E*) является границей раздела железоуглеродистых сплавов на две большие группы: стали и чугуны.

Стальями называются сплавы железа с углеродом, в которых содержание углерода не превышает 2,14%.

Чугунами называются сплавы железа с углеродом, в которых содержание углерода превышает 2,14%.

Стали являются деформируемыми сплавами. Они подвергаются ковке, прокатке, штамповке и т. д. Чугуны деформации, как прави-

ло, не подвергаются, зато они обладают хорошими литейными свойствами, т. к. в их структуре есть эвтектика.

Структурные и фазовые превращения в железоуглеродистых сплавах. Диаграмма состояния железо–графит

Фазовые и структурные изменения в железоуглеродистых сплавах связаны с полиморфизмом железа и изменением растворимости углерода в аустените и феррите с понижением температуры (таблица 3.1).

Диаграмма состояния сплавов железо – цементит (метастабильное равновесие). Понижение температуры сплава 1 (0,6% C) (рисунок 3.3) не меняет фазового и структурного состава до тех пор, пока температура не достигнет t_3 . t_3 – место пересечения с линией GS , верхней границей существования феррита. При температуре t_3 начинается перекристаллизация аустенита в феррит, которая продолжается при снижении температуры до t_4 . Образующийся феррит имеет содержание углерода в соответствии с точками на линии GP , поэтому в оставшейся части аустенита содержание углерода за счет его диффузии непрерывно повышается в соответствии с линией GS . При достижении температуры t_4 образование зерен феррита прекращается, оставшаяся часть аустенита, имеющая содержание углерода 0,8%, перекристаллизуется в *перлит* – механическую смесь двух твердых фаз: феррита и цементита.

Такое превращение ($A \Rightarrow \Phi + \Pi$) называется *эвтектоидным*. Основное отличие эвтектоидного превращения от эвтектического заключается в том, что исходной фазой является твердая фаза, в данном случае аустенит. В соответствии с правилом фаз Гиббса система *нонвариантна* ($C = 2 + 1 - 3 = 0$), т. е. процесс происходит при постоянной температуре. На кривой охлаждения при температуре t_4 фиксируется горизонтальная площадка.

После полной перекристаллизации сплав охлаждается. Структура сплава – феррит (Φ) и перлит (Π). Фазовый состав – феррит (Φ) и цементит (Π) (таблица 3.2).

Сплав 2 (0,8% C) в твердом состоянии охлаждается до температуры 727°C. В точке S происходит распад аустенита на феррит и цементит. В результате эвтектоидного превращения образуются зерна *перлита*, состоящего из пластинок феррита и цементита. Структура – перлит (Π). Фазовый состав – феррит (Φ) и цементит (Π) (таблица 3.2).

Сплав 3 (1,3% С) в твердом виде охлаждается до температуры t_{10} . Линия SE – линия предельной растворимости углерода в аустените. В сплаве 3 при достижении этой линии (температура t_{10}) из аустенита по границам зерен начинает образовываться цементит, который называют вторичным. Выделение цементита происходит до температуры 727°C . При этой температуре оставшийся аустенит содержит 0,8% углерода и перекристаллизовывается в перлит. Структура сплава 3 при комнатной температуре – перлит (П) и цементит (Ц). Фазовый состав – феррит (Ф) и цементит (Ц).

Сплав 4 (2,5% С) в твердом виде равномерно охлаждается до температуры 727°C с выделением вторичного цементита. При этой температуре происходит перекристаллизация $A + \text{Ц}_2 + \text{Л}(A + \text{Ц}_1) \Rightarrow \text{П}(\text{Ф} + \text{Ц}) + \text{Ц}_2 + \text{Л}(\text{П} + \text{Ц}_1)$. Структуры сплава при комнатной температуре – перлит (П), цементит (Ц) и ледебурит (Л). Фазовый состав – феррит (Ф) и цементит (Ц).

Сплав 5 (5,0% углерода) в твердом виде охлаждается до температуры 727°C , при которой происходит перекристаллизация $\text{Ц}_1 + \text{Л}(A + \text{Ц}) \Rightarrow \text{Ц}_1 + \text{Л}(\text{П} + \text{Ц})$. Структура сплава – цементит (Ц) и ледебурит (Л). Фазовый состав – феррит (Ф) и цементит (Ц) (таблица 3.2).

Таблица 3.1– Фазовые превращения по линиям на диаграмме Fe–Fe₃C

Обозначение линий	Интервал температур, °C	Фазовые превращения на линиях (при охлаждении)	Перечень фаз	Кол-во фаз	Число степеней свободы
	910–727	Начало выделения Ф из А	А + Ф	2	1
<i>GP</i>	910–727	Конец выделения Ф из А	А + Ф	2	1
<i>PS</i>	727	Конец выделения Ф из А и образование П из А	А + Ф + Ц	3	0
<i>PSK</i>	727	Образование П из А	А + Ф + Ц	3	0

Продолжение таблицы 3.1.

Обозначение линий	Интервал температур, °С	Фазовые превращения на линиях (при охлаждении)	Перечень фаз	Кол-во фаз	Число степеней свободы
<i>SE</i>	727–1147	Начало выделения Ц_2 из А	А + Ц	2	1
<i>SK</i>	727	Конец выделения Ц_2 из А и образование П из А	А + Ф + Ц	3	0
<i>PQ</i>	727 – 0	Начало выделения Ц_3 из Ф	Ф + Ц	2	1

Таблица 3.2 – Структурные и фазовые превращения в железоуглеродистых сплавах

№ сплава	Содержание углерода, %	Структура кристаллизующегося сплава (из жидкой фазы)	Структура сплава в твердом состоянии	Фазовый состав
1	0,6	А	Ф + П(Ф + Ц)	Ф + Ц
2	0,8	А	П(Ф + Ц)	Ф + Ц
3	1,3	А	П(Ф + Ц) + Ц	Ф + Ц
4	2,5	А + Л(А + Ц)	П(Ф+Ц)+Ц+Л(П+Ц)	Ф + Ц
5	5,0	Ц + Л(А + Ц)	Ц + Л(П + Ц)	Ф + Ц

Диаграмма состояния сплавов железо–графит (стабильное равновесие). Образование стабильной фазы графита в чугунах может происходить при медленном охлаждении (в результате непосредственного его выделения из жидкого раствора или вследствие распада предварительно образовавшегося цементита).

Диаграмма состояния стабильного равновесия сплавов железо – графит показана на рисунке 3.4 (штриховые линии соответствуют выделению графита, сплошные линии – цементита).

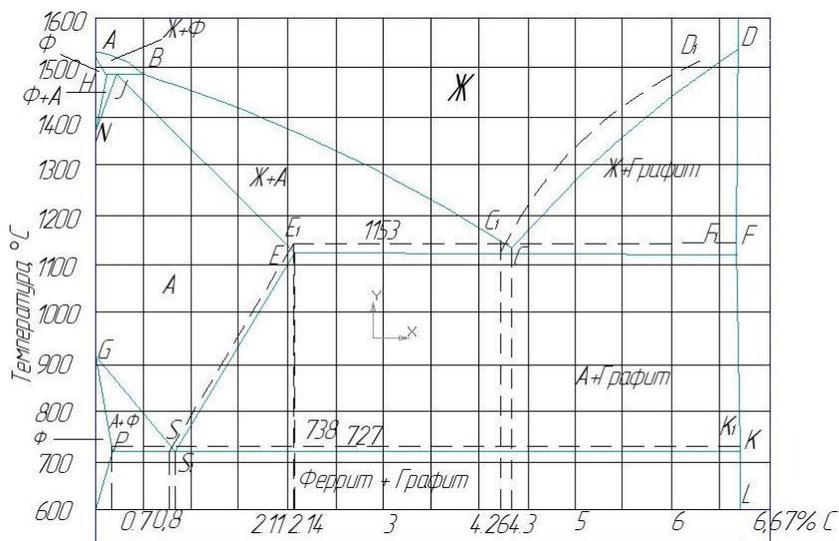


Рисунок 3.4 – Диаграмма состояния сплавов системы железо–углерод

При температурах, соответствующих линии S^1D^1 , кристаллизуется первичный графит. При температуре 1153°C и концентрации углерода 4,26 % образуется *графитная эвтектика*: аустенит и графит.

По линии E^1S^1 выделяется вторичный графит, а при 738°C (линия S^1K^1) образуется *эвтектоид*, состоящий из феррита и графита.

Если при кристаллизации чугуна выделяется только графит, то чугун называют *серым*, если только цементит – *белым*. При наличии в структуре чугуна графита и цементита чугун называют *половинчатым*.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите компоненты в железоуглеродистых сплавах.
2. Перечислите основные свойства железа.
3. Дайте определение цементита и укажите его свойства.
4. Для чего используется диаграмма состояния железо–цементит?
5. Дайте определение перлита.
6. Дайте определение ледебурита.
7. Дайте определение аустенита.
8. Назовите фазы в железоуглеродистых сплавах.

9. Сколько углерода содержится в цементите, аустените, феррите?
10. Укажите содержание углерода в перлите, ледебурите.
11. Укажите зависимость между пределом прочности и твердости стали (по Бринеллю).
12. Перечислите свойства цементита, феррита, аустенита.
13. На диаграмме Fe–Fe₃C для сплава с содержанием 2,5% С при температуре 1200°C определите состав и количественное соотношение фаз.
14. Постройте кривую охлаждения железоуглеродистого сплава с 3% С, используя диаграмму Fe–Fe₃C и правило фаз.

Тема 4 Углеродистые стали и чугуны. Легированные стали

Углеродистые стали

Общие сведения

Основная продукция черной металлургии – стали, причем 90% выпускаемых сталей – углеродистые, а 10% – легированные.

Сталь – сплав железа с углеродом, содержание углерода (С) в котором не превышает 2,14%. Сталь является многокомпонентным сплавом, содержащим кроме углерода ряд постоянных или неизбежных примесей (Mn, Si, S, P, O, N, H и других), которые оказывают влияние на его свойства.

Углеродистая сталь промышленного производства – сложный по составу сплав. Кроме железной основы (97,0–99,8%), имеется много элементов, наличие которых обусловлено:

технологией производства (марганец, кремний);
невозможностью полного их удаления (сера, фосфор, кислород, азот, водород);

другими обстоятельствами (хром, никель, медь и т. д.).

Количество примесей в сталях ограничивается ГОСТами:

марганца – до 0,8%;

кремния – до 0,5%;

вредных (серы и фосфора) – менее 0,05%.

Механические свойства сталей зависят от их структуры и состава. Возможными способами улучшения (повышения) механических свойств являются:

- увеличение содержания углерода;
- легирование;
- измельчение зерна;
- наклеп (нагартовка);
- изменение структурных составляющих путем термической обработки.

Однако всякое упрочнение (кроме измельчения зерна) снижает вязкость, повышает *порог хладноломкости* – интервал температур, при которых металл из вязкого состояния переходит в хрупкое.

Влияние углерода

Важнейший и основной элемент в сталях – углерод (специально вводимый и оказывающий существенное влияние на свойства сталей). С

увеличением содержания углерода (и даже при его незначительном изменении) повышается прочность, твердость, снижается пластичность, ударная вязкость. Повышение содержания углерода оказывает влияние на технологические свойства стали (ковкость, свариваемость и обрабатываемость уменьшаются, литейные свойства увеличиваются).

С увеличением содержания углерода изменяется структура стали:
 сталь с 0,8% углерода состоит из одного перлита (П);
 больше 0,8% – кроме перлита имеется вторичный цементит (Ц);
 меньше 0,8% – структура состоит из феррита и перлита.

Существенно влияет на структуру и свойства стали термическая обработка.

Изменение соотношения в структуре стали пластичной (феррит) и твердой (цементит) фаз с увеличением содержания углерода (рисунок 4.1) является причиной повышения прочностных (σ_0 , $\sigma_{0,2}$, НВ) и снижения пластических (δ , Ψ) свойств. При содержании углерода больше 1,0–1,2% твердость стали в отожженном состоянии возрастает, а предел прочности уменьшается. Это объясняется выделением по границам бывшего зерна аустенита вторичного цементита. При испытании на растяжение образовавшийся вокруг зерен перлита каркас из цементита разрушается, приводя к снижению предела прочности.

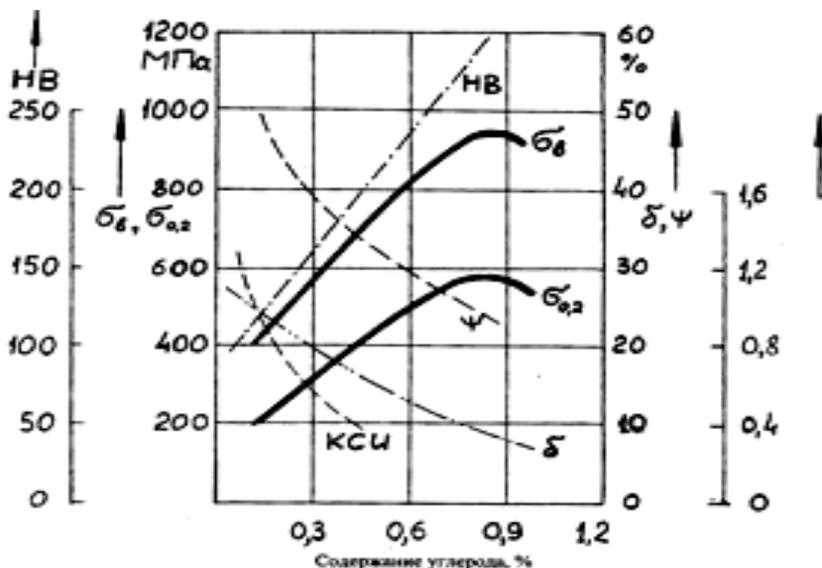


Рисунок 4.1 – Влияние углерода на механические свойства стали

Микроструктуры технически чистого железа и углеродистых сталей характеризуются левой нижней частью диаграммы состояния железо – цементит. Сплавы с содержанием до 0,02% углерода называются технически чистым железом; от 0,02 до 0,8% С – *доэвтектоидными* сталями; с содержанием 0,8% С – *эвтектоидной* сталью; с содержанием более 0,8% – *заэвтектоидными* сталями.

Микроструктура доэвтектоидной стали состоит из феррита и перлита (рисунок 4.2).

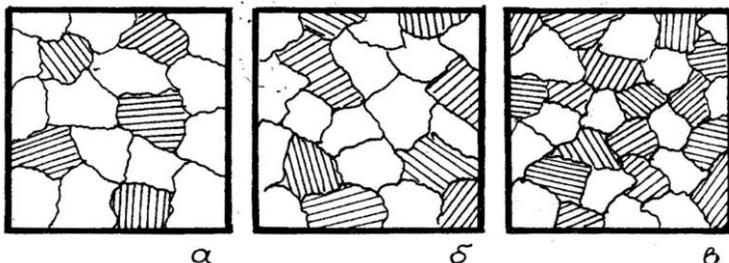


Рисунок 4.2 – Схемы микроструктур стали с разным содержанием углерода: а) 0,25% С; б) 0,40% С; в) 0,60% С

В доэвтектоидной стали после травления феррит выявляется в виде светлых полей, а перлит – в виде полей полосчатого строения. Микроструктура эвтектоидной стали, состоит только из перлита (рисунок 4.3). Перлит – это структурная составляющая, состоящая из двух фаз: феррита и цементита.

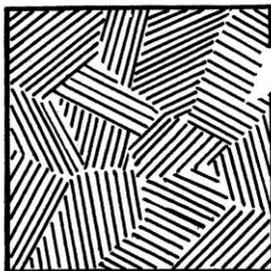


Рисунок 4.3 – Схема микроструктуры эвтектоидной стали с 0,8% углерода

Заэвтектоидная сталь имеет структуру, состоящую из перлита и вторичного цементита (рисунок 4.4). В результате медленного охлаждения заэвтектоидная сталь имеет структуру перлита и сетки цементита. Белая сетка – вторичный цементит, а внутри сетки зерна пластинчатого строения – перлит. Чем больше углерода в заэвтектоидной стали, тем более широкой получается цементитная сетка.

Более низкие механические свойства имеет сталь со структурой «пластинчатый перлит», более высокие – со структурой «зернистый перлит». Такая структура (смесь зерен цементита в ферритной основе (рисунок 4.5) может быть получена как для эвтектоидной, так и для заэвтектоидной стали отжигом на «зернистый перлит».

Сталь со структурой зернистого перлита имеет более высокую прочность, чем сталь такого же химического состава, но имеющая в структуре перлит с сеткой цементита.

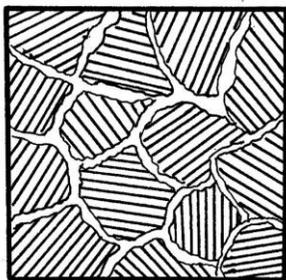


Рисунок 4.4 –Схема микроструктуры заэвтектоидной стали

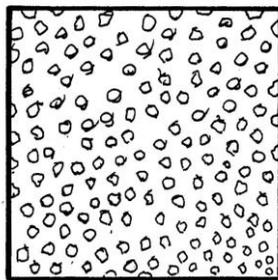
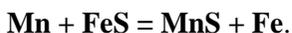
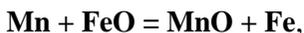


Рисунок 4.5 –Схема микроструктуры заэвтектоидной стали после отжига на зернистый перлит

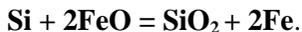
Влияние примесей

МАРГАНЕЦ. Марганец вводят для раскисления стали с целью устранения вредного влияния закиси железа, а также твердых соединений сернистого железа по следующим реакциям:



В структуре он не обнаруживается, растворяется в Ф и Ц. Повышает прочность стали. Его содержание 0,5 – 0,8%.

КРЕМНИЙ. Вводится также для раскисления:



Действие кремния аналогично влиянию марганца. Он структурно не обнаруживается, т. к. полностью растворяется в Ф и П, повышает прочность сталей. Содержание кремния не более 0,35–0,40%.

ФОСФОР. Фосфор попадает в металл из руды, топлива и флюсов, частично удаляется при выплавке стали. Фосфор (при бессемеровском процессе) остается в стали до содержания 0,07–0,12%, что и в исходном чугуна. В результате мартеновского способа выплавки стали в основных печах содержание фосфора остается на уровне 0,02 – 0,04%, а электропечах – менее 0,02%. Фосфор растворяется в Ф, снижая его пластичность и повышая температуру перехода в хрупкое состояние, что вызывает **хладноломкость** сталей.

В отдельных случаях содержание фосфора желателно, так как улучшает обрабатываемость стали резанием, а в присутствии меди повышает сопротивление коррозии. Уменьшить содержание фосфора до 0,01% металлургическими приемами довольно трудно. Это достигается использованием чистой исходной шихты.

СЕРА. Сера попадает в сталь, главным образом, из руды и печных газов (SO_2). В основном мартеновском процессе и выплавке в электропечи сера удаляется из стали ($\text{S} = 0,04\text{--}0,05\%$). Наибольшее содержание серы при бессемеровском процессе – 0,06%. Для высококачественной стали содержание серы не должно превышать 0,02–0,03%. Сера нерастворима в железе. Любое количество серы с железом образует сульфид железа, который входит в состав легкоплавкой и хрупкой эвтектики (988°C). Она делает сталь хрупкой при 800°C , что называется **красноломкостью**. Введение марганца в сталь уменьшает вредное влияние серы. Сталь с повышенным содержанием серы не подвергается горячей обработке металлов давлением.

ГАЗЫ. Водород, азот, кислород содержатся в сталях в небольших количествах, зависящих от способа выплавки. Азот и кислород присутствуют в виде хрупких неметаллических включений – окислов, нитридов (например, FeO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_4N и др.) как твердые растворы или в свободном виде. Примеси внедрения (азот, кислород), концентрируясь по границам зерен в виде нитридов и оксидов, повышают порог хладноломкости, понижают сопротивление хрупкому разрушению и предел вы-

носливости стали. Очень вреден водород, который увеличивает хрупкость стали. Поглощенный при выплавке стали, водород приводит к образованию в заготовках и поковках флокенов (очень тонких трещин).

Радикальный метод борьбы с газонасыщенностью – выплавка и разливка стали в вакууме. Хрупкие неметаллические включения ухудшают характеристики физико-механических свойств сталей.

Классификация сталей

Классификация сталей производится по способу производства, по химическому составу, по назначению и по качеству (рисунок 4.6).

По способу производства сталь подразделяют на *конверторную*, *мартеновскую* и *электросталь*. Электросталь является наиболее чистой как по содержанию вредных примесей, так и по газовым и неметаллическим включениям. Этим способом выплавляют наиболее ответственные высококачественные марки углеродистой и легированной стали.

В зависимости от *способа раскисления* жидкой стали в плавильном агрегате ее различают как *спокойную (сп)*, т. е. полностью раскисленную марганцем, кремнием и алюминием; *полуспокойную (пс)*, раскисленную марганцем и кремнием; *кипящую (кп)*, раскисленную только марганцем. Кипящая сталь (0,05–0,07% Si) недостаточно раскислена (Si или Mn). В ней содержится повышенное количество FeO. Кипящие стали более дешевые, склонны к хладноломкости и хуже свариваются, но обладают высокой пластичностью, хорошо подвергаются вытяжке в холодном состоянии.

По химическому составу стали классифицируются на *углеродистые* и *легированные*.

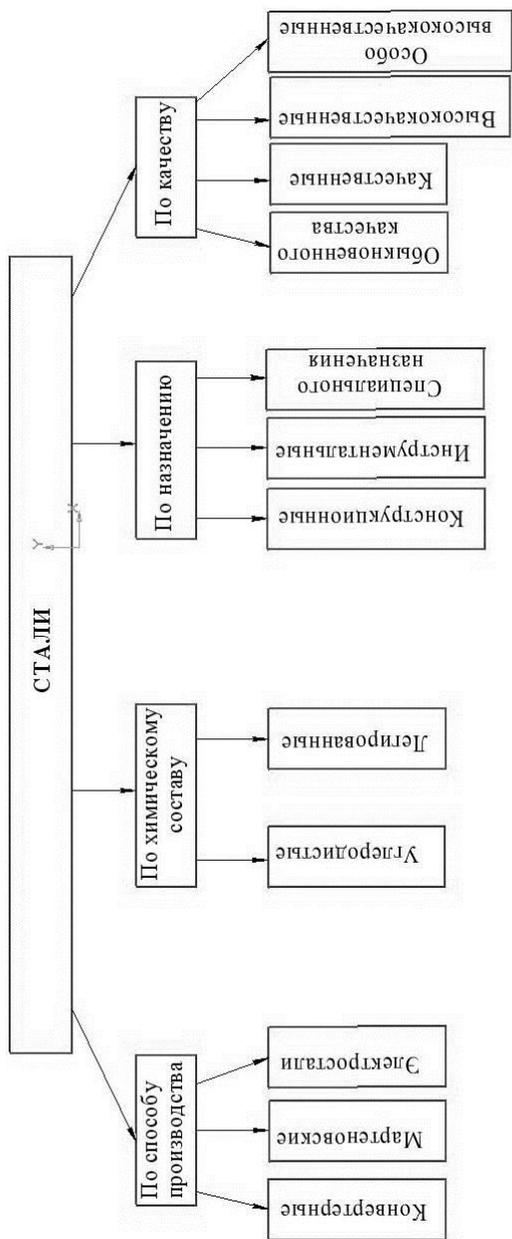


Рисунок 4.5 - Общая классификация сталей

Углеродистая сталь – сплав железа с углеродом до 2,14% с постоянными примесями: марганца (до 0,8%), кремния (до 0,5%), серы (до 0,06%), фосфора (до 0,07%) и газов (кислорода, водорода, азота), присутствующих в тысячных долях процента.

Углеродистые стали в зависимости от содержания углерода подразделяются на низкоуглеродистые (до 0,25% С), среднеуглеродистые (0,25–0,60% С) и высокоуглеродистые (свыше 0,60% С).

Легированными называют стали, в состав которых (кроме железа, углерода и постоянных примесей) входят специально введенные легирующие элементы: хром, никель, молибден, вольфрам и т. д. – для придания стали требуемых свойств. Сталь также будет считаться легированной, если содержание в ней кремния превысит 0,5%, а марганца – 1,0%.

В зависимости от содержания легирующих элементов различают стали:

- низколегированные (суммарное содержание легирующих элементов до 2,5%);
- среднелегированные (2,5–10%);
- высоколегированные (более 10%).

По назначению стали классифицируют на *конструкционные, инструментальные и специального назначения* (с особыми свойствами).

Конструкционные стали (0,05–0,70% С) применяют в машиностроении и строительстве для изготовления деталей машин, элементов конструкций и сооружений. Важнейшими характеристиками сталей, по которым осуществляется их выбор, являются механические свойства.

Среди конструкционных сталей различают *цементуемые, улучшаемые, высокопрочные, автоматные, рессорно-пружинные, подшипниковые* и некоторые другие.

Инструментальные стали (0,7–1,3% С) служат для изготовления режущих, измерительных инструментов, штампов холодного и горячего деформирования. Основным требованием, предъявляемым к инструментальным сталям, является их высокая твердость, а, следовательно, износостойкость.

Стали специального назначения делятся на две группы:

- с особыми химическими свойствами;
- с особыми физическими свойствами.

Конструкционные и инструментальные стали могут быть как углеродистыми, так и легированными, а стали специального назначения – только легированными.

По качеству стали подразделяют на стали:

- обыкновенного качества;
- качественные;
- высококачественные;
- особо высококачественные.

Качество стали определяется степенью однородности химического состава и строения, природой и содержанием неметаллических включений, газонасыщенностью и некоторыми другими факторами.

Основным показателем, лежащим в основе классификации сталей по качеству, является содержание вредных примесей – серы и фосфора. Чем меньше указанных примесей, тем выше качество.

Стали обыкновенного качества являются только углеродистыми, качественные и высококачественные – углеродистыми и легированными, а особо высококачественные – только легированными.

Конструкционные углеродистые стали обыкновенного качества (ГОСТ 380–94)

Углеродистые стали обыкновенного качества являются наиболее дешевыми, выплавляются по нормам массовой технологии. В них допускается повышенное содержание вредных примесей ($S \leq 0,05\%$, $P \leq 0,04\%$), а также газонасыщенность и загрязненность неметаллическими включениями.

Эти стали предназначены для изготовления горячекатаного проката: сортового, фасонного, листового. Сталь углеродистая обыкновенного качества широко применяется в строительстве и машиностроении для изготовления неотчетственных сварных, клепаных и болтовых конструкций, реже – малонагруженных деталей машин (валы, оси, шестерни). Стали маркируют сочетанием букв «Ст» и цифрами от 0 до 6, указывающими номер марки. С увеличением цифры возрастает содержание углерода в стали. Углеродистые стали обыкновенного качества получают следующих марок (таблица 4.1).

Таблица 4.1– Конструкционные углеродистые стали
обыкновенного качества (ГОСТ 380–94)

Марка стали	Ст0	Ст1	Ст2	Ст3	Ст4	Ст5	Ст6
Содержание углерода, %	0,23	0,06–0,12	0,09–0,15	0,14–0,22	0,18–0,27	0,28–0,37	0,28–0,49
Содержание марганца, %	–	0,25–0,50	0,25–0,50	0,30–0,65	0,4–0,7	0,5–0,8	0,5–0,8

Стали обыкновенного качества в зависимости от степени раскисления могут быть кипящие (кп), полуспокойные (пс), спокойные (сп). Цифры в их маркировке не указывают на содержание углерода.

Конструкционные углеродистые стали качественные (ГОСТ 1050–88)

Углеродистые качественные конструкционные стали маркируются по содержанию углерода в сотых долях: 08, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75. Они могут быть с обычным и повышенным содержанием марганца (обозначаются буквой Г в конце марки), содержанием серы не более 0,04%, фосфора – не более 0,035%.

Стали 08, 10кп, 15кп – пластичные, не подвергаются термической обработки. Применяются для листовой холодной штамповки, вытяжки. Все кузовные детали грузовых, легковых автомобилей изготавливаются из данных марок стали.

Стали 10, 15, 20, 25 – цементируемые стали. Применяются для деталей, требующих твердости и износостойкости поверхности детали (при сохранении вязкой сердцевины).

Стали 35, 40, 45, 50 — улучшаемые стали для изготовления валов, осей, втулок, шестерен, шатунов, поршневых пальцев, требующих высокой прочности при удовлетворительной вязкости.

Стали 55, 60, 55Г, 60Г – пружинно-рессорные (для деталей высокой прочности и упругости). После закалки и отпуска наилучшие механические свойства у сталей 55Г, 60Г.

Стали 65, 70, 75, 65Г, 70Г, 75Г – для деталей, требующих высокой износоустойчивости при абразивном изнашивании (долота, лемеха, лапы культиваторов, диски посевных и почвообрабатывающих машин). Наилучшие механические свойства у сталей 65Г, 70Г, 75Г.

Инструментальные углеродистые стали (ГОСТ 1435–90)

Инструментальные углеродистые стали выпускаются качественными (содержание серы не более 0,028%, фосфора < 0,030%) или высококачественными (содержание серы не более 0,018%, фосфора < 0,025%). В марке буква «У» обозначает углеродистую сталь, буква «А» – высококачественную. Цифры показывают среднее содержание углерода в десятых долях процента.

Качественные инструментальные стали – У7, У8, У9, У10, У11, У12, У13.

Высококачественные углеродистые стали – У7А, У8А, У9А, У10А, У11А, У12А, У13А

Примерное назначение:

У7, У8, У9, У7А, У8А, У9А — для инструмента по обработке дерева, зубила, долота;

У10, У11, У10А, У11А – для изготовления мелких сверл, фрез, метчиков, разверток;

У12, У13, У12А, У13А – для инструментов с максимальной износостойкостью, напильников, граверных инструментов.

Углеродистые специальные стали

Различают нагартованные, листовые для холодной штамповки, автоматные и другие углеродистые стали специального назначения.

Нагартованная сталь применяется для изготовления изделий прокаткой, волочением, прессованием в холодном состоянии. В результате такой обработки металл получает нагартовку (наклеп) с высокой степенью обжатия – деформации (96–97%). Обычно применяется сталь с 0,6–0,8% углерода для изготовления проволоки с прочностью 180–300 кгс/мм². Используется для канатов, тросов, металлокорда (поставляется с металлургических заводов).

Листовая сталь для холодной штамповки должна обладать большой пластичностью, что характерно для сталей с малым содержанием углерода (05, 05кп, 08кп, 08, 10, 10кп). Для особо сложной штамповки содержание углерода ограничивается 0,08%. Существенно ограничение содержания других постоянных примесей (марганца, кремния, серы, фосфора). При 0,2–0,3% содержания углерода можно производить лишь гибку и незначительную вытяжку стали. Для глубокой вытяжки применяют низкоуглеродистую кипящую сталь марки 08 кп.

Автоматные стали применяются для изготовления деталей на станках-автоматах, в основном, обработкой резанием. Поэтому важным является улучшение обрабатываемости стали, которая существенно зависит от ее состава и структуры. Удовлетворительной взаимосвязи между обрабатываемостью и механическими свойствами стали не установлено, но повышение твердости или прочности снижает ее обрабатываемость. Лучше обрабатывается резанием крупнозернистая сталь. Доэвтектоидные стали хорошо обрабатываются при структуре Ф + пластинчатый П; эвтектоидные и заэвтектоидные ста-

ли – при структуре, включающей зернистый П. Снижение обрабатываемости происходит с увеличением содержания углерода.

Стали с содержанием фосфора и серы способствуют получению лучше обработанной поверхности деталей, повышению стойкости инструмента, а также образованию ломкой мелкой стружки. Для изготовления малоответственных деталей, не работающих при больших нагрузках, применяют автоматные, низкоуглеродистые стали с повышенным содержанием серы и фосфора: А12, А20, А30 и др. Цифра показывает среднее содержание углерода в сотых долях (серы – до 0,2%, фосфора – до 0,15%).

Отрицательные свойства автоматных сталей:

- малая сопротивляемость коррозии;
- пониженная динамическая прочность.

Имеются и другие элементы, содержание которых в стали улучшает обрабатываемость (например, селен, теллур).

Чугуны

Классификация чугунов

Чугун – это сплав железа с углеродом, при содержании углерода свыше 2,14% С и наличием постоянных примесей. На практике применяют чугуны с содержанием углерода в пределах 2,5–4,5%. По сравнению со сталью они обладают лучшими литейными свойствами, дешевле, но практически не подвергаются пластической деформации (обработке давлением).

По назначению чугуны разделяют на:

передельные (85–90% от всего объема производства);

литейные (9–12%);

специальные (рисунок 4.7).

В зависимости от того, в каком виде углерод находится в чугунах, его разделяют на

белый – углерод находится в связанном состоянии (в виде цементита Fe_3C);

серый – углерод находится в свободном состоянии (в виде графита);

половинчатый (отбеленный) – углерод может быть в виде графита и цементита.

По форме включений графита серые чугуны подразделяют на **серый** обычный с пластинчатым графитом (СЧ), **ковкий** с хлопьевидным графитом (КЧ), **высокопрочный** с шаровидным графитом (ВЧ).

Влияние примесей на структуру и свойства чугунов

На структурообразование чугуна влияет скорость охлаждения и количество элементов, способствующих **графитизации** – процессу образования графитных включений. Наличие графитовых включений является характерной особенностью серых чугунов.



Рисунок 4.7 – Классификация чугунов

Кремний повышает механические свойства чугуна при концентрации не более 3,0–3,5%. При более высокой концентрации кремния включения графита становятся грубыми, пластичность чугуна снижается.

Марганец увеличивает растворимость углерода в чугуне. При содержании более 0,5% он повышает склонность чугуна к отбеливанию. Увеличение содержания марганца повышает усадку, что способствует образованию трещин и внутренних напряжений. Основное назначение марганца в чугуне – нейтрализация вредного влияния серы.

Сера – наиболее нежелательная примесь в чугуне. Ее влияние определяется формированием по границам зерен хрупкой тройной эвтектики. При повышении содержания серы жидкотекучесть чугуна ухудшается, усадка и склонность к образованию трещин повышается.

Фосфор не оказывает существенного влияния на графитизацию. Фосфор сильнее других элементов повышает жидкотекучесть чугуна. Влияние фосфора на механические свойства чугуна отрицательные: способствует снижению ударной вязкости, повышает склонность к образованию холодных трещин.

Белые чугуны

Белые чугуны – это чугуны, в которых углерод находится в связанном состоянии, в виде цементита. Они очень твердые и хрупкие, плохо обрабатываются режущим инструментом. Отливки из белого чугуна применяются редко.

По структуре белые чугуны подразделяются (рисунок 4.8) на доэвтектические (перлит + цементит + ледебурит); эвтектические (ледебурит); заэвтектические (цементит + ледебурит).

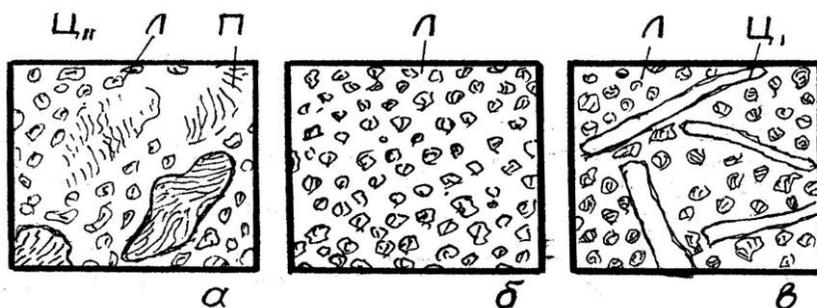


Рисунок 4.8 – Схемы микроструктур белого чугуна:
а – доэвтектического, б – эвтектического, в – заэвтектического

Серые чугуны

Серые чугуны (ГОСТ 1412–85) – это чугуны, в которых углерод находится в свободном состоянии, в виде графита. В серых чугунах графитовые включения находятся в металлической основе (матрице).

Разновидности структуры матрицы:

феррит, феррит + перлит, перлит (в зависимости от содержания углерода и условий кристаллизации отливок (рисунок 4.9)).

Серый обычный чугун имеет графитные включения пластинчатой формы.

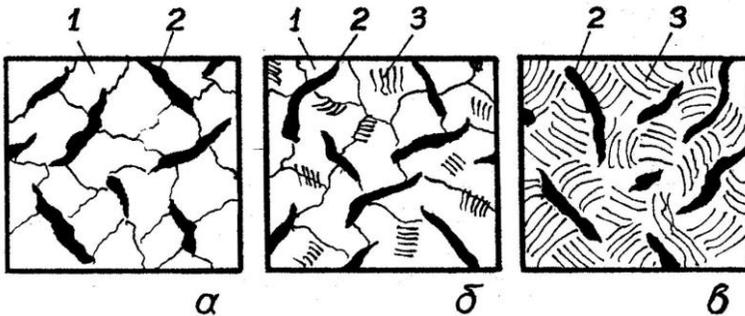


Рисунок 4.9 – Схемы микроструктур серого чугуна:

а) – ферритный; б) – феррито-перлитный; в) – перлитный;

1 – феррит; 2 – пластинчатый графит; 3 – перлит

Серый обычный чугун (благодаря меньшей в сравнении со сталью температурой плавления и наличием в структуре графита) обладает лучшими литейными свойствами. Он имеет хорошую жидкотекучесть и малую усадку. Наличие графита делает его хрупким, так как графитные включения нарушают однородность металлической основы. Их можно рассматривать как готовые трещины в прочной металлической основе чугуна. Низкая пластичность серого чугуна практически не зависит от характера металлической основы. Чугун с перлитной основой более прочен и износоустойчив. Отливки из серого чугуна с пластинчатым графитом составляют до 80% общего объема чугунолитейного литья. Серый обычный чугун – один из наиболее распространенных литейных сплавов. Он маркируется буквами СЧ и цифрами, указывающими предел прочности при растяжении на 0,1 МПа.

Механические свойства серых чугунов зависят от их химического состава. Обычно они содержат 3,0–3,7% С и 1,2–2,6% Si при

условии $C + Si/3 = 4,3$. При этом серый чугун будет иметь эвтектического состав и обладать хорошими технологическими свойствами. Для получения чугуна с высокой прочностью необходимо уменьшить суммарное содержание углерода и кремния при некотором увеличении содержания марганца.

Прочностные свойства серого чугуна при испытании на сжатие значительно лучше, чем при испытании на растяжение и изгиб. Это объясняется концентрацией напряжений возле пластинок графита.

Серый чугун с пластинчатым графитом имеет очень низкую пластичность. Механические свойства чугуна определяются соотношением структурных составляющих – главным образом феррита, перлита и графита. Особенно значительную роль играют количество, форма, размеры и характер распределения включений графита. Включения графита снижают прочность чугуна за счет уменьшения эффективной площади поперечного сечения. Кроме того, они играют роль внутренних концентраторов напряжений. Наряду с этим наличие графита в структуре чугуна обеспечивает такие его качества, как высокую циклическую вязкость и низкую чувствительность к внешним надразам. Серый обычный чугун является основным конструкционным материалом для изготовления базовых отливок (СЧ10, СЧ15 – малоответственные части сельскохозяйственных, текстильных, швейных машин, станочное литье, радиаторы; СЧ18, СЧ20 – ответственные части тракторов, автомобилей, станков, крупные шкивы и маховики; СЧ25, СЧ30 – отливки для дизелестроения, блоки автомобильных цилиндров, поршневые кольца; СЧ30, СЧ35 – дизельные цилиндры, коленчатые и кулачковые валы, штампы и другие тяжело нагруженные отливки), работающих в условиях знакопеременных нагрузок и вибраций.

Высокопрочные чугуны

Высокопрочным называется чугун с содержанием шаровидной формы графита. Его получают введением в жидкий серый обычный чугун модификаторов (Mg, Ce, Li и др.). Матрица высокопрочного чугуна может быть ферритной, ферритно-перлитной и перлитной (рисунок 4.10). В последнее время они получают все большее применение, особенно взамен ковкого и серого чугунов. Рекомендуемый состав – 2,7–3,7 % C, 0,5–3,8 % Si. Выбирается в зависимости от толщины стенок отливок.

Высокопрочные чугуны маркируются буквами ВЧ и цифрами, указывающими предел прочности при растяжении 0,1 МПа.

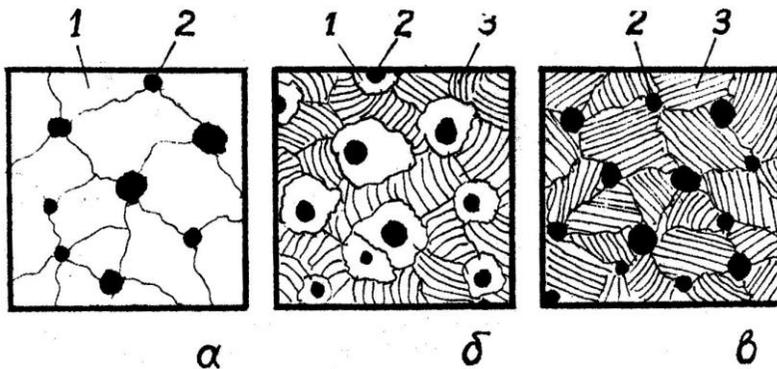


Рисунок 4.10 – Схема зарисовки микроструктуры высокопрочного чугуна:
 а) – ферритный; б) – феррито-перлитный; в) – перлитный;
 1 – феррит; 2 – шаровидный графит; 3 – перлит

Существуют следующие основные марки высокопрочных чугунов согласно **ГОСТ 7293–85**. Ферритные чугуны ВЧ35 и ВЧ40 характеризуются умеренной прочностью и высокой пластичностью. Ферритно-перлитные чугуны ВЧ45 и ВЧ50 имеют более высокую прочность, но существенно меньшую пластичность. Требуемые свойства чугунов этих двух классов получают непосредственно в литом состоянии без термической обработки. Перлитные чугуны ВЧ60, ВЧ70, ВЧ80 и ВЧ100 (при значительно более высокой прочности, чем у перлитоферритных чугунов) имеют практически равную пластичность.

Высокопрочный чугун находит применение в различных областях промышленности и сельского хозяйства (корпуса барабанов, поршни, статоры, крестовины, коленчатые валы, цилиндрические конические шестерни).

Ковкие чугуны

Ковким называется чугун с хлопьевидным или компактным графитом, получаемый путем отжига белого чугуна определенного химического состава (рисунок 4.11). Матрица может быть перлитная, ферритная, перлитно-ферритная (ГОСТ 1215–79). Маркировка ковкого чугуна производится буквами КЧ и двумя числами, из которых первое обозначает предел прочности при растяжении (в 0,1 МПа), а второе – относительное удлинение (в %). Существуют следующие марки ковких чугунов: КЧ30-6, КЧ33-8, КЧ36-10, КЧ37-12 – ферритные; КЧ45-6, КЧ50-5. КЧ55-4 – ферритно-перлитные и КЧ60-3,

КЧ65-3, КЧ70-2, КЧ80-1,5 – перлитные. Рекомендуемый химический состав КЧ отличается пониженным содержанием графитизирующих элементов углерода (2,4–2,9 %) и кремния (1,0–1,6 %). Это объясняется необходимостью получения в литом состоянии полностью отбеленного чугуна по всему сечению отливки.

По уровню свойств КЧ занимает промежуточное положение между серым чугуном и сталью. Он выгодно отличается от стали лучшими литейными свойствами, а от серого чугуна – более высокой вязкостью и пластичностью. Это обстоятельство послужило причиной для получения данным чугуном названия «ковкий», хотя никаким процессамковки он не подвергается.

Графитизирующий отжиг является обязательной операцией технологического процесса получения отливок из КЧ. Основная цель отжига – обеспечить графитизацию всего цементита и получить чисто ферритную матрицу, либо частичную графитизацию первичного цементита.

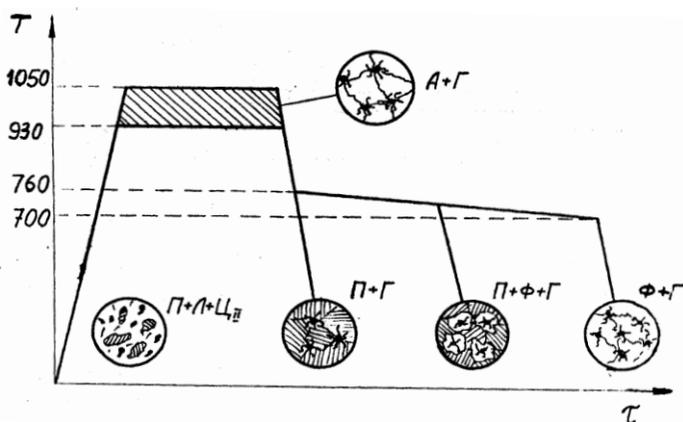


Рисунок 4.11 – Режим отжига белого чугуна на ковкий

Основные преимущества ковкого чугуна заключаются в однородности его свойств по сечению отливки, отсутствии напряжений в отливках и сочетании высоких механических свойств с хорошей обрабатываемостью резанием.

Ковкий чугун используется во многих отраслях машиностроения. Из ковкого чугуна изготавливают мелкие передние фасонные отливки, работающие в условиях динамических знакопеременных нагрузок: детали приводных механизмов, коробок передач, детали шасси в автотракторном машиностроении, коллекторы, рычаги и т. д.

Легированные стали

Маркировка и классификация легированных сталей

МАРКИРОВКА. В ГОСТах для маркировки легированных сталей принята система обозначений, состоящая из небольшого числа цифр и букв, которые указывают на ее состав. Первые цифры показывают среднее содержание углерода в стали в сотых долях % для конструкционных сталей (в десятых долях для инструментальных сталей). Цифры, идущие после буквы, указывают на примерное содержание легирующих элементов (ЛЭ). При содержании легирующих элементов менее 1% цифра не ставится. Например, сталь состава 0,10–0,15% углерода и 1,3–1,7% марганца обозначается 12Г2, сталь с 0,28–0,35% углерода, 0,8–1,1% хрома, 0,9–1,2% марганца, 0,8–1,2% кремния – 30ХГС. Для высококачественных сталей (с ограниченным количеством серы меньше 0,03%, фосфора меньше 0,03%) в конце обозначения ставят букву «А».

Основные ЛЭ и их обозначение:

Ni – Н; Cr – Х; V – Ф; W – В; Mo – М; Co – К; Ti – Т; Nb – Б;

Al – Ю; Cu – Д; Mn – Г; Si – С; В – Р; Р – П; Zr – Ц; N – А.

Некоторые стали обозначаются условными буквами:

Р – быстрорежущая;

Ш – шарикоподшипниковая;

Э – электротехническая. Нестандартные марки обозначают различным образом. Например, на заводе «Электросталь» опытные марки обозначаются буквой «И», пробные – «П».

КЛАССИФИКАЦИЯ. Легированные стали классифицируются по четырем признакам:

- по назначению;

- по химическому составу;

- по равновесной структуре;

- по структуре после охлаждения на воздухе.

По **назначению** легированные стали подразделяют на конструкционные, инструментальные и специального назначения.

По **качеству** эти стали подразделяют на качественные, высококачественные, особо высококачественные.

Конструкционные стали, идущие на изготовление деталей и механизмов машин.

Они подразделяются на машиностроительные (для изготовления деталей машин) и строительные (для изготовления строительных конструкций). Машиностроительные стали, как правило, подверга-

ются термической обработке. Строительные стали (обычно низколегированные) термообработке не подвергаются.

Инструментальные стали, идущие на производство инструментов.

Стали и сплавы с особыми свойствами (специального назначения) с резко выраженными свойствами: нержавеющие, жаропрочные, износостойчивые, с особыми магнитными и электрическими свойствами. В ряде случаев стали содержат большое количество легирующих элементов (>50%), поэтому их нередко причисляют не к сталям, а к сложным многокомпонентным сплавам. Их работоспособность оценивается не только механическими, но и технологическими свойствами.

В зависимости от **химического состава** стали классифицируются как марганцовистые, никелевые, хромистые, хромоникелевые и т. д.

Классификация по **равновесной структуре** при медленном охлаждении:

- доэвтектоидные стали, имеющие в структуре избыточный феррит;
- эвтектоидные стали, имеющие перлитную структуру (0,8% C);
- заэвтектоидные стали, имеющие в структуре избыточные карбиды;
- ледебуритные стали, имеющие в структуре первичные карбиды, выделившиеся из жидкой стали.

Классификация **по структуре после охлаждения на воздухе**.

Стали подразделяются на три основных класса (связано с кинетикой распада аустенита):

- перлитные с относительно низким содержанием ЛЭ (П);
- мартенситные с более значительным содержанием ЛЭ (М);
- аустенитные с высоким содержанием ЛЭ (А).

Влияние легирующих элементов

Легирующие элементы оказывают влияние на полиморфизм железа, причем большинство элементов расширяют или сужают область существования γ -модификации, сдвигая температурный интервал существования аллотропических модификаций. При определенном содержании марганца, никеля и других элементов γ -состояние существует стабильно от комнатной температуры до температуры плавления. Такие стали относят к аустенитным (А). Введение вана-

дия, молибдена, кремния, алюминия, титана при всех температурах делает устойчивым α -состояние (ферритные стали – Ф).

Легирующие элементы в промышленных сталях могут находиться:

в свободном состоянии (свинец, серебро, золото, которые не образуют соединений с железом, ни в жидком, ни в твердом состояниях (растворимость меди ~1%) и находятся в виде металлических включений);

в форме интерметаллидов (может быть у железа с большинством Л. Э., однако лишь при таких содержаниях, которые не встречаются в обычных сталях);

в виде оксидов, сульфидов и других неметаллических включений (характерно для многих элементов, имеющих больше сродства к кислороду, чем железо). Такие элементы раскисляют сталь (Mn, Si, Al);

в карбидной фазе (в виде раствора в цементите или специальных карбидов, имеющих сродство к углероду);

в форме твердых растворов железа, что характерно для многих легирующих элементов, кроме углерода, азота, кислорода, бора.

Растворение легирующих элементов в α -железе происходит в результате замещения атомов железа атомами этих элементов с изменением размеров α -решетки, вызывая изменение свойств феррита: прочность повышается, пластичность уменьшается. Наиболее сильно влияют никель, кремний, марганец.

Карбидообразующие элементы (Mo, W, Cr, Mn) вносят свое влияние на кинетику распада аустенита и способствуют увеличению *прокаливаемости* стали.

Конструкционные легированные стали

Из известных в технике материалов лучшее сочетание свойств прочности, надежности и долговечности имеет сталь. Поэтому она является основным конструкционным материалом для изготовления ответственных деталей, подвергающихся большим и знакопеременным нагрузкам. Конструкционные легированные стали должны обладать комплексом высоких механических свойств (прочность, пластичность, ударная вязкость).

Машиностроительные легированные стали

Если детали машин испытывают изгибающие (крутящие) нагрузки, важно упрочнить поверхностный слой, а сердцевину сохранить вязкой. Для этих целей применяют *цементуемые* (низкоуглеродистые) стали с содержанием углерода 0,10–0,25% для того,

чтобы после цементации, закалки и отпуска получить твердый поверхностный слой и вязкую сердцевину. Твердость поверхности составляет 60 HRC, сердцевины – 15–30 HRC (15X, 20XH). Для получения высокой твердости и износостойкости поверхности и достаточной прочности сердцевины применяют стали 20ХГТ, 30 ХГТ и другие. Степень упрочнения определяется содержанием углерода, легирующих элементов и чистотой стали, т. е. наличием примесей.

Улучшаемые (среднеуглеродистые) стали используют, когда детали машин подвергают высоким нагрузкам, а для повышения (обеспечения) свойств они подвергаются закалке и высокому отпуску. Сталь имеет структуру зернистого сорбита, обеспечивающего им лучшее сочетание прочности и вязкости. Содержат 0,3–0,4% углерода и разное количество ЛЭ, в том числе Cr, W, Mn, Ni, Mo (в сумме 3–5%). Обычная термическая обработка – закалка в масло и высокий отпуск 550–600°C. Чем больше легирующих элементов, тем больше ее прокаливаемость. Для больших сечений следует выбирать марки более легированных сталей. Улучшенные сорта сталей условно разбиты на пять групп, которые по мере увеличения номера показывают рост легирования.

Легированные улучшенные среднеуглеродистые стали после отжига имеют структуру Ф + П, после термообработки – продукты распада мартенсита.

Высокопрочные стали с 0,3–0,4% С, соответствующие современным требованиям техники, получают путем легирования никелем, кобальтом, а также специальной термической обработкой ВТМО (высокотемпературной термомеханической обработкой).

К высокопрочным сталям относятся:

- а) мартенситно-стареющие стали, например, Н18К8МЗ;
- б) трип-стали с высокой пластичностью и др.

К конструкционным машиностроительным сталям относят также **пружинные стали** с особыми упругими свойствами – 65Г, 60С, 50С2, 50ХФА; **шарикоподшипниковые** – ШХ6, ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ, с содержанием углерода 0,9–1,5% и хрома в десятых долях процента.

Строительные и арматурные стали

Строительная сталь предназначена для изготовления строительных конструкций (мостов, газо- и нефтепроводов, ферм, котлов), которые, в основном, сварные. Основное их свойство **свариваемость** – способность стали получать плотное и равнопрочное

сварное соединение. Строительные стали – низколегированные, с содержанием углерода меньше 0,22–0,25%. Предел текучести – до 40–50 кг/мм². Они не подвергаются термической обработке. Их применяют в виде листов и сортового проката.

Арматурная сталь изготавливается в виде прутков (гладкие, профильные) и проволоки для армирования железобетонных конструкций высокой прочности, так как в предварительно напряженной конструкции металл испытывает значительные напряжения. При низком содержании углерода (меньше 0,26%) сталь хорошо сваривается.

Стали и сплавы с особыми свойствами

Жаростойкие и жаропрочные стали обладают стойкостью против химического разрушения при температуре больше 550°C, повышенными механическими свойствами при высоких температурах. К ним относятся стали марок 12X17, 12X18H9, ХН32Т и др.

Жаростойкость (окалиностойкость) характеризуется сопротивлением металла окислению при высоких температурах (900–1150°C), обеспечивается введением легирующих элементов (Cr, Al, Si), обладающих большим сродством к кислороду, чем железо.

Жаропрочность – способность металла противостоять механическим нагрузкам при высоких температурах.

Коррозионностойкие (нержавеющие) стали и сплавы, устойчивые к электрохимической коррозии, подразделяются на хромистые и хромоникелевые.

Хромистые нержавеющие стали содержат 13, 17–18, 25–28% хрома, имеют высокую сопротивляемость к электрохимической коррозии в обычных атмосферных условиях, пресной и морской воде. Стали с содержанием меньше 0,2% углерода и 13% хрома в отожженном состоянии используют для изготовления деталей, работающих с ударными нагрузками (клапаны, арматура). Стали с 0,3–0,4% углерода после закалки имеют высокую твердость и прочность. Стали с 25–28% хрома Х25, Х28 применяют для деталей, работающих при высоких температурах, равных 1050–1150°C (чехлы, реторты, муфели).

Хромоникелевые нержавеющие стали относят к сталям аустенитного класса, с низким содержанием углерода 0,15% и содержат 18–25% хрома и 8–20% никеля. Типичный представитель – сталь с содержанием хрома 18% и никеля – 10%, которая при разных температурах имеет структуру аустенита. Ее используют как коррози-

онностойкую для изготовления изделий и сварных конструкций, не подверженных межкристаллической коррозии, работающих во влажном воздухе, воде, растворах солей, щелочей, кислот. С добавками Ti, Nb они превосходят хромистые стали 12X18H8T, 12X18H10T, 08X18H12T, 08X16Г8H2T.

Кислотостойкие стали, имеющие увеличенную стойкость в кислотах (общая коррозия), которая повышается присадкой в аустенитные стали молибдена (особенно с медью) при одновременном увеличении содержания никеля. Это стали типа Cr–Ni–Mo, Cr–Ni–Mo–Cu, например, 10X17H13M2T (ЭИ448).

Криогенные стали для машин и оборудования, эксплуатируемых при пониженных температурах $-80\dots-180^{\circ}\text{C}$. Стали делят на стали северного исполнения до (-60°C) , криогенные стали (от комнатных температур до -80°C и ниже типа X18H10, X18H20). Основное требование – механическая прочность при низких температурах.

Износостойкие стали включают:

а) графитизированную сталь с высоким содержанием С (1,50–1,75%) и Si (0,7–1,6%), обладающую высокой стойкостью против износа, например, марок ЭИ293, ЭИ366. Графит получается за счет частичного распада цементита;

б) высомарганцовистую сталь аустенитного класса (сталь Гадфильда) – 110Г13Л с 1,1–1,3% С, 11–12% Mn для изготовления деталей, работающих в условиях высоких давлений, ударных нагрузок одновременно с истиранием (гусеничные траки, железнодорожные стрелки, зубья ковшей и т. п.). Применяется в литом состоянии, реже – деформированном, термическая обработка – закалка в воду. Сталь имеет высокую вязкость, пластичность, повышенную износостойкость при относительно небольшой твердости 200–250 НВ.

Электротехнические стали отличаются легкой намагничиваемостью и подразделяются на:

а) магнитомягкие стали типа ЭИ2 с ферритной структурой с содержанием 0,04–0,10% С и до 4,8% Si для трансформаторов;

б) магнитотвердые стали EX2, EX3 при содержании 1,2–1,4% С, имеющие высокое значение коэрцитивной силы и остаточной индукции для изготовления постоянных магнитов.

Перечислены не все существующие виды легированных сталей, особенно специального назначения (например, стали с особыми тепловыми свойствами, немагнитные стали и другие).

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое сталь?
2. Как влияет содержание углерода на механические свойства стали?
3. Какое влияние оказывает содержание перлита на механические свойства стали?
4. Как классифицируются углеродистые стали по назначению?
5. Как классифицируют стали по химическому составу?
6. Как классифицируются углеродистые стали по качеству?
7. Как влияют постоянные примеси на свойства сталей?
8. Как подразделяют стали по степени раскисления?
9. Как маркируются инструментальные углеродистые стали?
10. Как маркируются конструкционные углеродистые качественные стали?
11. Как маркируют стали обыкновенного качества?
12. Что такое легированная сталь?
13. Что такое чугуны?
14. Как классифицируют чугуны по назначению?
15. Какие постоянные примеси присутствуют в составе чугунов?
16. Как классифицируют серые чугуны по форме графитных включений?
17. Какой чугун называется белым?
18. Как делятся чугуны по структуре?
19. Какие чугуны называются серыми?
20. Укажите основные структурные составляющие серых чугунов.
21. Как маркируются серые чугуны?
22. Как маркируются ковкие чугуны?
23. Как маркируются высокопрочные чугуны?
24. Укажите основные структурные составляющие высокопрочного чугуна.

Тема 5 Теория термической обработки

Основные понятия термической обработки

Теория термической обработки – теоретическое описание процессов формирования структур сплавов при фазовых превращениях, а также особенности их строения в условиях неравновесного состояния.

Для изменения свойств сплава необходимо, чтобы в нем произошли остаточные структурные изменения, которые обусловлены фазовыми превращениями.

Диаграмма состояния сплавов системы железо–углерод характеризует равновесное состояние сплавов, а линии на диаграмме показывают температурно-концентрационные условия фазовых превращений, при которых свободные энергии старых и образующих фаз равны.

Диаграмма состояния позволяет определить, какой термической обработке может быть подвергнут сплав и в каких температурных интервалах следует ее проводить.

В условиях быстрого изменения теплового состояния сплава изменяются температуры превращений, однако резко меняются и условия для диффузионных процессов, которые необходимы для осуществления превращений по типу равновесных. Диффузия элементов (проникновение атомов одного элемента в основу другого) оказывает решающее влияние на скорость и характер фазовых превращений. Принято считать, что если перемещения атомов не превышают межатомных расстояний, то диффузия отсутствует. Если же перемещения атомов больше межатомных расстояний, то процесс считают диффузионным.

К диффузионным процессам следует отнести:

- образование аустенита (при нагреве);
- перлитное превращение (при охлаждении);
- превращения при отпуске.

К бездиффузионным превращениям относят:

- мартенситное превращение;
- превращение в промежуточной области температур.

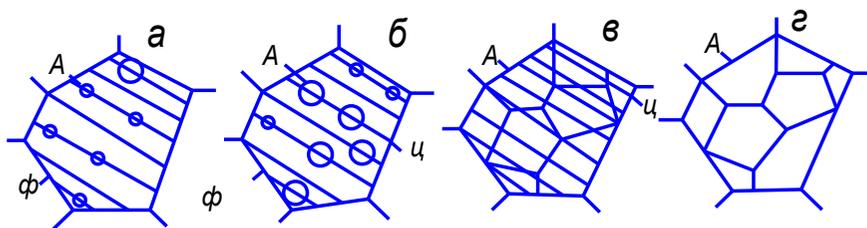


Рисунок 5.2 – Схема образования зерен аустенита

Образование аустенита из перлита происходит путем растворения цементита в феррите и аллотропического превращения феррита в аустенит (рисунок 5.2, в, г). Образовавшийся аустенит неоднороден по содержанию углерода. Под влиянием перепада концентрации происходит диффузия атомов углерода в аустените.

В объеме одного зерна перлита возникает множество центров кристаллизации, поэтому из одного зерна перлита образуется большое число зерен аустенита.

Дальнейший нагрев стали приводит к росту зерен аустенита. Ускоренному росту зерен аустенита способствует значительный перегрев стали, длительная выдержка при повышенных температурах, отсутствие механических препятствий для роста на границах соседних зерен. Способность зерна аустенита к росту различна для разных сталей. Стали, у которых зерно аустенита при нагревании немного выше A_{C3} начинает сразу сильно расти, называют *природно-крупнозернистыми* или *наследственно крупнозернистыми*. Стали, у которых не наблюдается заметного роста зерен при нагревании до температуры 950°C , называются *природно-мелкозернистыми*, или *наследственно-мелкозернистыми*. При нагревании выше 950°C во всех случаях наблюдается сильный рост зерен аустенита.

Введение в сталь таких карбидообразующих элементов, как молибден, вольфрам, ванадий, титан, задерживает процесс *аустенитизации* и рост зерен. Хром не влияет на величину зерна. Марганец и фосфор повышают склонность зерна аустенита к росту.

Под *природной* или *наследственной зернистостью* понимают склонность зерна аустенита к росту. *Действительное зерно* – фактический размер зерна стали, выявляемый в изделии при микроструктурном исследовании. Размер действительного зерна стали определяется многими факторами (способом выплавки стали, горячей и холодной пластической деформацией, термической обработ-

кой). Наибольшее влияние при этом оказывает температура последнего нагрева стали в процессе термической обработки.

Величина зерна стали определяется сравнением вида микроструктуры стали, рассматриваемой при увеличении в 100 раз, со шкалой стандартных размеров зерен по ГОСТ 5639–91. Установлено 10 номеров зерен стали. Зерна до 5-го номера включительно считаются крупными, остальные – мелкими.

Механические свойства стали определяют размером действительного зерна. Мелкозернистые стали имеют более высокую прочность и ударную вязкость, менее чувствительны к образованию трещин и внутренних напряжений при термической обработке и сварке. Крупнозернистые стали обладают более глубокой *прокаливаемостью*, они лучше обрабатываются резанием.

Диаграмма изотермического превращения аустенита

Кинетика превращения аустенита в феррито-цементитную смесь при охлаждении стали описывается при помощи *диаграммы изотермического превращения аустенита*, т. е. распада аустенита при постоянной температуре.

Для фиксации превращений аустенита используется структурно-закалочный метод, позволяющий произвести оценку по микроструктуре, механическим или магнитным свойствам образцов.

При изучении изотермических превращений аустенита комплект тонкостенных образцов стали нагревают до температур, соответствующих существованию стабильного аустенита. Затем образцы быстро охлаждают до температуры ниже A_1 , например до 700, 600, 500, 400°C и т. д., и выдерживают при этих температурах до полного распада аустенита. Результаты исследования при постоянной температуре характеризует кинетическая кривая, показывающая количество распавшегося аустенита в зависимости от времени, прошедшего с момента начала распада. На рисунке 5.3, а видно, что распад аустенита начинается не сразу после охлаждения его до выбранной температуры выдержки, а спустя некоторое время, которое принято называть *инкубационным периодом*. По истечении инкубационного периода (1% образовавшегося перлита) начинается медленное развитие процесса превращения. В начале скорость его невелика, затем она быстро нарастает и достигает максимума, когда около 50% аустенита распалось. В дальнейшем скорость превращения уменьшается и к концу превращения медленно затухает.

Построение таких кинетических кривых после охлаждения при разных температурах (t_1, t_2, t_3) позволяет получить диаграмму изотермического превращения аустенита (рисунок 5.3, б). Для этого нужны отрезки времени, соответствующие началу (H_1, H_2, H_3) и концу распада аустенита (K_1, K_2, K_3), для каждой из исследуемых температур (t_1, t_2, t_3), перенести на график, на котором по оси абсцисс откладывают время в логарифмической шкале, а по оси ординат – температуру, и одноименные точки соединить плавными кривыми.

В диаграмме изотермического превращения аустенита (рисунок 5.3, б) кривая (1) характеризует начало распада аустенита, а кривая (2) – окончание полного распада аустенита.

На диаграмме можно выделить следующие области:

- I – область устойчивого аустенита;
- II – область переохлажденного аустенита;
- III – область превращающегося аустенита;
- IV – область продуктов превращения аустенита;
- V – область мартенситного превращения.

Область II определяет продолжительность инкубационного периода. Длительность инкубационного периода характеризует устойчивость переохлаждения аустенита. С увеличением переохлаждения его устойчивость быстро уменьшается, достигая минимума, и далее вновь возрастает.

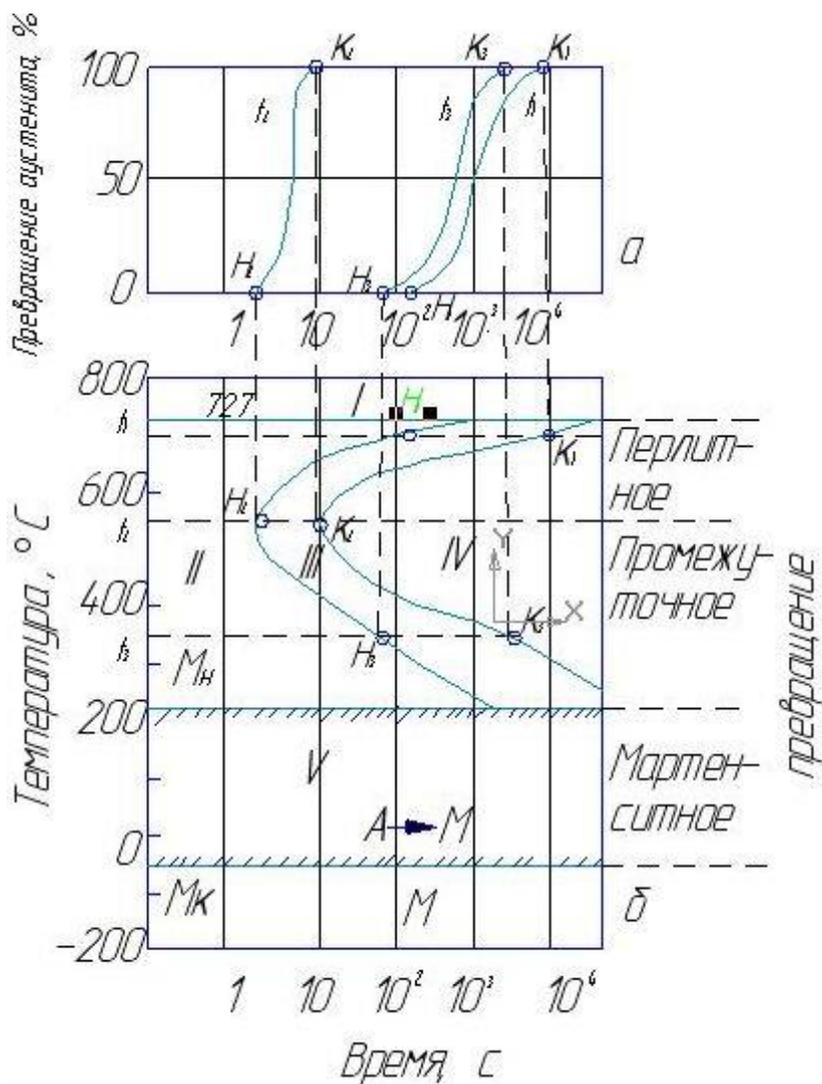


Рисунок 5.3 – Построение диаграммы изотермического превращения переохлажденного аустенита для стали с 0,8% углерода: а – кинетические кривые; б – диаграмма изотермического превращения аустенита; 1, 2 – кривые начала и окончания распада аустенита

При температуре наименьшей устойчивости аустенита – 550°C скорость превращения очень велика. В углеродистых сталях длительность инкубационного периода при этой температуре не превышает 1,0...1,5 с. Уменьшение устойчивости аустенита и роста скорости его превращения с увеличением степени переохлаждения объясняется возрастанием разности свободных энергий аустенита и образующимися фазами. Повышение устойчивости аустенита и уменьшение скорости его превращения при больших степенях переохлаждения вызывается снижением скорости образования и роста новых фаз вследствие замедления процесса диффузии.

При переохлаждении аустенита до температуры, равной или ниже мартенситной точки (M_n), соответствующей температуре начала превращения переохлажденного аустенита в мартенсит, диффузионные процессы полностью подавляются; образование структуры, состоящей из феррита и цементита, становится невозможным. В этом случае протекает *бездиффузионное* превращение аустенита в структуру закаленной стали, называемую *мартенситом* и представляющую упорядоченный пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в α -железе. Содержание углерода в мартенсите не отличается от его содержания в аустените.

В зависимости от степени переохлаждения аустенита различают три температурные ступени превращения на диаграмме изотермического превращения (рисунок 5.3, б):

перлитную 727–550°C;

промежуточную (между перлитным и мартенситным) 550–240°C;

мартенситную 240–50°C.

Превращения в стали при охлаждении

При переохлаждении аустенита происходит его превращение в перлит, которое заключается в распаде аустенита на почти чистое α -железо (феррит) и цементит:



Превращение может начаться лишь при некотором переохлаждении, когда свободная энергия феррито-цементитной смеси окажется меньшей, чем свободная энергия аустенита.

Перлитное превращение переохлажденного аустенита ($\text{A} \Rightarrow \text{П}$, 2 превращение) носит кристаллизационный характер и по своему механизму является диффузионным. Как видно на рисунке 5.4,

аустенит углеродистой стали, практически однородный по концентрации углерода, распадается с образованием феррита (содержание углерода 0,02%) и цементита (содержание углерода 6,67%). Ведущей, в первую очередь возникающей фазой при этом является цементит. Его зародыши, как правило, образуются на границах зерен аустенита.

В результате роста частиц этого карбида прилегающий к нему объем аустенита обедняется углеродом, снижает свою устойчивость и испытывает полиморфное $\gamma \Rightarrow \alpha$ -превращение. Кристаллики феррита зарождаются на границе с цементитом, что облегчает этот процесс.

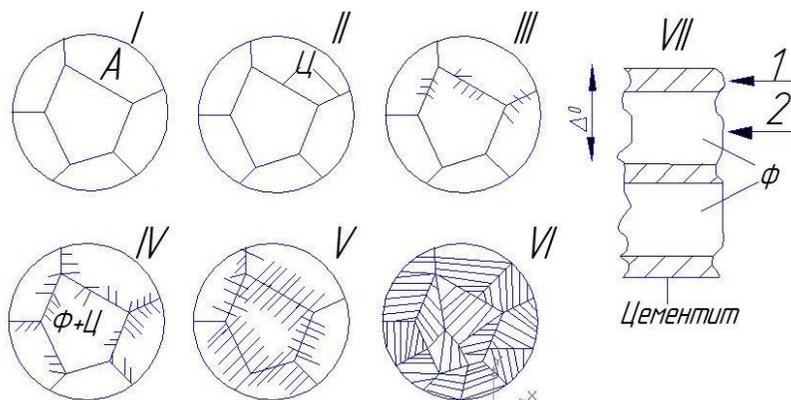


Рисунок 5.4 – Схема возникновения и роста перлитного зерна

I – аустенит; II – образование зародыша цементита на границе зерна аустенита;
 III – образование пластины феррита; IV–VI – рост и образование новых пластин цементита и феррита (перлита); VII – перераспределение углерода при образовании перлита; 1 – высокая концентрация углерода – цементит (6,67%);
 2 – низкая концентрация углерода – феррит (0,02%)

Дальнейший рост ферритных пластинок способствует диффузии углерода от места превращения вглубь аустенита, что обогащает аустенит углеродом и способствует зарождению и росту пластинок цементита. В результате происходит совместный рост кристалликов феррита и цементита (рисунок 5.4).

Продукты перлитного превращения имеют *пластинчатое строение*. Чем больше переохлаждение, тем тоньше получающаяся феррито-цементитная структура, т. е. меньше величина межпластинча-

того расстояния Δ_0 (рисунок 5.4), равного усредненной сумме толщин пластинок феррита и цементита. Пластинчатые структуры эвтектоидного типа определяют как *перлит*, *сорбит* и *троостит* или, соответственно, грубо-, средне- и тонко дифференцированный перлит (рисунок 5.5).

Структуры перлита, сорбита и троостита закалки отличаются не только по своему строению, но и по механическим свойствам. С увеличением дисперсности феррито-цементитной смеси увеличиваются твердость, прочность и уменьшаются вязкость и пластичность стали (таблица 5.1).

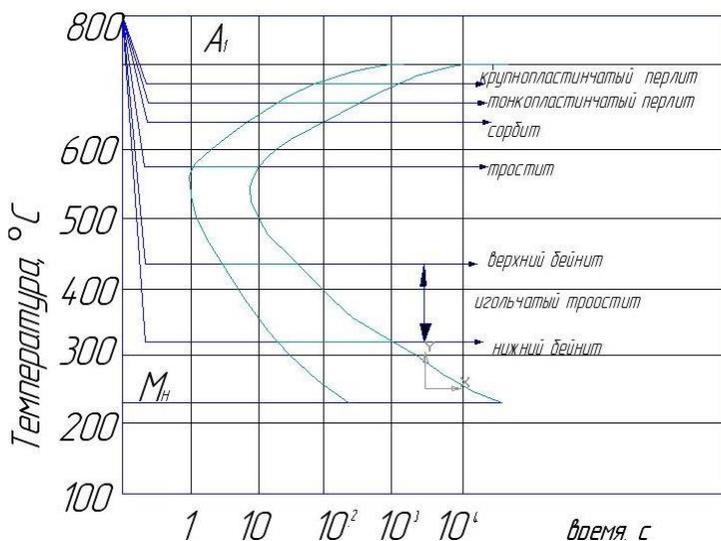


Рисунок 5.5 – Структуры, образующиеся при различных степенях переохлаждения аустенита

Таблица 5.1 – Структура и свойства углеродистой стали

Структура	Перлит	Сорбит	Троостит
Размеры, мкм	0,6.....1,0	0,25....0,30	0,10....0,15
Твердость, НВ	180....250	250....350	350....450

Однако следует учитывать, что разделение феррито-цементитной структуры на перлит, сорбит и троостит условно и между ними нет четкой границы.

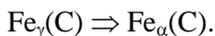
Промежуточное превращение идет при переохлаждении аустенита ниже 550°C (ниже выступа С-образной кривой, рисунок 5.3, б). В этом случае аустенит также распадается на ферритоцементитную смесь, но она имеет игольчатое строение. При температурах превращения 250–450°C диффузия углерода затруднена, а аустенит представляет собой упругую среду, хорошо сопротивляющуюся росту новых фаз. Поэтому распад аустенита идет за счет образования все новых и новых пластинок (игл) ферритоцементитной смеси. Она протекает в интервале температур, когда отсутствует диффузия железа, но интенсивно протекает диффузия углерода.

Такое превращение называется *промежуточным* или *бейнитным*, а получаемая структура – игольчатым *трооститом* или *бейнитом*. Дисперсность бейнита также зависит от степени переохлаждения. Чем больше переохлаждение, тем более дисперсной является смесь. Поэтому принято делить структуры промежуточного превращения на *верхний* и *нижний* бейниты, которые отличаются по своим свойствам. Верхний бейнит образуется в районе температур переохлаждения порядка 450°C, а нижний – 300–350°C. Для эвтектоидной стали твердость верхнего бейнита составляет 45 HRC, а нижнего – 55 HRC.

Характерной особенностью бейнитных структур является наличие в ферритной основе мелких зернышек и пластинок твердой фазы (цементита и мартенсита) с закругленными краями. Это придает им большую вязкость в сравнении со структурами сорбита и троостита закалки.

Мартенситное превращение в стали

Мартенситное превращение ($A \Rightarrow M$, 3 превращение) происходит только в случае, если при очень быстром охлаждении сплава достигаются температуры, при которых не происходят диффузионные процессы. При температуре ниже M_n (рисунок 5.3, б) начинается превращение переохлажденного аустенита, которое заключается в аллотропическом превращении γ -железа (решетка К12) в α -железо (решетка К8):



Полученная в результате этого превращения особая структура называется *мартенситом*. Мартенсит является упорядоченным пересыщенным твердым раствором внедрения углерода в α -железо. Если в равновесном состоянии растворимость углерода в

α -железе при комнатной температуре составляет 0,006%, то его содержание в мартенсите может быть таким же, как и в исходном аустените. Оно может достигать до 2,14%. За счет избыточного против равновесного растворения углерода в α -железе кристаллическая решетка искажается (вытягивается) и превращается из кубической К8 в тетрагональную Т8 (рисунок 5.6). Чем больше содержание углерода в мартенсите, тем больше будут искажения кристаллической решетки (больше степень тетрагональности, т. е. больше отношение c/a).

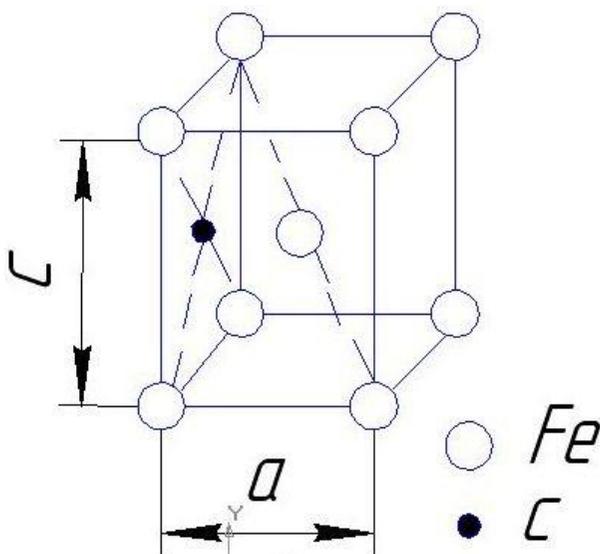


Рисунок 5.6 – Кристаллическая решетка мартенсита

Искажения кристаллической решетки твердого раствора ведут к увеличению твердости и снижению пластичности. Таким образом, твердость мартенсита будет тем больше, чем больше растворено углерода в твердом α -растворе, который имеет максимальную твердость 60–62 HRC.

Превращение переохлажденного аустенита в мартенсит в отличие от превращения аустенита в феррито-цементитную смесь характеризуется следующими особенностями:

превращение аустенита в мартенсит может протекать только при *непрерывном охлаждении*, тогда как перлитное превращение

протекает как при непрерывном охлаждении, так и изотермическом. Прекращение охлаждения приводит к прекращению превращения. Это происходит потому, что во время превращения резко увеличивается (\approx на 3%) объем сплава. В результате чего в аустените появляются внутренние напряжения, которые приводят к фазовому наклепу аустенита, т. е. к его упрочнению и прекращению превращения.

Температуры начала M_n и M_k конца мартенситного превращения зависят от содержания углерода и легирующих элементов, растворенных в аустените. С увеличением содержания углерода температуры M_n и M_k снижаются. Скорость охлаждения не влияет на положение температур начала и конца мартенситного превращения.

Превращение аустенита в мартенсит никогда не идет до конца, даже при охлаждении ниже точки M_k ; в закаленной стали кроме мартенсита всегда есть небольшое количество остаточного аустенита (А ост);

превращение аустенита в мартенсит протекает с очень высокой скоростью. Время образования первых мартенситных кристаллов определяется $10^{-5} \dots 10^{-7}$ с (микросекунды);

при превращении аустенита в мартенсит возникают большие внутренние напряжения, которые вызывают деформацию, а иногда и появление трещин в закаленных изделиях.

Необходимо отметить, что превращение аустенита при непрерывном охлаждении происходит ниже температуры A_1 в связи с тем, что свободная энергия продуктов распада становится ниже, чем свободная энергия аустенита.

С увеличением скорости охлаждения возрастает степень переохлаждения аустенита относительно равновесной точки A_1 . Чем больше скорость охлаждения и ниже температура распада аустенита (рисунки 5.5, 5.7), тем дисперснее образующаяся ферритно-цементитная структура (подобно тому, как это наблюдалось при изотермическом распаде аустенита). При небольшой скорости охлаждения V_1 образуется перлит, при большей V_2 – сорбит, еще большей V_3 – троостит. При непрерывном охлаждении углеродистых сталей бейнит обычно не образуется. При высоких скоростях охлаждения (V_4) структура состоит из троостита и мартенсита.

Температура, °С
800

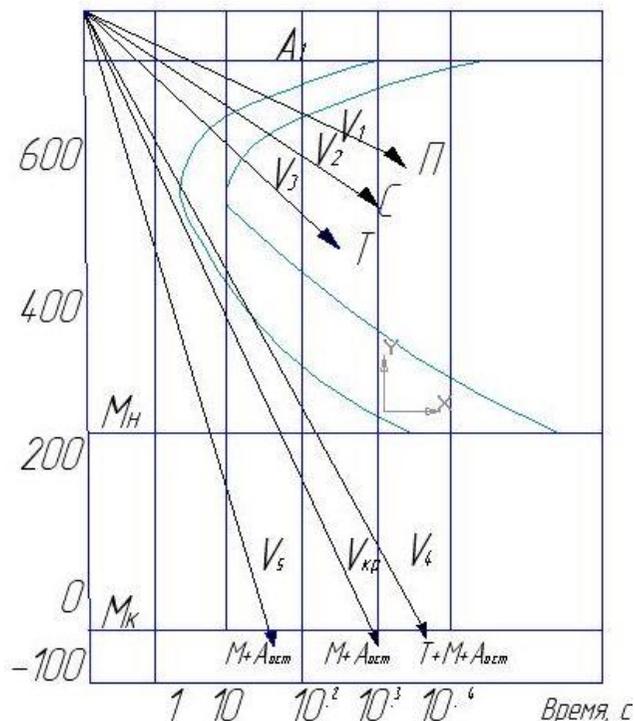


Рисунок 5.7 – Наложение кривых охлаждения стали на диаграмму изотермического распада аустенита

При очень большой скорости охлаждения диффузионный распад аустенита становится невозможным. Тогда аустенит переохлаждается до точки M_k и превращается в мартенсит (рисунки 5.5, 5.7). В структуре обязательно присутствует остаточный аустенит. Минимальную скорость охлаждения (рисунок 5.7, $V_{кр}$), при которой весь аустенит переохлаждается до точки M_n и превращается в мартенсит, называют *критической скоростью закалки*.

Превращения в закаленной стали при отпуске

Типичная структура закаленной стали – *мартенсит* и *остаточный аустенит*, которые являются *неравновесными* фазами.

Последующий нагрев такой стали приводит к развитию диффузионных процессов и распаду мартенсита, а затем и остаточного аустенита с образованием структуры, состоящей из феррита и цементита, т. е. превращению $M \Rightarrow P$. Такой вид термообработки называется *отпуском*.

Нагрев закаленной стали до температуры не более 150 °С приводит к равномерному распределению углерода в мартенсите и образованию ϵ -карбидов (мелкодисперсных карбидов) (I превращение при отпуске).

Структуру, образующуюся в результате распада мартенсита при этих температурах, называют *отпущенным мартенситом*, который отличается от мартенсита закалки меньшей концентрацией в нем углерода и необособленными включениями дисперсных карбидов. Твердость при этом практически не изменяется (таблица 5.2).

При нагреве закаленной стали до 200–300 °С происходит распад *остаточного аустенита* на пересыщенное α -железо и карбиды. Хрупкость стали повышается (II превращение).

При нагреве до 350–450 °С полностью завершается процесс выделения углерода из α -раствора железа (мартенсита), происходит обособление решеток феррита и карбида. Образующуюся структуру обычно называют *трооститом отпуска*. Твердость стали снижается (III превращение).

При нагреве закаленной стали до температуры 500–600 °С происходит коагуляция карбидов, образуется более крупная феррито-цементитная смесь, которая называется *сорбитом отпуска* (IV превращение).

Таблица 5.2.– Основные превращения при нагреве закаленной стали

Исходные фазы	Мартенсит + аустенит ост.	Мартенсит отпуска	Феррит + карбиды	Феррит + цементит
Образующаяся структура	Мартенсит отпуска	Феррит + карбиды	Троостит	Сорбит
Твердость, НВ	НВ	1,1 НВ	0,8 НВ	0,7 НВ
Температура нагрева, °С	150–200	200–300	350–450	500–600
Фазовые превращения	I	II	III	IV

Первое превращение при отпуске. Нагрев закаленной стали до 200°C заключается в превращении *мартенсита закалки (тетрагонального)* в *отпущенный мартенсит*. В процессе превращения происходит выделение углерода из мартенсита с образованием карбидных частиц, которые обозначают ϵ -карбид. Снижение содержания углерода в мартенсите приводит к уменьшению тетрагональности (c/a) мартенсита. Скорость распада мартенсита и концентрация углерода в нем зависят от температуры отпуска.

Для распада мартенсита на 50% (по расчетам Г. В. Курдюмова) необходимо следующее время: при 0°C требуется 340 лет; при 20°C – 604 года; при 40°C – 2,5 месяца; при 60°C – 8 часов; при 120°C – 8 минут. Заканчивается первое превращение при температурах около 300°C в зависимости от содержания углерода в мартенсите. Структура состоит из мартенсита исходного, мартенсита с пониженным содержанием углерода и ϵ -карбидов в виде мелких частичек.

Второе превращение при отпуске. Нагрев закаленной стали до температуры 200–300°C заключается в превращении *остаточного аустенита* в *мартенсит отпуска*. При распаде остаточного аустенита в углеродистой стали (в интервале температур 200...300°C) образуются те же фазы, что и при распаде мартенсита закалки, его распад продолжается, увеличивается размер частиц карбидов. К концу второго превращения в мартенсите содержится ~ 0,15...0,20% углерода.

Третье превращение при отпуске. Нагрев закаленной стали до температуры 300–400°C заключается в распаде мартенсита отпуска в феррито-цементитную высокодисперсную смесь, называемую *трооститом отпуска*. В этом интервале температур происходит диффузионное перераспределение углерода, что приводит к растворению неустойчивых частичек ϵ -карбида (Fe_2C), образованию и росту более устойчивых частиц карбида Fe_3C , выделению углерода из α -твердого раствора до равновесного состояния. Троостит при таких температурах отпуска имеет игольчатое строение феррито-цементитной смеси.

Четвертое превращение при отпуске. Нагрев закаленной стали выше 400°C представляет собой процесс коагуляции цементитных частиц и укрупнение блоков мозаичной структуры феррита. Игольчатое строение феррито-цементитной смеси сохраняется при температуре 400...500°C.

Дальнейший нагрев приводит к укрупнению и сфероидизации карбидных частиц. При температуре 500...600°C структура феррито-цементитной смеси имеет зернистое строение средней степени

дисперсности – *сорбит*, при температурах 650...700°C – грубодисперсное зернистое строение (зернистый перлит).

Указанные температурные интервалы относятся к отпуску при медленном нагреве закаленных сталей ниже A_{C1} . Все процессы происходят внутри мартенситных пластин, поэтому игольчатый (зернистый) характер строения сохраняется до высоких температур отпуска.

Вопросы для самоконтроля

1. Что представляет собой критическая точка A_{C1} ?
2. Что представляет собой критическая точка A_{C3} ?
3. Опишите превращения стали при нагреве.
4. Изобразите диаграмму изотермического распада аустенита.
5. Опишите перлитное превращение при охлаждении стали.
6. Охарактеризуйте промежуточное превращение при охлаждении стали?
7. Охарактеризуйте мартенситное превращение при охлаждении стали?
8. Как происходит изотермический распад аустенита?
9. Что такое закалка?
10. Что такое критическая скорость закалки?
11. Какая структура образуется в углеродистой стали при закалке?
12. Что представляет собой мартенсит?
13. Какими свойствами обладает мартенсит?
14. Что представляют собой троостит и сорбит?
15. Охарактеризуйте превращения в закаленной стали при отпуске?

Тема 6 Технология термической обработки

Классификация видов термической обработки стали

Общие положения

Под термической обработкой (ТО) сплавов понимают совокупность операций теплового воздействия на металлы с целью изменения их структуры и, следовательно, свойств. Поскольку основными факторами ТО являются температура и время, то любой технологический процесс термической обработки можно представить в этих координатах (рисунок 6.1).

Важнейшие параметры процесса ТО: температура нагрева (t_H), скорость нагрева (V_H), продолжительность выдержки при температуре нагрева (τ_B) и скорость охлаждения (V_{Oxl}).

Изменение строения и свойства сталей путем ТО тесно связано с фазовыми превращениями и, следовательно, с диаграммами состояния железоуглеродистых сплавов и изотермического превращения аустенита. Эти диаграммы позволяют прогнозировать изменения свойств стали в результате термической обработки.

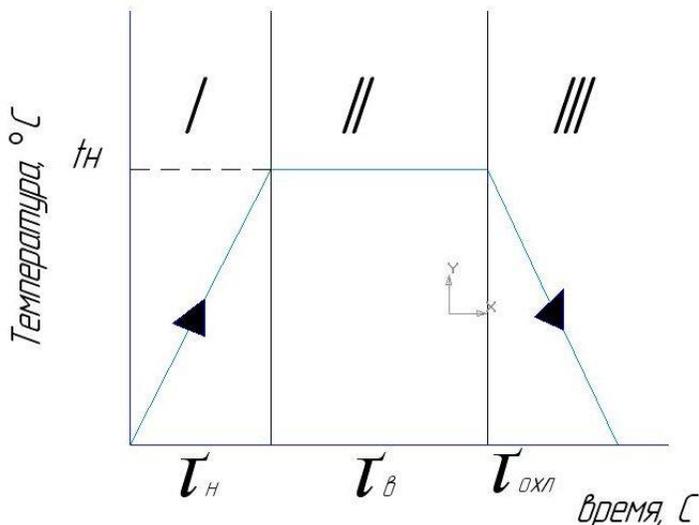


Рисунок 6.1 – Схема технологического процесса термической обработки:

I – первый этап (нагрев); II – второй этап (выдержка);

III – третий этап (охлаждение)

Классификация видов

В практике машиностроения различают *первичную* и *вторичную* термические обработки. Назначение первичной ТО заключается в подготовке структуры к последующим операциям механической, пластической или окончательной термической обработки. Назначение вторичной ТО – получение необходимой структуры, а, следовательно, и требуемых свойств стали.

Первым этапом любого вида ТО является нагрев стали (рисунок 6.1). Выбор температуры нагрева стали тесно связан с диаграммой состояния железо–цементит (рисунок 6.2).

В большинстве случаев термическая обработка стали начинается с получения структуры аустенита.

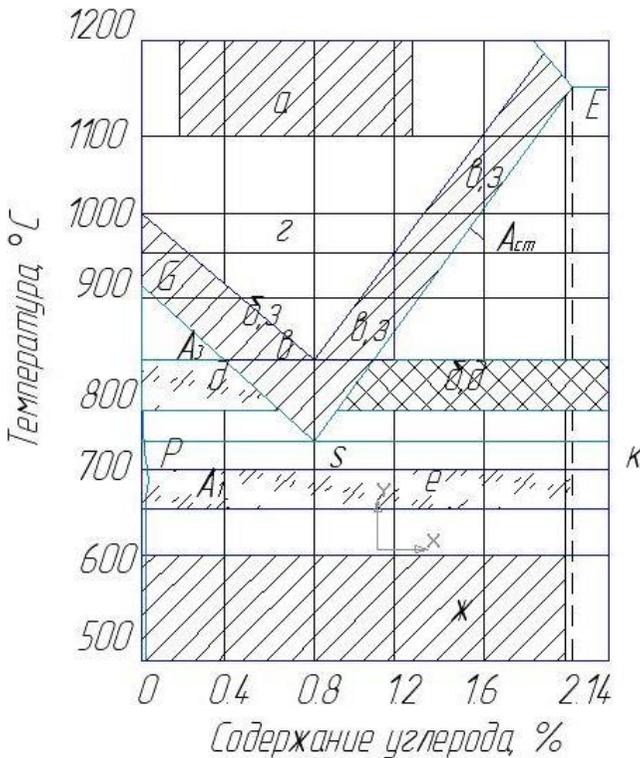


Рисунок 6.2 – Температура нагрева для различных видов термической обработки

- а – диффузионный отжиг; б – закалка; в – нормализация для устранения цементитной сетки; г – цементация; д – неполный отжиг;
- е – рекристаллизационный отжиг; ж – низкий отжиг; з – полный отжиг

Скорость нагрева выбирается в зависимости от ряда факторов: теплопроводности стали, нагревательного устройства, формы и размеров деталей, общей массы нагреваемых деталей, характера их расположения в печи.

Нагрев может производиться в печах с газовой атмосферой (электрических, газовых, мазутных), в жидких средах (расплавленных металлах и солях), а также токами высокой частоты. Если изделие поместить в нагретую до высоких температур среду, то в начальный момент распределение температуры по сечению детали будет неравномерным: высокая температура будет на поверхности, низкая – в сердцевине изделия. Поверхностные слои испытывают напряжения сжатия, так как они стремятся расшириться, но этому препятствуют более холодные слои металла.

Чем выше теплопроводность стали, тем меньше градиент температур по сечению детали. Однако чем больше в стали содержится углерода и легирующих элементов, тем ниже теплопроводность стали и, следовательно, ниже допустимая скорость нагрева.

Сложность формы изделия (как и пониженная теплопроводность) снижает скорость нагрева.

Чтобы обеспечить малую скорость нагрева, изделия необходимо загружать в холодную или слегка нагретую печь. Если допустима высокая скорость нагрева, то изделие загружают в предварительно нагретую до нужной температуры печь или в печь, температура которой превышает температуру нагрева. Нагрев в жидких средах обеспечивает большую скорость нагрева по сравнению с нагревом в печах с газовой средой. Индукционный нагрев токами высокой частоты позволяет получить еще более высокие скорости нагрева.

Вторым этапом является выдержка (рисунок 6.1). Продолжительность выдержки при заданной температуре нагрева определяется скоростью фазовых превращений, происходящих в металле. Выдержка необходима для выравнивания температуры по объему деталей и завершения фазовых превращений.

Температура нагрева и время выдержки часто должны обеспечить получение после ТО мелкого действительного зерна.

В процессе нагрева и выдержки в печах с газовой атмосферой происходит окисление и обезуглероживание поверхностных слоев стали. Для получения в печи нейтральной атмосферы необходимо иметь определенное соотношение науглероживающих, окисляющих, обезуглероживающих и восстанавливающих газов: CO_2/CO ; $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$; CH_4/H_2 .

Нейтральной средой является чистый азот, а также вакуум. Нагрев в расплавленных солях осуществляется без окисления.

Для определения общей продолжительности нагрева $\tau_{об} = \tau_n + \tau_с$ часто пользуются опытными данными (таблица 6.1) или эмпирическими формулами. Продолжительность изотермической выдержки при заданной температуре для деталей машин наиболее часто составляет 15–25% от продолжительности сквозного прогрева.

Таблица 6.1 – Ориентировочная продолжительность нагрева изделий для закалки до 800–850°C в различных типах печей

Нагрев	Продолжительность нагрева, с на 1 мм сечения или толщины изделия		
	Круглое	Квадратное	Прямоугольное
В электропечи	40...50	50...60	60...75
В пламенной печи	35...40	45...50	55...60
В соляной ванне	12...15	15...18	18...22
В свинцовой ванне	6...8	8...10	10...12

Третьим этапом ТО является охлаждение (рисунок 6.1), характеризующееся скоростью и способом охлаждения аустенита, которые, главным образом, и определяют свойства стали после термической обработки. Охлаждение аустенита с различной скоростью приводит к получению различных структур, что и позволяет выбрать вид ТО стали. Скорость и режим охлаждения для получения необходимых свойств определяются диаграммами изотермического распада переохлажденного аустенита.

Основными видами ТО, различно изменяющими структуру и свойства стали и назначаемые в зависимости от требований, предъявляемых к заготовкам и готовым изделиям, являются *отжиг*, *закалка* и *отпуск*.

Отжиг, его виды и применение

Отжиг – операция термической обработки, при которой сталь нагревается выше A_{C3} (или только выше A_{C1} – неполный отжиг) с последующим медленным охлаждением (рисунок 6.2). Нагрев стали

выше A_{C3} , обеспечивает полную перекристаллизацию стали. Медленное охлаждение при отжиге ведет к распаду аустенита и превращению его в перлитные структуры.

Отжиг обычно является первоначальной операцией ТОО, цель которой либо устранить дефекты предыдущих операций горячей или холодной обработки, либо подготовить структуру к последующим технологическим процессам. Есть отжики, температура нагрева при которых может быть и ниже A_{C1} (тогда не происходит фазовой перекристаллизации). Также отжики предназначены для снятия внутренних напряжений, наклепа после холодной обработки давлением. К ним относятся рекристаллизационный отжиг, низкий отжиг (рисунок 6.2). Эти виды отжига называют *отжигами I рода* (без фазовой перекристаллизации). Сюда же относят и диффузионный или гомогенизирующий отжиг, который происходит при высоких температурах (значительно выше A_{C3}) и применяется, в основном, для слитков из легированных сплавов. В этом случае слитки или отливки сплавов после затвердевания не охлаждаются ниже температур $A_{C3} - A_{C1}$, а сразу направляются в нагревательную печь для отжига, т. е. в них не происходит фазовых превращений после затвердевания.

Отжики I рода

Рекристаллизационный отжиг предназначен для снятия наклепа, заключается в нагреве деформированного материала до температуры выше температуры рекристаллизации, выдержке и последующем медленном охлаждении (в печи). Минимальная температура рекристаллизации железа и других металлов технической чистоты определяется по формуле $T_{\text{рекр}} = 0,3-0,4 T_{\text{пл}}$. Практически температура рекристаллизационного отжига выбирается выше расчетной обычно на 200...300°C. Для железа и низкоуглеродистой стали температура рекристаллизационного отжига принимается равной 650...700°C (рисунок 6.2, е).

При отжиге стали, кроме рекристаллизации феррита, протекает процесс коагуляции и сфероидизации цементита, что повышает пластичность и облегчает обработку давлением.

Низкий отжиг применяется для снятия напряжений, возникших в результате неравномерного охлаждения отливок, сварочных работ и обработки резанием (рисунок 6.2, ж).

Температура низкого отжига находится в пределах 200...700°C, чаще 350...600°C. Выдержка при температуре нагрева определяется размерами изделия, охлаждение производится медленно (в печи).

Диффузионный или *гомогенизирующий отжиг* применяется для устранения ликвации, т. е. неоднородности химического состава внутри отдельных зерен или в объеме сплава, возникающий чаще всего в процессе кристаллизации. Он состоит из нагрева стали до температур (рисунок 6.2, а), значительно превышающих критические ($1050\dots1200^{\circ}\text{C}$) и обеспечивающих диффузию неравномерно распределенных элементов, а также длительной выдержки ($10\dots100$ ч) и медленного охлаждения (с выключенной печью).

В результате диффузионного отжига получается крупное зерно. Этот недостаток устраняется при последующей обработке давлением. Фасонные отливки после гомогенизации подвергаются полному отжигу или нормализации для измельчения зерна и улучшения свойств.

Отжиги II рода

Отжиг II рода (с фазовой перекристаллизацией) является подготовительной ТО перед резанием и имеет целью за счет фазовых превращений обеспечение практически равновесных фазового и структурного состояний. Иногда (для крупных отливок) отжиг II-го рода может быть окончательным видом ТО. В практике различают следующие основные виды отжига II-го рода.

Полный отжиг (рисунок 6.3, ж). Сталь нагревают до температуры на $30\dots50^{\circ}\text{C}$ превышающей A_{C3} , выдерживают при этой температуре, медленно охлаждают до $500\dots600^{\circ}\text{C}$ вместе с печью, а затем на воздухе. Полный отжиг обеспечивает полную фазовую перекристаллизацию и применяется обычно для доэвтектоидных сталей.

Неполный отжиг. Стали нагревают на $30\dots50^{\circ}\text{C}$ выше A_{C1} , но не превышают A_{C3} и A_{Cm} . При нагреве происходит частичная (неполная) перекристаллизация стали (в структуре $\Phi + \Pi$ или $\Pi + \text{Ц}_{\text{вт}}$, только перлит превращается в аустенит). Неполный отжиг проводят обычно для заэвтектоидных сталей и называют *сфероидизацией*, т. к. получают сталь со структурой *зернистого перлита*.

Нормализационный отжиг (нормализация). Нагрев доэвтектоидной стали до температуры на $30\dots50^{\circ}\text{C}$, превышающей A_{C3} , а заэвтектоидной – на $30\dots50^{\circ}\text{C}$, превышающей A_{C1} , изотермическую выдержку и охлаждение на спокойном воздухе (скорость охлаждения при температурах $800\text{--}850^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{/c}$) (рисунок 6.3, е).

Цель нормализации та же, что и полного и неполного отжига. Однако после нормализации прочность и твердость стали выше, чем при отжиге. Разница в механических свойствах тем больше, чем выше содержание углерода в стали.

Нормализация малоуглеродистых сталей заменяет полный отжиг стали, что сильно сокращает длительность процесса ТО. В заэвтектоидных сталях нормализация предназначена для устранения цементитной сетки.

Изотермический отжиг (рисунок 6.3, д). Сталь нагревают до температуры на $30...50\text{ }^{\circ}\text{C}$, превышающей A_{C3} , переносят в другую печь с заданной температурой (ниже A_{C1}) и проводят изотермическую выдержку до полного распада аустенита (рисунок 6.3, д). Преимущество изотермического отжига состоит в уменьшении длительности процесса, особенно для легированных сталей. Температуру изотермической выдержки выбирают близкой к температуре минимальной устойчивости переохлажденного аустенита в перлитной области. Другим преимуществом является получение более однородной структуры.

Изотермический отжиг используют для заготовок и деталей небольших размеров.

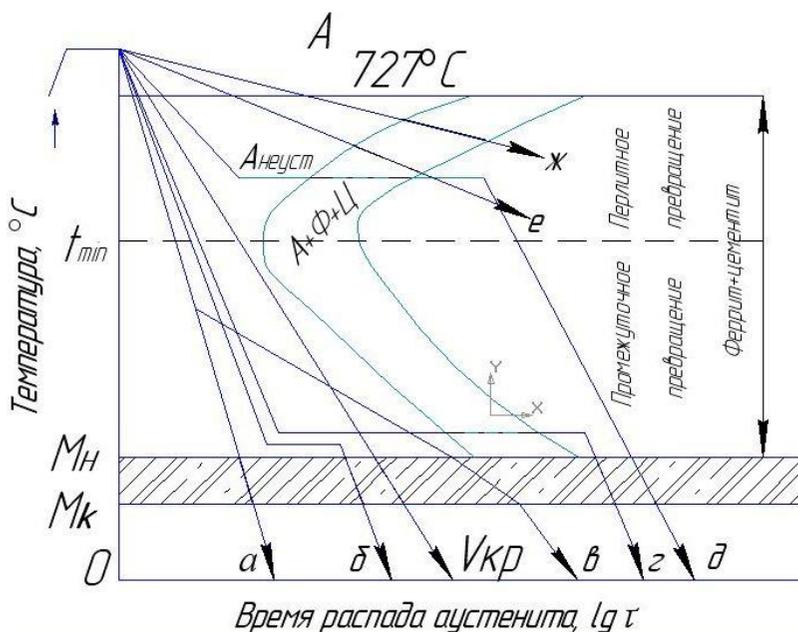


Рисунок 6.3 – Кривые охлаждения для различных видов термической обработки, нанесенные на диаграмму изотермического распада аустенита:

- a – закалка в одном охладителе; $б$ – ступенчатая закалка;
- $в$ – закалка в двух средах; $г$ – изотермическая закалка;
- $д$ – изотермический отжиг; $е$ – нормализация; $ж$ – отжиг

Закалка, ее виды и применение

Закалка – операция термической обработки, при которой сталь нагревается на 30...50°C выше A_{C3} (для доэвтектоидных сталей) или выше A_{C1} (для заэвтектоидных сталей), подвергается выдержке для завершения фазовых превращений и последующему охлаждению со скоростью выше критической (рисунок 6.3, а). Целью закалки, в основном, является получение *предельной твердости* стали. Есть способы закалки, обеспечивающие получение специальных свойств. Чтобы уменьшить хрупкость и напряжение, вызванные закалкой и получить требуемые механические свойства, сталь после закалки обязательно подвергают *отпуску*.

Выбор температуры нагрева стали перед закалкой объясняется необходимостью иметь *аустенитную* структуру (рисунок 6.2). В случае нагрева доэвтектоидных сталей до температур, соответствующих межкритическому интервалу ($A_{C1} - A_{C3}$), последующее охлаждение со скоростью выше критической не приведет к получению высокой твердости и прочности стали, т. к. в структуре нагретой стали будет присутствовать не только аустенит, но и феррит. Закалку сталей с содержанием углерода менее 0,3% не производят, т. к. *мартенситная структура закалки* с низким отношением параметров решетки c/a перенасыщенного твердого раствора углерода в α -железе не обеспечивает высокой твердости и прочности стали. Нагрев заэвтектоидной стали ниже A_{C3} , объясняется желанием сохранить в структуре стали перед закалкой некоторое количество цементита, который препятствует росту зерна при нагреве и дополнительно повышает твердость закаленной стали. Таким образом, для доэвтектоидных сталей дается *полная закалка*, а для заэвтектоидной – *неполная*.

На технологию закалки сталей существенное влияние оказывает выбор охлаждающей среды. Охлаждающая среда должна обеспечить скорость охлаждения выше критической в интервале температур $A_1 - M_n$ для подавления распада переохлажденного аустенита в области перлитного и промежуточного превращения и замедленное охлаждение в интервале температур мартенситного превращения $M_n - M_k$ с целью уменьшения остаточных напряжений. Однако слишком медленное охлаждение стали в интервале температур $M_n - M_k$ может привести к частичному отпуску и увеличению количества остаточного аустенита, что снижает твердость стали.

Для закалки обычно используют кипящие жидкости: воду, водные растворы солей и щелочей, масла. Скорость охлаждения деталей в такой среде может быть разбита на три периода (рисунок 6.4).

Первый период характеризуется медленным охлаждением за счет образования паровой рубашки вокруг детали (пленочное кипение).

Второй период характеризуется пузырьчатым кипением. В этот период происходит наиболее интенсивное охлаждение.

Третий период начинается при охлаждении деталей ниже температуры кипения охлаждающей среды. Охлаждение протекает за счет конвективного теплообмена. Скорость охлаждения замедляется.

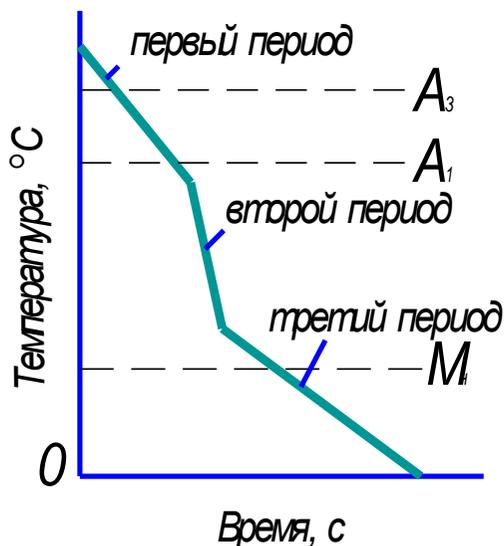


Рисунок 6.4 – Скорость охлаждения изделия в зависимости от температуры воды

Для закалки доэвтектоидных и эвтектоидных углеродистых сталей наиболее часто в качестве охлаждающей среды употребляется вода. Положительным свойством воды является быстрое охлаждение стали в области наименьшей устойчивости аустенита ($650\dots 550^\circ\text{C}$). Основными недостатками воды являются:

- 1) большая скорость охлаждения в районе мартенситного превращения ($300\dots 200^\circ\text{C}$);
- 2) резкое снижение закалывающей способности с повышением температуры воды.

Закалывающая способность воды может быть усилена путем растворения в ней солей, кислот, щелочей (таблица 6.2), или замедлена путем подогрева или добавки мыла.

Таблица 6.2 – Скорость охлаждения сталей в различных средах

Закалочная среда	Скорость охлаждения град/с при температурах, °С	
	650–50	300–200
Вода при температуре, °С		
18	600	270
28	500	270
50	100	270
10% раствор NaOH в воде при 18 °С	1200	300
10% раствор NaCl в воде при 18°С	1100	300
Минеральное масло	100–150	20–50
Спокойный воздух	30	10

Масло как охлаждающая среда применяется при закалке легированных сталей, критическая скорость закалки которых значительно ниже, чем у углеродистых сталей. Масло в районе наименьшей устойчивости аустенита охлаждается примерно в 5...7 раз медленнее, чем вода, а в районе мартенситных превращений – в 10...15 раз медленнее, чем вода. Закаливающая способность масла слабо меняется с повышением его температуры. К недостаткам масла как закалочной среды относятся: огнеопасность, постепенное загустение масла (снижает закаливающую способность), пригорание масла на деталях.

Таким образом, любые применяемые охлаждающие среды не удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к идеальному охладителю. Поэтому (наряду с закалкой в одном охладителе) применяются следующие методы закалок, назначение которых – уменьшение внутренних напряжений.

Закалка непрерывная (в одном охладителе) (рисунок 6.3, а). Деталь нагревают до температуры закалки, быстро переносят в охладитель (вода, масло и др.). Недостаток этого способа закалки заключается в том, что (вследствие неравномерного охлаждения по сечению) в детали возникают большие термические напряжения. Этот метод применяется для закалки деталей простой формы и крупного сечения.

Прерывистая закалка (в двух средах) (рисунок 6.3, б). Нагретые для закалки изделия охлаждают со скоростью выше критической (обычно в воде) до температуры несколько выше M_n . Затем изделие

переносится в менее интенсивный охладитель (обычно масло или воздух). При таком методе закалки превращение аустенита в мартенсит протекает в условиях замедленного охлаждения, поэтому происходит частичное перераспределение структурных напряжений. Закалка в двух средах применяется для заэвтектоидных углеродистых сталей и требует высокой квалификации термиста.

Ступенчатая закалка (рисунок 6.3, б). Нагретое для закалки изделие охлаждают со скоростью больше критической в среде, имеющей температуру несколько выше M_n (обычно 180...250°C), выдерживают в ней сравнительно короткое время, не доходя до начала превращения аустенита. После изотермической выдержки изделие охлаждают в масле или на воздухе до комнатных температур. Изотермическая выдержка обеспечивает выравнивание температуры по всему сечению изделия, однако ее продолжительность не должна привести к распаду аустенита на феррито-цементитную смесь. Этот метод обеспечивает закалку с минимальным внутренним напряжением и применяется для деталей сложной конфигурации. Недостатком метода является невозможность его использования для закалки деталей крупных сечений, а так же потребность в дополнительном оборудовании.

Изотермическая закалка (рисунок 6.3, г) производится так же, как и ступенчатая, однако продолжительность изотермической выдержки должна обеспечить распад аустенита в феррито-цементитную смесь – игольчатый троостит. Можно получить различные структуры распада переохлажденного аустенита в зависимости от температуры изотермической выдержки. После распада аустенита охлаждать изделие можно с любой скоростью, поэтому обычно это делают на воздухе. Изделия после изотермической закалки имеют твердость несколько меньшую, чем изделия с мартенситной структурой, однако комплекс их механических свойств (прочность, пластичность, ударная вязкость) является оптимальным для широкого круга углеродистых и легированных сталей. Внутренние напряжения и деформация при такой закалке минимальные.

Закалка с самоотпуском. Изделие погружают в закалочную среду, но выдерживают в ней непродолжительное время. Затем изделие извлекают и охлаждают на воздухе. Наружные слои изделия претерпевают мартенситное превращение, затем (после извлечения из закалочной среды) температура изделия выравнивается. При этом

наружные слои изделия за счет тепла внутренних слоев нагреваются до температур отпуска.

Закалка с самоотпуском применяется для деталей, которые должны сочетать высокую твердость на рабочей части с вязкой и прочной основой (зубила, молотки, лемеха и т. д.). Этот метод также эффективно применяется при поверхностной закалке с использованием нагрева токами высокой частоты. В процессе закалки охлаждение детали прекращают с таким расчетом, чтобы тепло незакаленной части детали могло разогреть закаленную часть до температуры требуемого отпуска.

Отпуск, его виды и применение

Отпуск – операция термической обработки, при которой закаленная сталь нагревается до температур, лежащих ниже критической точки A_{C1} , выдерживается при данной температуре и охлаждается (обычно на воздухе). При отпуске происходит переход стали в более устойчивое состояние, которое сопровождается превращениями структуры.

Структура стали после закалки (кроме изотермической) представляет собой *мартенсит* и *аустенит остаточный*. Эти структурные составляющие являются неустойчивыми, поэтому нагрев способствует их переходу в более устойчивое состояние, т. е. в структуру феррито-цементитной смеси.

Структурные превращения при отпуске связаны с процессами распада твердых растворов мартенсита и остаточного аустенита и образованием при нагреве до определенных температур мелкодисперсных зернистых структур – троостита и сорбита. В зависимости от требуемых свойств (рисунок 6.5) различают три вида отпуска.

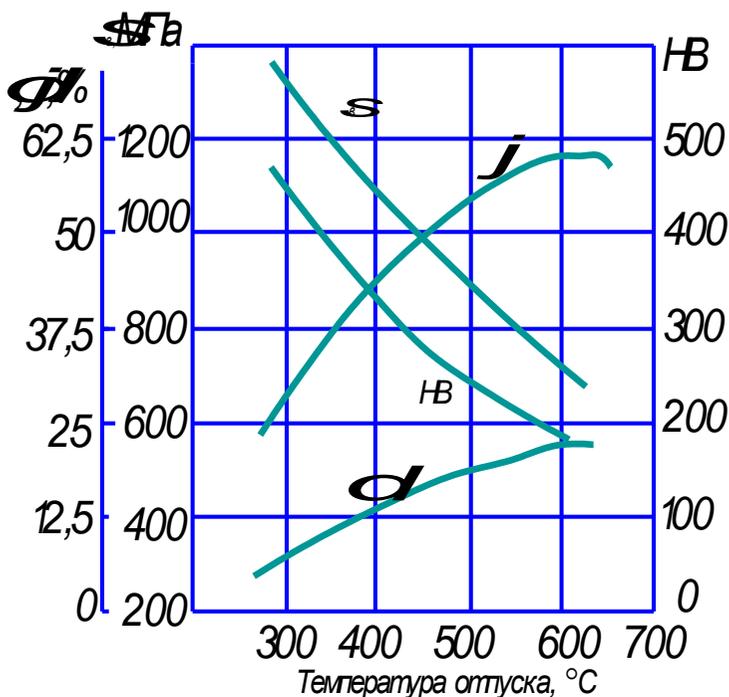


Рисунок 6.5 – Механические свойства стали 40 в зависимости от температуры отпуска

Низкий отпуск – процесс, который включает нагрев закаленной стали до 150...200°C, выдержку в течение 2,0...3,0 ч, охлаждение на воздухе. Структура – *мартенсит отпуска*. Цель – частичное снятие внутренних напряжений, повышение вязкости и пластичности стали без значительного снижения твердости. Этому виду отпуска подвергают детали и изделия, которым требуется высокая твердость и износостойчивость (мерительный и режущий инструменты, детали после цементации и азотирования).

Средний отпуск включает нагрев закаленной стали до 300...400°C, выдержку в течение 1,0...2,0 ч, охлаждение на воздухе. Структура – *троостит отпуска*. Цель – повышение упругих свойств стали при некотором снижении твердости, прочности и ударной вязкости. Этому виду отпуска подвергают детали, высокие упругие свойства которых имеют первостепенное значение (ресорсы и пружины).

Высокий отпуск включает нагрев закаленной стали до 500...600°C, выдержку в течение 0,5...1,0 ч, охлаждение на воздухе. Структура – *сорбит отпуска*. Цель – снятие напряжений и получение наиболее оптимального сочетания прочности, пластичности, ударной вязкости.

Сочетание закалки и высокого отпуска в ТО называют *улучшением стали*. Улучшению подвергают стальные детали машин ответственного назначения, испытывающие в процессе эксплуатации статические, динамические и знакопеременные нагрузки, не требующие высокой твердости. Содержание углерода в углеродистых и легированных сталях, обычно подвергаемых термическому улучшению, 0,3–0,5% С.

Термомеханическая обработка стали

Термомеханическая обработка (ТМО) заключается в сочетании пластической деформации стали в аустенитном состоянии с ее закалкой. Формирование структуры происходит в условиях закалки наклепанного металла. Наиболее часто применяют следующие два основных способа ТМО.

Высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО) включает деформацию стали при температуре устойчивого аустенита, немедленную (во избежание развития процесса рекристаллизации) закалку после деформации, отпуск при температуре 150...300°C (для снижения внутренних напряжений и повышения пластичности и вязкости стали (рисунок 6.6, а).

Низкотемпературная термомеханическая обработка (НТМО) включает нагрев стали до температур устойчивого аустенита, выдержку, быстрое охлаждение до температур наименьшей устойчивости переохлажденного аустенита, пластическую деформацию в этом интервале температур, последующую немедленную закалку и отпуск при температуре 150...300°C (рисунок 6.6, б).

В настоящее время для некоторых сталей применяют ТМО с обратной последовательностью выполнения операций. Такая обработка называется *механико-термической обработкой* (МТО) и включает операции в следующей последовательности: нагрев и выдержка стали при температурах устойчивого аустенита, закалка на мартенсит, малая пластическая деформация (3...5%), низкий отпуск (рисунок 6.6, в).

Термомеханическая обработка позволяет получить наиболее высокие механические свойства сталей. Наибольшее упрочнение –

предел прочности, равный 2600...3000 МПа, достигается при НТМО.

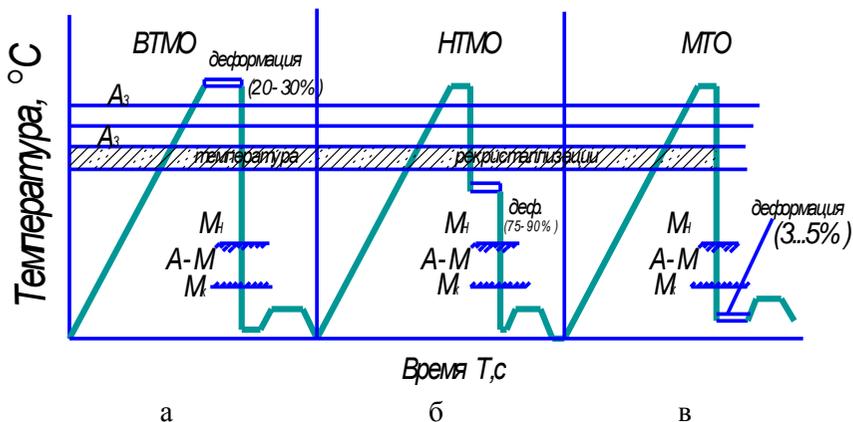


Рисунок 6.6 – Схемы термомеханической обработки стали

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое полная закалка?
2. Что такое неполная закалка?
3. Как проводится непрерывная закалка?
4. Как проводится прерывистая закалка?
5. Как проводится ступенчатая закалка?
6. Как проводится изотермическая закалка?
7. Как проводится закалка с самоотпуском?
8. Что такое отжиг?
9. Что такое нормализация?
10. Что такое отпуск?
11. Как влияет температура отпуска на механические свойства сталей?
12. Какие существуют виды отпуска?

Тема 7

Поверхностное упрочнение сталей

Значительная доля деталей машин работает в условиях трения и выходит из строя в результате изменения геометрических размеров вследствие износа. Для таких деталей, как правило, требуется высокая твердость и износоустойчивость поверхности (при сохранении вязкой и достаточно прочной сердцевины). Для придания стальным деталям таких свойств применяют поверхностную закалку, химико-термическую обработку, поверхностное упрочнение давлением и др. Поверхностная закалка выгодно отличается значительно меньшей продолжительностью процесса.

Поверхностная закалка сталей

Сущность поверхностной закалки состоит в том, что поверхностные слои детали быстро нагреваются выше *критических* температурных точек и создается резкий перепад температур по сечению (рисунок 7.1). Если нагрев прервать и провести охлаждение со скоростью выше *критической*, то слой металла, нагретый выше A_{C3} (I) получит *полную закалку*; слой, нагретый выше A_{C3} , но ниже A_{C1} (II), – *неполную закалку*; сердцевина, нагретая до температур ниже A_{C1} (III), закалки не получит.

Нагрев поверхностных слоев при любом методе (токами высокой частоты, в расплавленных металлах или солях, пламенем горелки или лазером) осуществляется очень быстро и не приводит к росту зерна аустенита. Температура нагрева стали для поверхностной закалки назначается в соответствии с диаграммой состояния железо-углеродистых сплавов и берется на 30–50°C выше, чем при обычной закалке. Поверхностной закалке, как и объемной, подвергают стали с содержанием углерода не ниже 0,3%, после нормализации или улучшения. Химический состав изделия по сечению не изменяется, меняется только структура. Чаще всего используются стали с содержанием углерода 0,4–0,45%.

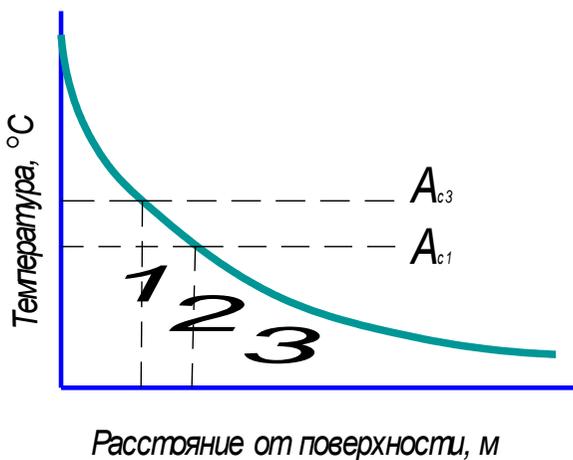


Рисунок 7.1 – Распределение температур по глубине при поверхностной закалке

Закалочной средой после нагрева могут быть вода, водные растворы солей и щелочей. Охлаждение может быть струйчатым или с полным погружением в закалочную среду.

Закалка с помощью индукционного нагрева

Индукционный нагрев происходит вследствие теплового действия тока, индуцируемого в изделии, помещенном в переменное магнитное поле. Для нагрева изделие устанавливают в индуктор, который представляет собой один или несколько витков водоохлаждаемой медной трубки. Переменный ток протекает через индуктор, создает переменное электрическое поле. В результате индукции в поверхностном слое возникают вихревые токи, и в обрабатываемом изделии происходит выделение тепла.

Распределение переменного тока по сечению нагреваемого металла неравномерно. Плотность тока на поверхности больше, чем в сердцевине. Глубина проникновения тока δ определяется по формуле

$$\delta = 50,3 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \omega}},$$

где δ – глубина проникновения тока, м;

ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м;

μ – магнитная проницаемость, Гс/Э;

ω – частота тока, Гц;

Из приведенного уравнения видно, что глубина проникновения тока практически определяется частотой тока ω . Для получения закаленного слоя толщиной 1,0 мм оптимальная частота тока составляет 50000–60000 Гц, для слоя 2,0 мм – 15000 Гц, для слоя 4,0 мм всего ~ 4000 Гц. Чаще всего применяют для закалки частоту тока 60000 Гц или 44000 Гц.

Выбор оптимальной толщины закаливаемого слоя определяется условиями работы детали. Если изделие работает только на износ, толщину закаленного слоя принимают 1,5...3,0 мм, в условиях высоких контактных нагрузок и перешлифовки – 4...5 мм. В особых случаях толщина закаленного слоя достигает 10...15 мм.

На основании производственного опыта установлено, что площадь сечения закаленного слоя должна быть не более 20% всего сечения.

Существуют следующие способы закалки с помощью индукционного нагрева:

1) одновременный нагрев и охлаждение всей поверхности – для изделий, имеющих небольшую поверхность (пальцы, валики, осевые инструменты);

2) последовательный нагрев и охлаждение отдельных участков – при закалке шеек коленчатых валов, зубчатых колес, кулачков распределительных валов;

3) непрерывно последовательный нагрев и охлаждение детали. При этом методе изделие перемещается относительно зафиксированного индуктора и охлаждающего устройства.

После закалки с индукционным нагревом изделия подвергают низкому отпуску при 160–200°C, зачастую используют самоотпуск.

Поверхностная закалка при глубинном индукционном нагреве

В этом случае глубина нагрева до надкритических температур больше, чем глубина закалки. Глубина закалки определяется не глубиной нагрева, а *прокаливаемостью* стали. В процессе закалки скорость охлаждения наружных слоев детали превышает критическую, скорость охлаждения последующих слоев ниже критической, поэтому после закалки на поверхности образуется мартенсит, а в сердцевине – сорбит или троостит. Такой метод поверхностной за-

калки позволяет придать деталям наиболее оптимальный комплекс механических свойств.

Поверхностная закалка при глубинном нагреве имеет следующие преимущества перед другими методами упрочнения стальных деталей:

по сравнению с термическим улучшением при равной твердости сердцевины образуется более твердый и прочный поверхностный слой;

серцевина нормализованной стали (по сравнению с обычной поверхностной закалкой) имеет большую твердость и прочность, что обуславливает лучшее сочетание прочностных свойств при работе на изгиб и кручение.

Для глубинного нагрева используются специально разработанные стали пониженной или регламентированной прокаливаемости. Это достигается ограничением содержания в них примесей (марганец, кремний, хром, никель и др.). Например, сталь пониженной прокаливаемости 55ПШ содержит 0,55...0,63% углерода и менее 0,5% таких примесей, как кремний, марганец, никель, медь.

Индукционный нагрев на большую глубину требует меньшей частоты переменного тока и меньшей удельной мощности установки, чем при обычной поверхностной закалке.

Индукционный нагрев для обоих методов поверхностной закалки позволяет сократить длительность термической обработки, получать изделия без окалины, уменьшить деформацию и коробление изделий в процессе термической обработки.

Поверхностная закалка с индукционным нагревом эффективна для серийного и массового производства деталей простой конфигурации. Она находит широкое применение для изготовления деталей типа валов, осей, коленчатых валов, распределительных валиков, шестерен автомобилей, тракторов и других сельскохозяйственных машин.

Закалка с газопламенным нагревом

Этот способ закалки применяют для крупных изделий сложной формы, которые трудно или невозможно подвергать индукционному нагреву, и для производства единичных изделий. Поверхность детали нагревают пламенем смеси горючих газов (ацетилен, пропан-бутан, природный газ, пары керосина) с кислородом. Для нагрева используют щелевые или многопламенные горелки.

Толщина закаленного слоя составляет обычно 2...4 мм, его твердость 50...56 HRC. В тонком поверхностном слое образуется мар-

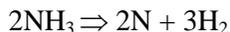
тенсит, а в глубинных слоях – троостит-мартенсит. По сравнению с объемной закалкой поверхностная пламенная закалка вызывает меньшие деформации и окисление поверхности.

Основы теории химико-термической обработки

Химико-термическая обработка (ХТО) сочетает термическое и химическое воздействия с целью изменения химического состава, структуры и свойств поверхностного слоя сплава. ХТО осуществляется в результате диффузионного насыщения сплава (стали) неметаллами (углерод, азот, бор), или металлами (алюминий, хром, цинк и др.) в активной насыщающей среде.

Физическая сущность ХТО:

1) *диссоциация* – образование во внешней насыщающей среде активных атомов диффундирующего вещества, например, диссоциация аммиака с выделением активного азота по реакции



или углерода по реакции $2\text{CO} \Rightarrow \text{C} + \text{CO}_2$;

2) *абсорбция*, т. е. поглощение поверхностью основного металла свободных атомов диффундирующего вещества. Это возможно, если насыщающий элемент и основной металл образуют между собой твердые растворы или химические соединения;

3) *диффузия*, т. е. перемещение этих атомов вовнутрь основного металла.

Когда процесс протекает многостадийно, его суммарная скорость определяется скоростью наиболее медленной стадии, которая является *лимитирующей*. При протекании процессов ХТО в большинстве случаев скорость процесса лимитируется диффузией. Поэтому все факторы, ускоряющие процесс диффузии (повышение температуры и градиента концентрации, структурные дефекты и т. д.), сокращают длительность технологического процесса ХТО.

Глубина проникновения (диффузии) зависит от температуры и продолжительности насыщения, а также от концентрации диффундирующего элемента на поверхности.

Толщину и распределение концентрации по толщине диффузионного слоя определяют методами послойного химического, спектрального анализа или измерением характеристик, зависящих от концентрации (например, микротвердость).

Виды химико-термической обработки

Цементация стали

Цементацией (науглероживанием) стали называется ХТО, которая заключается в диффузионном насыщении поверхностного слоя низкоуглеродистой стали углеродом при нагревании до 900...950°C в углеродосодержащей среде. Назначение цементации и последующей термической обработки – придать поверхностному слою высокую твердость и износостойкость, повысить предел выносливости при сохранении вязкой сердцевины.

На цементацию детали поступают после лезвийной механической обработки с припуском 0,015...0,25 мм на шлифование.

Некоторые детали, например, зубчатые колеса сельхозмашин и автомобилей проходят цементацию без припуска после окончательной механической обработки. Во многих случаях цементации подвергается только часть детали. Тогда участки, не подлежащие упрочнению, защищают тонким слоем меди, наносимой электролитическим способом, или изолируют специальными обмазками (тальк, бура, каолин и др.), которые разводят на жидком стекле.

Концентрация углерода в поверхностном слое должна составлять 0,8...1,0%. Для получения наиболее высоких характеристик твердости и сопротивления контактной усталости содержание углерода может быть повышено до 1,1...1,2%. Однако дальнейшее повышение его содержания вызывает ухудшение механических свойств обрабатываемого изделия.

Для цементации применяют низкоуглеродистые стали (0,1...0,25% С). Легирующие элементы, присутствующие в стали, оказывают влияние на структуру *цементуемого* слоя, механизм его образования и скорость диффузии. В случае цементации сталей, легированных карбидообразующими элементами (хром, вольфрам, ванадий), концентрация углерода достигает 1,8... 2,0%.

Для цементации наиболее часто применяют низколегированные стали марок 18 ХГТ, 30 ХГТ, 20 ХГТ, 25 ХГМ (Х – хром, Г – марганец, М – молибден).

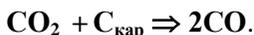
Цементация в твердом карбюризаторе. В этом процессе насыщающей средой является твердый карбюризатор (дубовый или березовый уголь, каменноугольный полукокс, торфяной кокс). Для ускорения процесса к карбюризатору добавляют активизаторы: углекислый барий и кальцинированную соду.

Детали укладывают в сварной металлический ящик и засыпают карбюризатором и активатором (20... 25% от всего угля). Карбюризатор с активатором составляют ~ 50% объема ящика. Карбюризатор уплотняют, ящик замазывают глиной, вставляют «свидетели». Затем ящик ставят в подогретую до 600°C печь и вместе с печью нагревают до температуры цементации, выдерживают определенное время. В расчетное время «свидетели» вынимают, закаливают, ломают, определяют глубину науглероженного слоя и уточняют продолжительность цементации. Предварительно продолжительность цементации устанавливают из расчета 0,10...0,12 мм в час.

При нагревании углерод карбюризатора образует с кислородом, находящимся в изолированном ящике, окись углерода CO, которая на поверхности детали разлагается по реакции

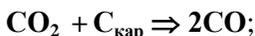


Активный (атомарный) углерод диффундирует в металл, а двуокись углерода в условиях избытка углерода карбюризатора вновь превращается в окись углерода:



Таким образом, окись углерода в замкнутом пространстве ящика является переносчиком и источником образования атомарного углерода.

Одновременно идут реакции разложения углекислых солей:

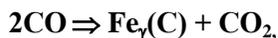
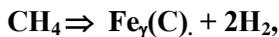


Таким образом, при твердом карбюризаторе процесс идет в газовой среде. После цементации ящик охлаждают на воздухе до 400...500°C и затем раскрывают.

Газовая цементация. Газовая цементация осуществляется в карбюризаторе, представляющем собой многокомпонентную систему, состоящую из N₂-CO₂-CO-H₂-H₂O-CH₄, получаемую из природного газа или пропанбутановых смесей в специальных генераторах. N₂, CO₂, H₂ выполняют функции газа-носителя, а CO, CH₄ и другие углеводороды представляют собой активный газ:



Основными реакциями, обеспечивающими науглероживание, являются процессы:



Газовую цементацию обычно осуществляют при 930...950°C в шахтных печах или печах непрерывного действия.

Типовой режим цементации (с последующей обработкой деталей из низколегированных сталей типа 18ХГТ в печи непрерывного действия) приведен на рисунке 7.2.

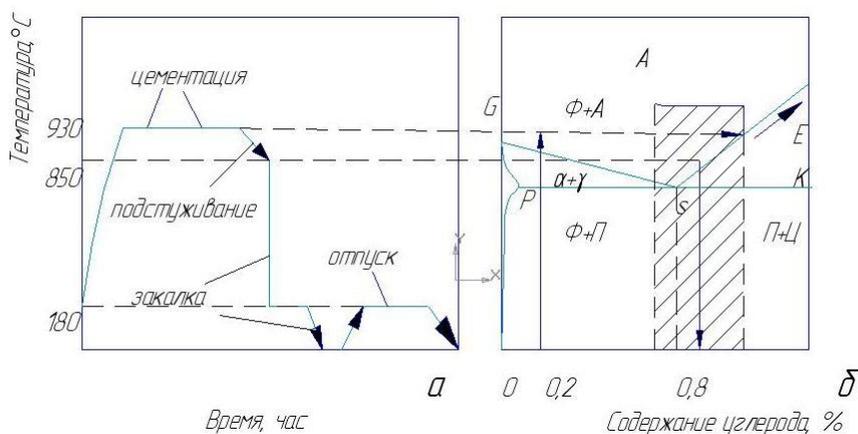


Рисунок 7.2 – Схема цементации в проходных печах и последующей закалки и отпуска.

Режим включает в себя нагрев до 930°C, цементацию при этой температуре, подстуживание до 850°C, ступенчатую закалку (сначала в масле при температуре 180°C, затем в холодном масле) и отпуск при 180°C.

Подстуживание при 850°C позволяет обеспечить заданную концентрацию углерода (0,8...1,0%) в поверхностном слое цементуемых деталей.

Режим, показанный на рисунке 7.2, предусматривает закалку непосредственно после цементации. Однако в процессе длительной ХТО (6...12 часов в печах непрерывного действия или 3...10 часов в шахтных печах) неизбежно увеличивается зерно сердцевины и по-

верхностного слоя, образуется карбидная сетка в цементованном слое. Поэтому непосредственную закалку применяют только в случае, когда изделия изготовлены из наследственно мелкозернистой стали.

После цементации изделий из других сталей и особенно после цементации в твердом карбюризаторе термическая обработка иногда состоит из двойной закалки и отпуска.

Первую закалку (или нормализацию) с нагревом до 880...900°C назначают для исправления структуры сердцевины. Вторую закалку проводят с нагревом до 760...780°C для устранения перегрева цементованного слоя и придания ему высокой твердости. Недостаток такой термообработки заключается в ее сложности, повышенном короблении изделий, возможности окисления и обезуглероживания. Заключительной операцией термической обработки цементованных изделий всегда является низкий отпуск при 170...180°C, переводящий мартенсит закалки в отпущенный мартенсит и снижающий остаточные напряжения.

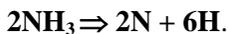
Азотирование стали

Азотированием называется процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали азотом при нагревании в соответствующей среде. Азотирование сильно повышает твердость поверхностного слоя (до 1000 НV), его износостойкость, предел выносливости и сопротивление коррозии. Твердость азотированного слоя значительно выше, чем после цементации, сохраняется при нагреве до 600...650°C. Твердость цементованного слоя сохраняется только до 200...250°C.

Азотированный слой приобретает высокую твердость без какой-либо последующей термической обработки, поэтому азотированию подвергают готовые изделия, прошедшие окончательную термическую обработку и шлифование.

Азотирование широко используют для упрочнения таких изделий как гильзы цилиндров и клапаны изделий, коленчатые валы дизелей, валы, планки, трубчатые изделия в станкостроении, зубчатые колеса в станкостроении, детали турбин.

Азотирование в газовых средах. Азотирование в газовых средах осуществляют в атмосфере аммиака NH_3 , который при нагревании до 500...520°C диссоциирует на 15...25%, а при нагреве до 600...650°C – на 40...50% по следующей реакции:



Образующийся атомарный азот диффундирует в железо или сталь с образованием вначале α -фазы. После достижения предела насыщения α -фазы начинает образовываться следующая γ -фаза, стабильная при данной температуре.

Азотирование железа не приводит к получению поверхностного слоя высокой твердости. Поэтому азотированию подвергают среднеуглеродистые легированные стали, которые приобретают особо высокую твердость и износостойкость. При азотировании легированных сталей образуются нитриды элементов, имеющих высокое сродство с азотом (V, Cr, Mo, Ti, Al). Наиболее часто азотированию подвергают изделия из сталей 40X, 30XMA, 38 XHBA, 40XФА, 38XГМ. Азотированию подвергают штамповые и быстрорежущие стали, а также изделия из высокопрочного чугуна.

Технологический процесс азотирования включает следующие операции:

- предварительная термическая обработка (закалка + высокий отпуск);
- механическая обработка деталей, включая шлифование;
- защита участков детали, не подлежащих азотированию, нанесением тонкого слоя олова электролитическим методом или жидкого стекла;
- непосредственное азотирование;
- окончательное шлифование или доводка изделий.

Для азотирования используют печи периодического и непрерывного действия различных конструкций, в которых контролируют температуру, продолжительность выдержки, расход, давление и степень диссоциации аммиака.

Азотирование в жидких средах. Жидким азотированием называется ХТО, которая заключается в диффузионном насыщении стали азотом при температуре 560... 580°C в расплаве, содержащем цианистые соли.

Расплав солей (KCN, NaCN и Na_2CO_3) продувают сухим воздухом, что приводит к разложению солей, образованию атомарных углерода и азота. Температурные условия не позволяют насытить сталь углеродом, азот же в течение 0,5...3,0 ч образует азотированный слой глубиной 0,15...0,5 мм.

Достоинствами данного процесса являются:

- незначительное изменение размеров;
- отсутствие коробления деталей;
- небольшая длительность процесса.

Недостаток – токсичность и высокая стоимость цианистых солей.

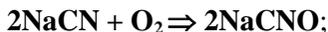
Азотирование в жидких средах применяют для упрочнения деталей широкой номенклатуры (кулачковые и коленчатые валы, зубчатые колеса, шпиндели, клапаны автомобилей).

Цианирование и нитроцементация стали

Цианированием и нитроцементацией называют процессы совместного насыщения поверхности стали углеродом и азотом. Назначение процессов – повышение твердости и износостойкости стальных изделий.

Цианирование осуществляется при погружении изделий в нагретые до 820...860°C расплавленные соли. Продолжительность процесса определяется получением требуемой толщины упрочненного слоя деталей, обычно составляет 0,5...1,5 ч.

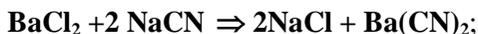
При осуществлении процесса в жидких средах происходят следующие реакции:



Выделяющиеся атомарный углерод и азот диффундируют в сталь. Данная температура процесса и его продолжительность позволяют получить содержание углерода в поверхностном слое 0,6...0,7%, содержание азота в цианированном слое 0,8...1,2%.

После цианирования изделия подвергают закалке (непосредственно из ванны). После закалки изделия подвергают низкому отпуску при температуре 180... 200°C.

Для получения упрочненного слоя большой толщины (0,5...2,0 мм) применяют *глубокое цианирование* при температуре 930...960°C в ванне, содержащей NaCN, BaCl₂ и NaCl. Время выдержки 1,5...6,0 ч. При глубоком цианировании протекают следующие реакции:



Содержание элементов в упрочненном слое следующее: 0,8...1,2% углерода, 0,2...0,3% азота.

Преимущества и недостатки глубокого цианирования такие же, как и у азотирования в жидких средах.

Нитроцементацию осуществляют в течение 2...10 ч при температуре 850...860°C в газовой среде, содержащей науглероживающий газ и аммиак ($\text{CH}_4 + 30\% \text{NH}_3$). Глубина упрочненного слоя составляет обычно 0,2...0,8 мм.

После нитроцементации изделия подвергают закалке либо непосредственно из печи, либо с подстуживанием до 800...825°C, либо после повторного нагрева. После закалки проводят низкий отпуск при 160...180°C.

Нитроцементации подвергают изделия из низкоуглеродистой стали (до 0,3% C) сложной конфигурации, склонные к короблению. В связи с тем, что процесс протекает при температурах ~ на 100°C ниже, чем при цементации, удается снизить брак, причиной которого являются температурные напряжения.

Исключительно высокой твердостью (до 2000 HV) и высоким сопротивлением абразивному износу обладают стали после *борирования* – насыщения поверхностных слоев бором, однако они отличаются очень большой хрупкостью.

Диффузионная металлизация

Диффузионная металлизация – процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали различными металлами, например, процесс насыщения хромом – *хромирование*, алюминием – *алитирование*, кремнием – *силицирование*, цинком – *цинкование*.

Комбинированные процессы, заключающиеся в одновременном насыщении стали хромом и алюминием, хромом и вольфрамом, называют *хромоалитированием*, *хромовольфрамообразованием* соответственно и т. п.

Диффузионную металлизацию можно проводить в твердых, жидких и газовых средах.

При *твердой металлизации* металлизаторами являются ферросплавы (FeCr, FeSi, FeAl) – сплавы железа с высоким содержанием этих элементов, с добавлением хлористого аммония (NH_4Cl). В результате реакции образуются соединения хлора с металлами (CrCl_3 , SiCl_3 , AlCl_3), которые при контакте с металлической поверхностью диссоциируют с образованием свободных атомов.

Жидкую диффузионную металлизацию осуществляют погружением детали в расплавленный металл (например, алюминий).

Газовую диффузионную металлизацию проводят в газовых средах, являющихся хлоридами разных металлов (CrCl_3 , SiCl_3 , AlCl_3).

Диффузия хрома, алюминия и других металлов протекает значительно медленнее, чем углерода, азота, бора, потому что последние образуют с железом твердые растворы внедрения, а металлы – твердые растворы замещения. При одинаковых условиях (температура, давление) диффузионные слои при металлизации в 10, 100 раз тоньше, чем при ХТО неметаллами.

Малая скорость диффузии препятствует широкому распространению процессов диффузионной металлизации, т. к. процесс дорогостоящий, проводится при повышенных температурах (1000 – 1200°С) и длительное время. Только особые свойства получаемых металлизированных слоев, возможность экономии легирующих элементов обусловили некоторое применение данных процессов.

Одним из основных свойств диффузионной металлической поверхности (например, хромированной, алитированной) является *жаростойкость*. Поэтому жаростойкие детали, используемые для работы при температурах 1000–1200°С, изготавливают из простых углеродистых сталей с последующими операциями металлизации.

При выборе способа и технологии поверхностного упрочнения стальных изделий необходимо учитывать не только условия их эксплуатации, но и возможные изменения размеров и формы, а также характер их производства (единичный, серийный, массовый), производительность процесса, возможность его автоматизации и механизации и т. п.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите способы поверхностной закалки.
2. Назовите методы поверхностного упрочнения стальных деталей.
3. С какой целью проводится химико-термическая обработка?
4. Что такое цементация?
5. Какую термическую обработку проводят после цементации?
6. Для сталей с каким содержанием углерода применяется цементация?
7. В каких средах может осуществляться цементация?
8. Что такое азотирование?
9. Что такое цианирование?
10. Что такое нитроцементация?
11. Что такое диффузионная металлизация?
12. Охарактеризуйте физическую сущность химико-термической обработки.

Тема 8 Инструментальные стали и сплавы

Классификация и свойства инструментальных сталей

Инструментальные материалы подразделяют на инструментальные стали, твердые сплавы и сверхтвердые материалы (алмаз и кубический нитрид бора).

Наиболее обширную и важную в практическом отношении группу составляют **инструментальные стали** (> 90%). Инструментальные стали, имеющие высокие твердость, износостойкость и прочность, предназначены для изготовления режущего и измерительного инструментов, штампов холодного и горячего деформирования, а также ряда деталей точных механизмов (пружин, шестерен) различной формы и размеров.

Для лучшей ориентации при выборе сталей проводят их классификацию по двум основным признакам: назначению и свойствам.

Следующие стали предназначены для изготовления инструментов четырех основных типов:

- 1) режущих (У8, У12, Х, Х9, 9ХС, Р12, Р9 и др.);
- 2) измерительных (У8, У12, Х, ХГ, ХВГ, Х12М1 и др.);
- 3) штампов холодного деформирования (У8, У12, 9ХС и др.);
- 4) штампов горячего деформирования (5ХНМ, 5Х4С, 7Х3 и др.).

Номенклатура и условия работы инструментов каждого типа отличаются большим разнообразием. Только режущих инструментов существует более тысячи типоразмеров. Характерным условием эксплуатации инструментов (особенно режущих и штамповых) является возникновение высоких контактных давлений на их рабочей кромке, вызывающих ее изнашивание.

Для правильного выбора марки стали и режима термической обработки необходимо знать условия работы инструмента, требования, предъявляемые к нему. В зависимости от условий эксплуатации рабочая часть инструментов может нагреваться (до 500–700°С у режущих инструментов, до 800°С – у штампов). Чтобы инструменты не теряли при этом работоспособность, у них не должны меняться структура и свойства.

Необходимый уровень основных служебных свойств (теплостойкость, износостойкость, прочность и вязкость) для инструментов каждого типа различен. Причем требуемое сочетание отдельных свойств (например, высокой твердости и ударной вязкости) во многих случаях трудно обеспечить. Предпочтение отдается одному или нескольким свойствам, которые в наибольшей степени отвечают за *работоспособность* инструментов данного типа.

Способность стали сохранять при повышенных температурах эксплуатационные свойства (высокие твердость, прочность и износостойкость) называется **теплостойкостью** или **красностойкостью**. Это технологическое свойство, определяемое по максимальной температуре, при нагреве до которой сталь в течение заданного времени (4 часа) сохраняет твердость. Теплостойкость создается специальным легированием (W, Mo, V, Cr и др.) и термической обработкой. Инструментальные стали для обеспечения высокой твердости и прочности содержат не менее 0,6% углерода и подвергаются закалке с низким отпуском для обеспечения твердости 60...65 HRC, предела прочности при изгибе 250...350 МПа.

Для уменьшения скорости изнашивания инструментов стали должны обладать достаточной **износостойкостью**, обеспечивающей длительное сохранение размеров и формы рабочей части. Износостойкость определяется твердостью и микроструктурой стали. Наиболее износостойка сталь, имеющая структуру мартенсита с равномерно расположенными в нем карбидами W, Mo, V, Cr и др.

Работе многих инструментов сопутствуют также высокие статистические напряжения, чаще всего изгиба или кручения. Для того, чтобы исключить поломку инструментов от этих напряжений материал должен обладать высокой **прочностью**.

Для штампов, фрез и других инструментов характерно ударное нагружение. В этом случае значение приобретает **ударная вязкость** материала.

Для инструментальных сталей (кроме служебных свойств) большое значение имеют такие технологические свойства, как прокаливаемость, малые объемные изменения при закалке, обрабатываемость резанием и давлением, шлифуемость.

Классификация инструментальных сталей по свойствам предложена Ю. А. Геллером (рисунок 8.1). Примерное назначение инструментальных сталей приведено в таблице 8.1.

Инструментальные стали различной прокаливаемости

Важной характеристикой стали является **прокаливаемость** – глубина проникновения закаленной зоны. Она определяется скоростью охлаждения при закалке по сечению заготовки.

Прокаливаемость стали может быть повышена легированием ее хромом, марганцем. Стали повышенной прокаливаемости используют для изготовления крупных инструментов. В этом случае учитывается интервал устойчивости переохлажденного аустенита, снижается критическая скорость закалки.

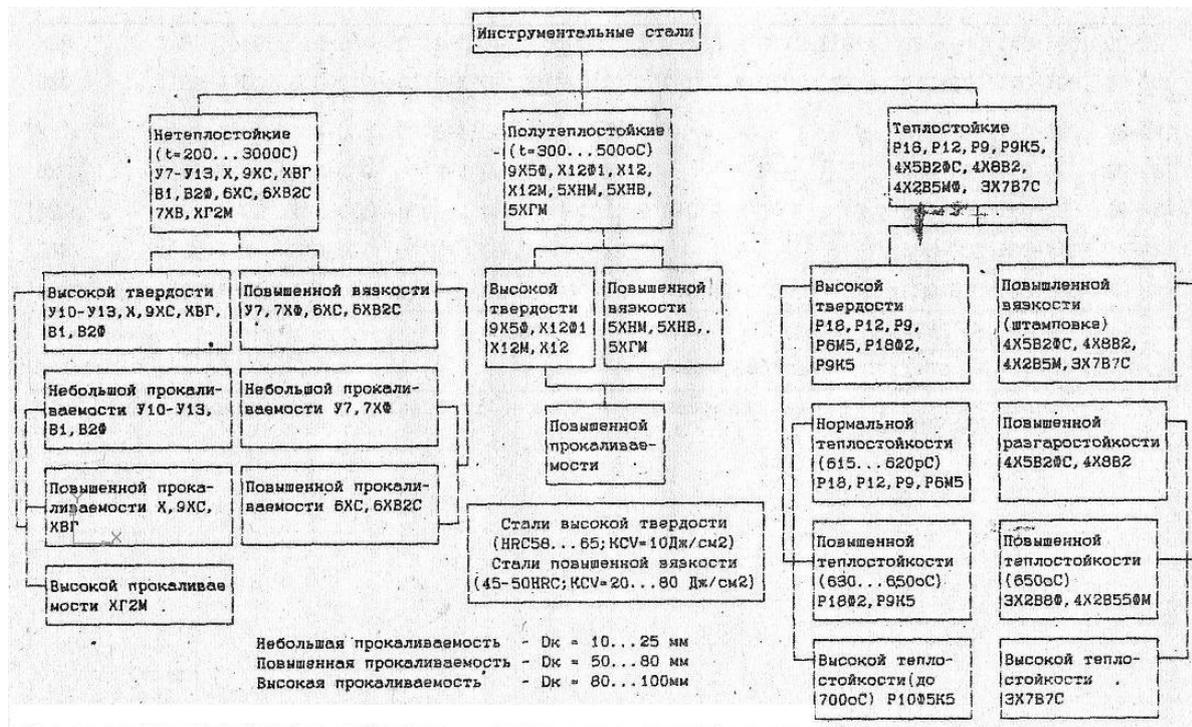


Рис 8.1 – Схема классификации инструментальных сталей
(по Ю.Ф.Геллеру)

Инструментальные стали делятся на две категории:

1) *пониженной прокаливаемости* (углеродистые – У8–У12 и низколегированные – Х05, 65ХФ, 7ХФ, 85ХФ);

2) *повышенной прокаливаемости* (легированные – Х, 9ХС, ХГ, В1, В5)

Инструментальные стали *пониженной прокаливаемости* с небольшим содержанием легирующих элементов отличаются слабой прокаливаемостью, закаляются в воде, а инструменты из них, как правило, имеет незакаленную сердцевину (до 10...25 мм).

Инструментальные стали *повышенной прокаливаемости* с содержанием легирующих элементов 1–3%. Инструменты из них закаляются в масле и прокаливаются, как правило, насквозь до 80...100 мм. Меньшая скорость охлаждения при закалке уменьшает опасность образования трещин, деформации и коробления, что особенно важно для многих видов инструментов, имеющих сложную конфигурацию.

Инструментальные стали с разной теплостойкостью

По *теплостойкости* стали классифицируются на *нетеплостойкие*, *полутеплостойкие* и *теплостойкие* стали. Основными эксплуатационными свойствами инструментальных сталей для режущих инструментов являются и теплостойкость и износостойкость.

Нетеплостойкие стали, сохраняющие высокую твердость (60 HRC) при нагреве не выше 190–300°C, используются для резания мягких материалов с небольшой скоростью резания, холодного деформирования. Это заэвтектоидные и близкие к эвтектоидным углеродистые и легированные стали с карбидной фазой – цементитом, коагулирующей при сравнительно низких температурах. Углеродистые инструментальные стали с низкой прокаливаемостью для изготовления инструментов небольших размеров рассмотрены ранее.

Хромованадиевые стали 7ХФ...11ХФ небольшой прокаливаемости применяются для изготовления деревообрабатывающих инструментов.

Таблица 8.1 – Назначение и марки инструментальных сталей

Инструменты, виды, условия эксплуатации	У8, У12	В1, В2	Х, Х9	9ХС	ХГ	ХВ5	Х12ФМ, Х12М1	5ХНС, 5ХНВ	4ХС, 4ХВС	7Х3	3Х2В8, 4Х5В2ФС
Режущий по металлу. Легкие условия резания	+		+	+							
Режущий по металлу. Тяжелые условия резания.											
Напильники	+		+								
Ножовки по металлу	+	+									
Мерительный инструмент	+		+		+		+				
Инструмент, не деформируемый при закалке			+	+	+		+				
Для алмазной расточки						+					
Молотовые штампы	+							+	+	+	+
Высадочные и чеканочные штампы	+								+		
Штампы холодной штамповки	+	+	+	+	+		+				
Волоочильные доски	+										
Формы для литья под давлением	+								+		+

Основными требованиями, предъявляемыми к сталям для измерительного инструмента, являются: высокая износостойкость и стабильность в размерах в течение длительного периода эксплуатации. Наиболее трудно обеспечить последнее условие, так как закаленная сталь претерпевает процесс старения. Для этих целей широко применяют заэвтектоидные низколегированные стали Х, ХГ, ХВГ, 9ХС и др.

Стали с повышенной прокаливаемостью марок X, 9XC предназначены для изготовления массивного инструмента и сложной формы. При закалке в масле изделия из этих сталей не подвержены образованию трещин

Стали ХВГ и ХГ относят к малодеформирующимся. Их используют для изготовления метчиков, бритв, калибров, т. е. инструментов, сохраняющих размеры при термической обработке. Сталь ХВ5, называемая *алмазной*, обладает исключительно высокой твердостью (67...69HRC) в силу наличия в мартенсите карбидов вольфрама. Применяется для изготовления фильер волочения.

Стали повышенной прокаливаемости 6XC–9XC, ХГСВ применяют для изготовления массивных штамповых инструментов сложных форм, шариков, колец и др.

Полутеплостойкие стали, преимущественно штамповые, сохраняют высокую твердость до 300...500°C. К ним относятся высокохромистые и хромоникелевые эвтектоидные стали (до 12% хрома). Такие стали характеризуются повышенной износостойкостью в условиях абразивного изнашивания, обусловленного высоким содержанием карбидов (Cr, Fe), например, Х6ВФ, Х12Ф1.

Сталь марки Х6ВФ используется для ножовочных полотен, резьбо- и зубонакатных инструментов, матриц и пуансонов холодного деформирования.

Стали Х12Ф1 (1,2...1,45% углерода) и им подобные относятся к малодеформирующимся сталям *ледебуритного* класса, применяются для изготовления массивных инструментов (фрезы, протяжки, матрицы и пуансоны штампов холодной и горячей штамповки). Для обеспечения минимальных объемов и размерных изменений проводится закалка изделий с 1070...1120°C и многократный отпуск при 450–480°C с контролем размеров.

Хромоникелевые стали повышенной вязкости (5ХНМ, 5ХНВ, 5ХГМ, 5ХГВС и другие) используют для изготовления штампов (массой 5...70 т) горячего деформирования. По структуре в отожженном состоянии хромоникелевые стали – доэвтектоидные. Термическая обработка – закалка в масле с 830...860°C, отпуск при 460...550°C со структурой сорбитообразного троостита или сорбита. Стали имеют $\sigma_b = 350...420$ МПа, $KC_v = 500...700$ Дж/м², $\delta = 40... 80\%$. Они обладают высокой термостойкостью.

Теплостойкие стали, которые сохраняют свои эксплуатационные свойства до 550–700°C, подразделяют:

1) для резания с повышенной скоростью при нагреве рабочей части инструмента до 500...650°C – *быстрорежущие* стали, маркируемые буквой «Р»;

2) для деформирования материалов при повышенном нагреве до 600...800°C – *штамповые* стали повышенной вязкости.

Теплостойкие стали сохраняют высокую твердость: 60–62 HRC – у быстрорежущих; 45–52 HRC – у штамповых (в процессе эксплуатации при повышенной вязкости).

Твердость и вязкость инструментальных сталей зависят от содержания углерода. Чем больше содержание углерода, тем более высокая твердость стали. Стали повышенной вязкости содержат меньше углерода, термически обрабатываются на более низкую твердость.

Быстрорежущие стали

Стали, используемые для изготовления инструментов, работающих при высоких скоростях резания, называются *быстрорежущими*. Они должны обладать теплостойкостью. В маркировке таких сталей за буквой «Р» следует число, указывающее среднее содержание вольфрама (в %), его условное обозначение опускается. Далее, соответственно, после букв М, К, Ф – содержание молибдена, кобальта и ванадия (если более 1,0...1,2%). В состав таких сталей обязательно входят углерод – 0,8...1,25%, хром – ~ 4%, ванадий – 1...2%, содержание которых в марке не указывается. Инструменты из этих сталей (резцы, плашки, фрезы и т. п.) работают на скоростях, превышающих в 3–5 раз скорости работы инструментов из углеродистых сталей.

Быстрорежущие стали относятся к сталям ледебуритного класса. В их структуре присутствует карбидная эвтектика (ледебурит), вторичные специальные карбиды (вследствие связывания углерода карбидообразующими элементами: вольфрамом, молибденом, хромом, ванадием), что обеспечивает их теплостойкость.

Наиболее распространена быстрорежущая сталь марки P18 (0,7% С, 18% W, 4% Cr, 1% V), которая подвергается закалке с температуры 1280°C обычно на воздухе или в масле. Затем проводится трехкратный (обычно) отпуск при 560°C (рисунок 8.2). В результате обработки в структуре стали мелкоигльчатый мартенсит отпуска, аустенит остаточный (по массе не превышает 2%), карбиды первичные и вторичные, сложнелегированные вольфрамом, молибденом, ванадием. Сталь P9 аналогична по своему значению и режущим свой-

ствам. Она труднее подвергается закалке (требует точного соответствия температуры), плохо шлифуется, но стоит дешевле (из-за меньшего содержания вольфрама).

В последнее время (в связи с дефицитом вольфрама и его высокой стоимостью) сталь P18 заменяют вольфрамомолибденовыми сталями с пониженным содержанием вольфрама. Преимущественно используется сталь P6M5 с несколько повышенным содержанием углерода (0,81–0,85% вместо 0,7–0,8% в P18). Структура стали в отожженном состоянии состоит из карбидов различных типов: эвтектического (первичные Me_6C), эвтектоидного (вторичные Me_2C) пластинчатого вида (более пластинчатого, чем первичный карбид). Природа всех быстрорежущих сталей одинакова. Они различаются лишь по скорости процесса превращений и по температурной устойчивости. В стали P18 содержится карбид Me_6C , а в остальных сталях – Me_6C и MeC . Чем больше ванадия, тем больше карбида MeC . Суммарное содержание карбидов в стали P6M5 ниже, чем в стали P18, поэтому появилась возможность производить инструменты из стали P6M5 литьем (самый дешевый метод).

Высокая теплостойкость и высокие режущие свойства быстрорежущих сталей (P18, P12, P9, P6M5, P14Ф4, P9K10 и др.) создаются, главным образом, растворением вторичных карбидов и легированием твердого раствора, элементами, входящими в состав этих карбидов. Положительная роль избыточных первичных карбидов состоит в замедлении роста аустенитного зерна.

Термическая обработка быстрорежущих сталей включает закалку и двух-трехкратный отпуск для получения структуры, состоящей из мелкоигльчатого мартенсита и карбидов. Температура закалки должна быть возможно выше, но не более температуры начала интенсивного роста зерна аустенита или оплавления (1220–1290°C). Вследствие малой теплопроводности стали инструмент (во избежание трещин) нельзя сразу помещать в печь, а только после предварительного подогрева. Охлаждение при закалке проводят в масле для исключения выделения карбидов. Отпуск стали проводят по различным режимам с целью постепенного перевода остаточного аустенита в мартенсит и получения твердости 64–68 HRC (например, рисунок 8.2).

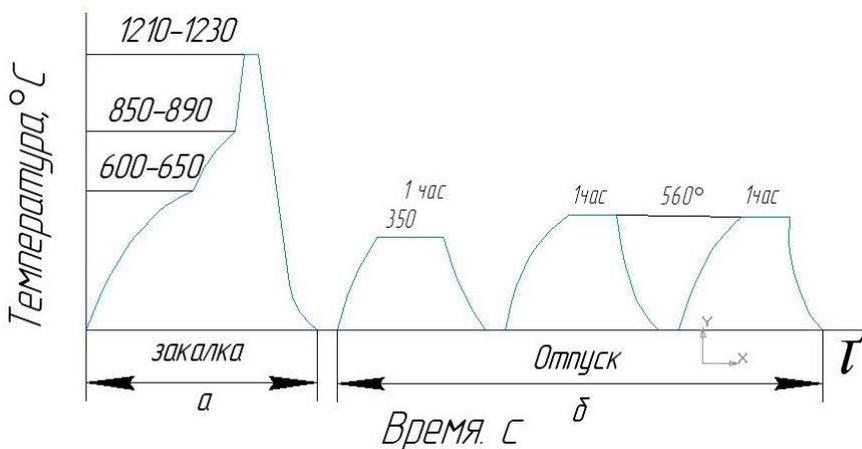


Рисунок 8.2 – Схема термической обработки инструментов из быстрорежущих сталей (Р6М5)

В ряде случаев применяется обработка холодом.

Штамповые стали

Стали для изготовления инструментов, используемых для обработки металлов давлением (штампов, пунсонов, пресс-форм, роликов, валиков), называют **штамповыми**.

Штамповые стали подразделяют:

- 1) на деформирующие металл в холодном состоянии;
- 2) на деформирующие металл в горячем состоянии.

Условия работы инструментов из штамповых сталей при различных видах обработки металлов давлением существенно отличаются.

Инструменты для деформирования металлов в холодном состоянии должны обладать высокой твердостью (не ниже 58 HRC), обеспечивающей устойчивость против истирания, и, одновременно, иметь хорошую вязкость. Поэтому для их изготовления применяют стали с содержанием углерода не менее 1%, в состоянии отпущенного мартенсита, т. е. после закалки и низкого отпуска.

Штампы небольших размеров и простой формы для относительно легких условий работы изготавливают из углеродистых сталей У10, У11, У12. Для более сложных конфигураций штампов применяют легированные, закаливаемые в масле (глубоко прокаливающиеся) стали, например, сталь Х (ШХ15) и др.

Валки станов холодной прокатки изготавливают из хромистых сталей с 1 или 2% хрома марок 9X, 9X2 и др. Ввиду большого сечения валки закаливают в воде и подвергают низкому отпуску при 100–120°C. Это делают для того, чтобы поверхность валка на глубине 10–15 мм имела максимально высокую твердость 64–66 HRC.

При относительно легких условиях работы для пневматических и других ударных инструментов (легкие удары, малая деформация) применяют штамповые стали марок 4XC, 6XC, 4XB2C, 5XB2C, 6XB2C, легированные кремнием и вольфрамом. Вольфрам измельчает зерно и придает стали большую вязкость. Увеличение содержания углерода делает стали более твердыми и износостойчивыми, но менее вязкими.

Для изготовления холодных штампов и других инструментов (фильеры для волочения, плашки, ролики и др.) широко используются высокохромистые стали (12% хрома при 1–1,5% углерода), обладающие повышенной теплостойкостью, малой деформируемостью, высокой износостойкостью. Высокохромистые стали (X12, X12M, X12Ф1 и др.) являются сталями ледебуритного класса. Большое количество хромистых карбидов (Cr_7C_3) делают эти стали износостойкими. Применяемые режимы ТО для сталей типа X12 для получения 61–63 HRC состоят в закалке с относительно высоких температур (1150°C) в масле и последующем низком отпуске (при 150–180°C). Стали X12M, X12Ф мало деформируются при закалке, поэтому их можно рекомендовать для изготовления инструментов сложной формы.

Инструменты для деформирования в горячем состоянии должны иметь дополнительно определенный комплекс свойств (жаропрочность, теплостойкость, термостойкость, вязкость, прокаливаемость, отпускная хрупкость, слипаемость). *Жаропрочность* – способность материала противостоять механическим нагрузкам при высоких температурах. *Термостойкость* – высокое сопротивление термической усталости (появлению трещин на рабочих поверхностях штампов при циклическом нагреве и охлаждении во время эксплуатации). *Отпускная хрупкость* – охрупчивание при некоторых условиях отпуска (является пороком). *Слипаемость* – прилипаемость к материалу штампа горячего металла при значительных давлениях, что быстро разрушает его поверхность.

Для штампов, работающих с малыми удельными давлениями, небольшой степенью деформации, при штамповке деталей из мягких сплавов и т. п. используют углеродистые стали с содержанием углерода от 0,6 до 1,0% (У7, У8, У9). Для более тяжелых условий,

например молотовых штампов, применяют легированные стали марок 5ХНМ, 5ХГМ, 5ХНСВ, 5ХНТ. Наиболее распространена сталь 5ХНМ. Сталь 5ХНМ обладает лучшим комплексом механических свойств при повышенных температурах (при 600°С $\sigma_b = 350$ МПа, $\sigma_{0,2} = 250$ МПа, $K_c = 0,8$ МДж/м²). Стали 5ХГМ и 5ХНСВ превышают показатели стали 5ХНМ по горячей прочности, но уступают ей по вязкости. Сталь 5ХНТ имеет пониженную прочность и повышенную отпускную хрупкость. По прокаливаемости стали располагаются в нисходящем порядке: 5ХНСВ, 5ХНМ, 5ХНТ. Из этих сталей изготавливают поковки больших размеров призматической формы (для получения штампов).

Еще в более тяжелых условиях работы находятся пресс-формы для литья под давлением, где нагрев рабочей поверхности осуществляется расплавленным металлом. Прессовый инструмент, а также штампы горизонтально-ковочных машин изготавливают из более легированных сталей, имеющих более высокую жаропрочность при несколько меньшей вязкости. Это стали марок 3Х2В8, 4Х5В2ФС, 4Х2В5ФМ, 4Х3ВФ2М2, которые по своим свойствам близки к быстрорежущим сталям, но имеют пониженное содержание углерода, что делает их более вязкими. Наиболее распространена сталь 3Х2В8, которая после закалки с 1100°С приобретает структуру мартенсита с небольшим количеством аустенита и избыточных карбидов при твердости 49–51 HRC и прочности 1600 МПа. Сталь обладает высокой прочностью и твердостью при повышенных (до 600–650°С) температурах вследствие наличия устойчивых карбидов вольфрама и молибдена типа Me_6C .

Для изготовления прессовых инструментов рекомендуется применять:

- 1) сталь 3Х2В8 для пуансонов и матриц, наиболее нагруженных в тепловом отношении;
- 2) сталь 5ХНМ для деталей, подвергающихся ударным воздействиям при относительно небольшой тепловой нагрузке;
- 3) сталь 4Х5В2ФС для инструментов, подвергающихся сравнительно высоким рабочим температурам и динамической нагрузке;
- 4) конструкционные стали типа 30ХГС, 40ХН для частей штампов, испытывающих значительные механические нагрузки при слабом разогреве.

Для штампов, работающих в условиях невысокого нагрева (400–500°С), применяют сталь 7Х3 (0,6–0,75% углерода, 3,2–3,8% хрома, содержание остальных элементов находится в обычных пределах).

Она обладает высокой износоустойчивостью, но уступает стали 3Х2В8 по вязкости и теплостойкости.

Твердые сплавы и сверхтвердые материалы

Для скоростного резания металлов применяют инструмент, оснащенный *твердыми сплавами*, у которых рабочая температура резания может быть увеличена до 800–1000°C (для быстрорежущей стали не больше 700°C). Теплостойкость твердых сплавов различных марок ~ 800–900°C, что позволяет повысить скорость резания в 2–10 раз.

Твердые сплавы представляют собой полученные методами порошковой металлургии спеченные сплавы из порошков карбидов вольфрама и титана (90–95%) на металлическом связующем (обычно это кобальт), с очень высокой твердостью 88–92 HRA или 72–80 HRC. Поэтому изделия из твердых сплавов нельзя подвергать никакой механической обработке, кроме шлифования.

Режущий инструмент не изготавливают полностью из твердого сплава, а лишь его режущую часть; пластинку прикрепляют к державке из обычной стали. Твердые сплавы значительно превосходят быстрорежущие стали по твердости (у последних – 65–69 HRC), но уступают им по прочности. Твердый сплав (наряду с высокой твердостью) обладает повышенной хрупкостью и малой прочностью на изгиб и растяжение.

В зависимости от структуры и состава карбидных фаз современные твердые сплавы подразделяют на три группы.

К первой группе относятся однокарбидные твердые сплавы (WC + Co), состоящие из карбида вольфрама (группа ВК). Они подразделяются на марки (ВК3, ВК6, ВК8, ВК10), различающиеся содержанием кобальта (в сплаве ВК3 – 3% кобальта, ВК6 – 6% кобальта и т. д.). Чем больше кобальта в сплаве, тем он менее тверд и размягчается при более низкой температуре (до 800°C), но менее хрупок.

Ко второй группе – группе ТК относят двухкарбидные сплавы (карбид титана + карбид вольфрама). Типичный представитель данной группы – сплав Т15К6. При спекании (вследствие процессов диффузии и растворения вольфрама и углерода в карбиде титана) их структура состоит более чем на 50% из карбида титана. Они более теплостойки (до температуры 900–1000°C).

К третьей группе – группе ТТК относятся трехкарбидные сплавы, состоящие из сложного карбида (Ti, W)C и карбида тантала

TaC. Это сплавы ТТ7К12, ТТ8К6, ТТ20К9. При таком количестве карбида титана в составе сплава в нем полностью растворен вольфрам. Структура сплава состоит из округлых зерен карбида (Ti,W)C. Карбид титана отличается от карбида вольфрама не только большей твердостью, но и повышенной хрупкостью.

Практика показала, что для обработки сталей лучше применять сплавы группы ТК (2 группы), для обработки хрупких материалов (чугуна и др.) – сплавы группы ВК (1 группы). Сплавы группы ТТК (3 группы) используют при обработке горных пород, бурении нефтяных скважин.

На основе титана сейчас разработаны новые твердые сплавы, не содержащие дорогого вольфрама. В них карбид вольфрама заменен карбидом или карбонитридом титана, а в качестве связки используются железо, молибден и другие металлы (ТМ1, ТМ3 (92 HRA)). Они отличаются высокой окалинотойкостью, малым коэффициентом трения. Показывают хорошие результаты при полуволновой обработке резанием конструкционных углеродистых и низколегированных сталей.

Сверхтвердые материалы (алмаз, кубический нитрид бора) применяют для оснащения вставками лезвийных инструментов (резцы, сверла, торцовые фрезы). Такие инструменты используются для чистовой размерной обработки деталей при высоких скоростях резания (100...200 м/мин).

Первое место среди сверхтвердых материалов принадлежит алмазу, твердость которого в 6 раз выше твердости карбида вольфрама и в 8 раз – твердости быстрорежущей стали. Наиболее широкое применение имеют синтетические алмазы, имеющие поликристаллическое строение и отличающиеся меньшей хрупкостью и стоимостью. Алмаз термостоек до температуры 800°C, однако обладает хорошей теплопроводностью, снижающей разогрев режущей кромки при высоких скоростях резания.

Недостаток алмаза заключается в его высокой адгезии к железу, что является причиной его низкой износостойкости при точении сталей и чугунов. Алмазным инструментом обрабатывают цветные металлы и сплавы, обеспечивая при этом низкую шероховатость поверхности.

Большой универсальностью обладают инструменты из поликристаллического нитрида бора с кубической решеткой, называемого *кубическим нитридом бора* (КНБ), получаемого синтезом нитрида бора при высоких давлениях и температурах. В зависимости от технологии получения КНБ выпускают под следующими названиями

(торговыми марками): эльбор, эльбор-Р, борозон. По твердости КНБ не уступает алмазу (0,9 твердости алмаза), но превосходит его по теплостойкости (1200–1400°С) и химической инертности. Отсутствие у КНБ химического сродства к железу позволяет эффективно использовать его для обработки труднообрабатываемых сталей, в том числе и закаленных.

Вопросы для самоконтроля

1. Как классифицируют инструментальные стали?
2. Назовите основные свойства инструментальных сталей и сплавов.
3. Что такое теплостойкость инструментальных сталей и как они подразделяются?
4. Какими свойствами обладают быстрорежущие стали?
5. Какие стали относят к штамповым и где их применяют?
6. Каким способом изготавливают твердые сплавы, их свойства и применение?
7. Назовите основные свойства низколегированных инструментальных сталей.
8. Как маркируют быстрорежущие стали, какую применяют термическую обработку?
9. Опишите основные свойства сверхтвердых материалов.
10. Охарактеризуйте основные области применения инструментальных сталей и сплавов.

Тема 9

Цветные металлы и сплавы. Антифрикционные сплавы

Классификация цветных металлов.

Все металлы подразделяют на две основные группы: черные и цветные металлы. Цветные металлы применяются реже, однако они обладают рядом ценных свойств, поэтому в ряде случаев их использование необходимо.

Цветные металлы зачастую имеют характерную окраску: красную, желтую, белую. Они обладают большой пластичностью, малой твердостью, относительно низкой температурой плавления. У них отсутствует полиморфизм.

Цветные металлы подразделяют на

1) легкие металлы – это алюминий, магний, бериллий, имеющие плотность менее 3 г/см^3 (при условии исключения щелочно-земельных металлов, которые в свободном металлическом состоянии не применяются). К ним относят также титан со сплавами (плотность $4,5 \text{ г/см}^3$). Из трех легких металлов алюминий имеет наибольшее значение. По объему производства он занимает второе место после железа, имеет невысокую стоимость. В основном, используется для производства легких сплавов с высокой удельной прочностью (для авиа-, ракетостроения и автомобилестроения);

2) благородные металлы – это серебро, золото, металлы платиновой группы (платина, палладий, иридий, родий, осмий, рутений). К ним можно отнести «полублагородную» медь. Они обладают высокой устойчивостью против коррозии;

3) легкоплавкие металлы (температура плавления $< 500^\circ\text{C}$) – это цинк, кадмий, ртуть, олово, свинец, висмут, таллий и элементы с ослабленными металлическими свойствами (галлий, германий).

Алюминий и его сплавы.

Алюминий – один из самых распространенных металлов в природе (7,5% в земной коре). Имеет решетку ГЦК, низкую температуру плавления (660°C), не имеет аллотропических превращений. По сравнению с железом у алюминия в 3 раза меньше плотность ($2,7 \text{ г/см}^3$). Он применяется там, где важны большая удельная прочность и малый удельный вес. Обладает высокими тепло-, электропроводностью, пластичностью (до 50%), но малой прочностью и твердостью (предел прочности 60 МПа, предел текучести 20 МПа, твердость 25

НВ, относительное удлинение 40%), большой коррозионной стойкостью на воздухе и в некоторых средах (вследствие образования на его поверхности тонкой прочной окисной пленки).

Коррозионная стойкость тем выше, чем чище алюминий. Его электропроводность составляет 65% от электропроводности меди. В зависимости от чистоты первичный алюминий маркируют:

A999 (99,999% алюминия) – особой чистоты;

A995, A99, A97, A95 – алюминий высокой чистоты с 99,995–99,95% алюминия;

A85, A8, A7, A6, A5, A0 – алюминий технической чистоты с 99,85–99,0% алюминия.

Чистый алюминий не применяют как конструкционный материал из-за низкой прочности, но (благодаря своим ценным свойствам) он эффективно используется по следующим трем направлениям:

1) в виде листов, профилей, прутков, фольги (вследствие высокой пластичности);

2) для изготовления проводов, шин, контакторов (электротехнических целей) в виду высокой электропроводности и малой плотности;

3) для изделий пищевой и химической промышленности, в быту (транспортировки и хранения продуктов питания, органических кислот) из-за хорошей коррозионной стойкости.

В металлургии алюминий применяется в качестве легирующего элемента, для раскисления стали. Однако наибольшее распространение он получил в качестве основы алюминиевых сплавов.

По способу изготовления изделий и технологическим свойствам алюминиевые сплавы делятся на три группы:

1) **литейные** – для получения отливок методом литья;

2) **деформируемые** – для получения полуфабрикатов методом пластической деформации (листы, ленты, проволока, трубы), а также поковок и штамповок;

3) **спеченные** – для получения изделий методом порошковой металлургии.

На основании диаграммы состояния алюминиевые сплавы условно также подразделяются на **литейные** и **деформируемые**, где границей между ними является предел насыщения твердого раствора алюминия другими компонентами при температуре эвтектики (рисунок 9.1).

Изменение технологических свойств в сопоставлении с диаграммой состояния (рисунок 9.1) показывает, что сплавы с содержанием компонента меньше предела растворимости при высокой температуре обладают наибольшей пластичностью и наименьшей прочно-

стью. Следовательно, они хорошо обрабатываются горячей обработкой.

Наличие эвтектической составляющей резко уменьшает пластичность сплава, его способность подвергаться пластической деформации. Обычно (при некотором содержании эвтектики) такая обработка уже неосуществима.

Наилучшей *жидкотекучестью* обладают сплавы, кристаллизующиеся при постоянной температуре (эвтектические сплавы). При переходе за предел растворимости жидкотекучесть резко возрастает. Вместе с тем литейные сплавы не должны содержать много эвтектики (больше 25%) во избежание ухудшения механических и технологических свойств. Все литейные сплавы могут упрочняться в результате термической обработки. Степень упрочнения тем меньше, чем больше сплав легирован, т. е. чем больше в структуре эвтектики.

К *литейным алюминиевым сплавам* (5 основных групп) относятся сплавы с элементами, которые образуют с алюминием легкоплавкие эвтектики, имеющие высокие литейные свойства. Это сплавы групп (обозначение литейные «Л»):

1 группа. Системы алюминий–кремний – *силумины* АЛ2, АЛ4 (10–13% кремния). Их состав близок к эвтектическому $\approx 11,5\%$ Si. Они характеризуются большой жидкотекучестью и малой усадкой (9 марок). При затвердевании кремний выделяется в виде грубых игольчатых кристаллов, что резко снижает механические свойства силуминов. Для повышения прочности и пластичности (измельчения структуры) такие силумины модифицируют, вводя в расплав небольшие добавки натрия (0,05–0,08 %) или другого модификатора. При этом формируется мелкозернистая эвтектика; вместо первичных хрупких кристаллов кремния появляются дендриты α -твердого раствора, механические свойства силуминов повышаются ($\sigma_B = 170\text{--}250$ МПа, $\delta = 3\text{--}5\%$).

2 группа. *Сложные силумины* систем: алюминий–кремний–магний, алюминий–кремний–медь, алюминий–кремний–магний–медь (АЛ3, АЛ9, АК9Ч, АЛ6 и др., всего 7 марок). Для повышения механических и технологических свойств силумины легируют магнием, марганцем, медью и подвергают дополнительной термической обработке.

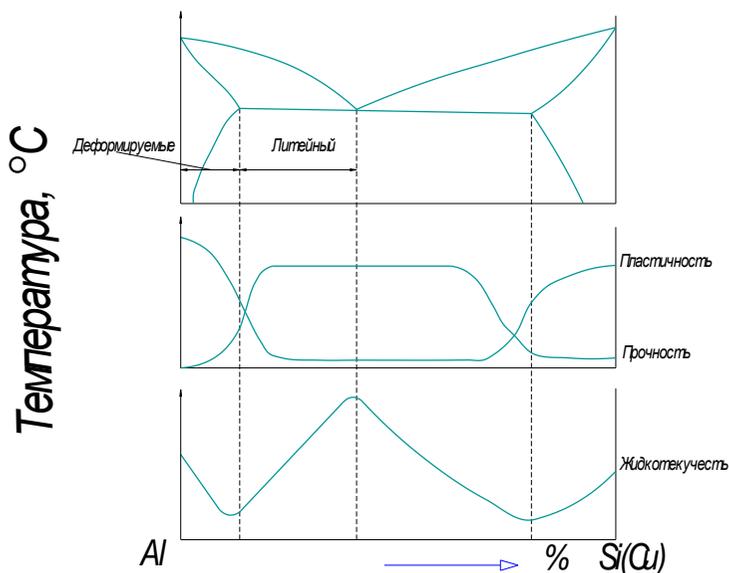


Рисунок 9.1 – Технологические свойства алюминиевых сплавов из 2 компонентов с ограниченной растворимостью (по Бочвару А. А.)

3 группа. Сплавы, содержащие более 4% меди, с ограниченной растворимостью меди в алюминии, со структурой α -твердого раствора и вторичной фазы Cu_2Al (3 марки), например, сложнелегированный сплав АЛ19. По жаропрочности они превосходят все литейные сплавы. Из них отливают мелкие детали, работающие при повышенных температурах. (250–300°C).

4 группа. Сплавы системы алюминий–магний, так называемые литейные *магналии* (АЛ8, АЛ13, АЛ28 и др., всего 9 марок) характеризуются хорошими литейными свойствами, повышенной пластичностью, минимальной плотностью (2,58 г/см³), высокой коррозионной стойкостью. Однако, при сравнительно небольших нагревах (до 80°C), наступает их разупрочнение, возможно образование трещин.

5 группа. К системам *алюминий–другие элементы* относят жаропрочные литейные сплавы АЛ1, АЛ21 и др. (система алюминий–медь–магний–кремний, всего 11 сплавов, дополнительно легированных хромом). Из них изготавливают поршни, головки цилиндров и другие детали, работающие при температурах до 250–300°C. Эти сплавы подвергаются сложной термической обработке.

Деформируемые алюминиевые сплавы характеризуются хорошей *деформируемостью* в холодном и горячем состоянии, высокой пластичностью, хорошими свариваемостью и обрабатываемостью резанием, низкой плотностью ($2,56\text{--}2,80\text{ г/см}^3$), невысокими тепло- и электропроводностью, стабильностью сохранения структуры и свойств в области рабочих температур. Деформируемые сплавы подразделяются на *упрочняемые* и *неупрочняемые* термической обработкой.

Деформируемые сплавы, *неупрочняемые* термической обработкой. Они используются в отожженном, либо в наклепанном состояниях. Механические свойства их улучшаются за счет легирования твердого раствора и нагартовки, но при этом снижается пластичность. К ним относят двойные сплавы алюминий–магний (2–7%) – магналии и системы алюминий–марганец (1–1,6% марганца).

Деформируемые магналии АМг, АМгб имеют высокую коррозионную стойкость, хорошо свариваются, применяются для сварных емкостей, в судостроении. Алюминиево-марганцевые сплавы АМц в отожженном состоянии, имеющие высокую пластичность, но малую прочность ($\sigma_{\text{в}} = 110\text{--}120\text{ МПа}$, $\delta = 20\text{--}25\%$). Они применяются для изготовления деталей, работающих в агрессивных средах.

К деформируемым сплавам, *упрочняемым* термообработкой, относятся сложные алюминиевые сплавы на основе тройных многокомпонентных систем:

дуралюмины – сплавы системы алюминий–медь–магний с добавкой марганца – Д1, Д16 повышенной прочности; Д19, ВД17 – повышенной жаропрочности; Д18 и В65 – заклепочные;

авиали – ковочные сплавы системы алюминий–магний–кремний – АВ, АК6, АК8 (0,4– 0,9% магния; 0,5– 1,2% кремния);

жаропрочные сплавы системы алюминий–медь–марганец – Д20, Д21 (6 – 7% меди; 0,4– 0,8% марганца);

ковочные сплавы системы алюминий–медь–магний с добавками никеля и железа – АК4-1, АК6;

высокопрочные сплавы системы алюминий–цинк–магний–медь марки В95 – общего назначения, В94 – заклепочные. Данные сплавы упрочняются термической обработкой (закалкой) с последующим искусственным или естественным старением. Наибольший эффект упрочнения обеспечивается упрочняющими фазами, т. е. фазами, которые при нагреве под закалку растворяются в α -твердом растворе, дополнительно легируя его и пересыщая. Затем в процессе старения эти упрочненные фазы выделяются в виде дисперсных частиц в матрице сплава.

Медь и ее сплавы

Медь – металл не слишком распространенный в природе (0,01% в земной коре), но объем его производства постоянно возрастает вследствие специальных свойств и находится на уровне алюминия. Это высокопластичный металл ($\delta = 50\text{--}60\%$), с низким пределом прочности ($\sigma_{\text{в}} = 200\text{--}240$ МПа), красноватого цвета. Температура плавления 1083°C , плотность $8,94$ г/см³, решетка ГЦК. По своим свойствам медь близка к золоту и серебру, является стойкой к атмосферной коррозии. Чистая медь обладает ценными техническими свойствами: высокой пластичностью, электро- и теплопроводностью, что обуславливает ее применение для производства электрических, телефонных проводов, деталей теплообменников, холодильников, а также в качестве основы сплавов для художественных изделий.

В зависимости от чистоты (наличия примесей кислорода, серы, фосфора, ртути) медь маркируют: М00 (99,99% меди), М0 (99,95%), М1 (99,9%), М2 (99,7%), М3 (99,5 5), М4 (99,0% меди). Примеси понижают ее электропроводимость. Медь применяют в виде листов, прутков, труб, проволоки.

По способу изготовления деталей медные сплавы подразделяются на *деформируемые* (листы, прутки, полуфабрикаты) и *литейные* (фасонные отливки, художественные изделия).

Большая часть медных сплавов не подвергается упрочняющей термической обработке, так как они однофазны, или потому, что эффект упрочнения очень мал.

Латуни. Сплавы меди с цинком называют латунями. Латуни подразделяют на двойные и легированные (таблицы 9.1, 9.2). Они легко подвергаются пластической деформации. Латуни бывают легированными с добавкой других элементов (алюминия, железа, никеля и т. д.).

На основе диаграммы состояния сплавов медь–цинк (рисунок 9.2) изучают микроструктуру двойных латуней. Практическое применение имеют латуни с содержанием цинка до 45%. Из диаграммы состояния медь–цинк видно, что по структуре латуни подразделяются на α -латуни (однофазные, до 39% цинка, где α -твердый раствор цинка в меди) и на $\alpha + \beta^1$ латуни (двухфазные). β^1 – твердый раствор на базе электронного соединения CuZn.

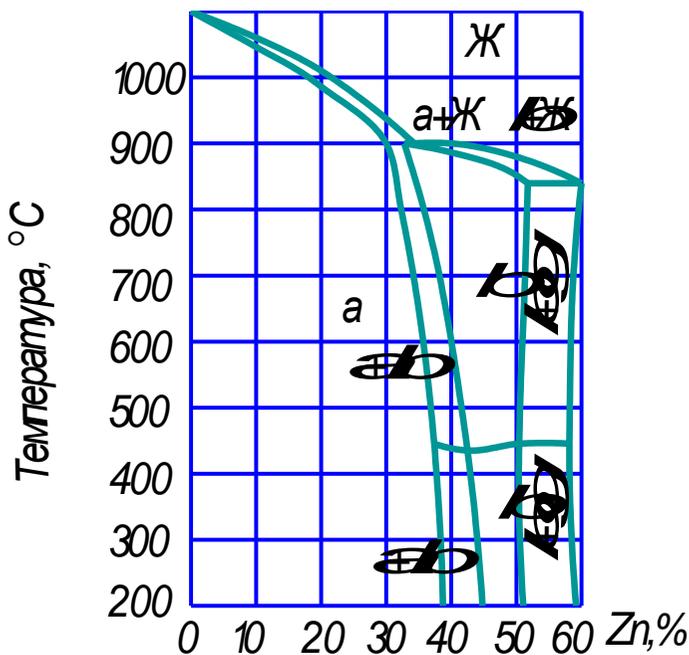


Рисунок 9.2 – Диаграмма состояния сплавов меди и цинка

Двойная латунь маркируется буквой «Л». Далее идут цифры, указывающие количество меди в сплаве (остальное – цинк). Буквой «Л» маркируются и легированные латуни. После идут буквы, обозначающие легирующие добавки. Первая цифра указывает среднее содержание меди, последующие цифры после букв – содержание легирующих элементов.

Таблица 9.1 – Механические свойства и применение двойных деформируемых латуней

Латунь	σв, МПа		δ, %		Примечание
	После наклепа	После отжига	После наклепа	После отжига	
Л96	450	240	2	50	Трубки радиаторные
Л90	480	260	4	45	Листы и ленты для плакировки
Л80	640	320	5	52	Трубы, ленты, проволока
Л70	660	330	3	55	Полосы и ленты специального назначения
Л62	600	360	3	49	Полосы, листы, трубы
Л59	600	380	1,5	25	Прутки, проволока

Таблица 9. 2 – Механические свойства и применение легированных латуней

Латунь	σв, МПа		δ, %		Примечание
	После наклепа	После отжига	После наклепа	После отжига	
Деформируемые латуни					
ЛЖМц 59–1–1	700	450	10	50	Прутка, трубы, проволока
ЛС 59–1	650	400	16	45	Листы, ленты, трубы, проволока
ЛАЖ 60–1–1	750	450	8	45	Трубы, прутки
Литейные латуни					
	Литье в землю		Литье в кокиль		
ЛК80– 3Л	250	10	300	15	Арматура, детали в машиностроении, судостроении
ЛАЖМц 66–3–2	600	7	650	7	Червячные винты, гайки нажимных винтов
ЛКС 80–3–3	250	7	300	15	Подшипники
ЛМцЖ 52–4–1	–	–	500	15	Детали ответственного назначения, подшипники.

Бронзы. Бронзой называют сплав меди со всеми элементами, кроме цинка и никеля. Цинк может присутствовать только при наличии других компонентов.

Бронзы подразделяются на две большие группы:

- 1) оловянистые бронзы (таблица 9.3);
- 2) безоловянистые бронзы (таблица 9.4).

Бронзы бывают деформируемыми и литейными. Они обладают высокими литейными свойствами, имеют малую усадку (до 1%) и небольшую жидкотекучесть.

Наиболее широкое применение получили оловянистые бронзы. Их структуру характеризует диаграмма состояния сплавов медь–олово, которая изображена на рисунке 9.3.

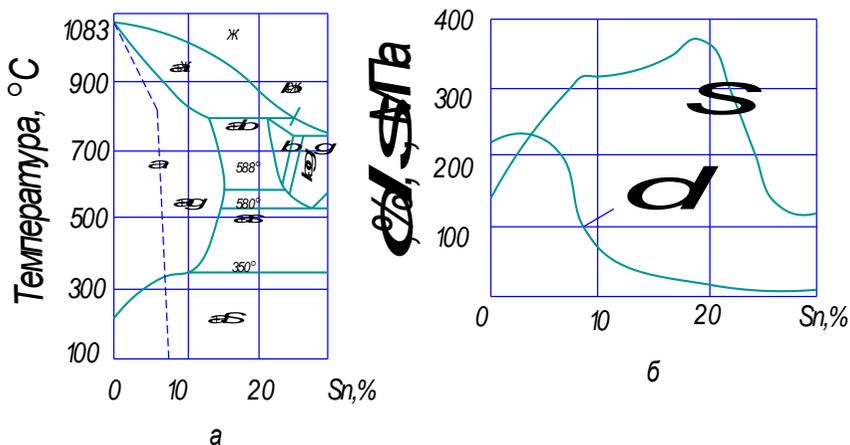


Рисунок 9.3 – Диаграмма состояния сплавов медь–олово (а) и влияние содержания олова на механические свойства бронз (б)

В сплавах этой системы (согласно диаграмме состояния медь–олово) образуются следующие соединения:

α – твердый раствор олова и меди;

β – твердый раствор на базе электронного соединения Cu_5Sn ;

δ – химическое соединение $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$;

ε – химическое соединение Cu_3Sn ;

γ – твердый раствор на базе химического соединения меди и олова.

Практическое применение находят сплавы с содержанием олова до 12%. Механические свойства сплава резко снижаются с увеличением содержания олова. При большем содержании олова сплавы становятся хрупкими.

Маркировка бронзы. Буквенное обозначение бронзы – Бр, далее следуют буквы, обозначающие легирующие элементы, и цифры (содержание легирующих элементов).

Сплавы меди с алюминием, кремнием, бериллием и другими элементами также называют бронзами. Они превосходят оловянистые бронзы по механическим и коррозионным свойствам, стоят дешевле, однако уступают по величине усадки.

Таблица 9.3 – Механические свойства, применение деформируемых и литейных оловянистых бронз

Бронза	$\sigma_{в}$, МПа	δ , %	Применение
Деформируемые бронзы			
БрО 6,5-0,15	400	65	Пружины, мембраны, детали, работающие на трении, ленты
БрОЦ 4-4	330	40	Контакты, плоские и круглые пружины
БрОЦС 4-4-2,5	350	35	Антифрикционные детали
Литейные бронзы			
БрОЦСН 3-7-5-1	180	8	Арматура, работающая в воде, а также паре при давлении до 2,5 МПа
БрОЦС 3-12-5	180	8	
БрОЦС 5-5-5	150	6	Антифрикционные детали (втулки, подшипники, вкладыши, червячные пары)
БрОЦС 4-4-17	150	6	

Таблица 9.4 – Механические свойства, применение безоловянистых бронз

Бронза	$\sigma_{в}$, МПа	δ , %	НВ, МПа	Применение
Алюминиевые бронзы				
БрАЖ9-4	600	40	1100	Шестерни, втулки, арматура
БрАЖ9-4Л	550	15	130	
БрАЖН11-4-4	650	35	1500	Прутки, трубы, поковки, шестерни, втулки
БрАЖН10-4-4Л	650	10	1900	
Кремнистая бронза				
БрКМц3-1	380	35	800	Трубы, втулки, пружины
Бериллиевая бронза				
БрБ2	500	30	1000	Высокопрочные и токоведущие пружины
Свинцовистая бронза				
БрС30	60–80	4–6	400	Для заливки стальных вкладышей подшипников

Антифрикционные сплавы

В машиностроении (для изготовления подшипников скольжения) широкое применение получили антифрикционные материалы – сплавы на основе алюминия, меди, свинца, олова, так называемые **антифрикционные сплавы**. **Баббиты** – мягкие (до 30 НВ) антифрикционные сплавы на оловянной и свинцовистой основах (ГОСТ 1320–74).

Антифрикционные сплавы должны:

- иметь достаточную твердость;
- быть пластичными;
- удерживать смазку;
- иметь малый коэффициент трения;
- обладать хорошей теплопроводностью;
- иметь невысокую температуру плавления;
- обладать устойчивостью против коррозии.

Антифрикционность – способность материала обеспечивать низкие коэффициент трения скольжения и потери на трение, малую скорость изнашивания сопряжений (деталь – стальной вал).

Для обеспечения необходимых свойств структура подшипниковых сплавов должна быть гетерогенной, состоять из пластичной и мягкой основ с твердыми включениями.

Из подшипниковых сплавов применяют баббиты системы Pb–Sb, Sn–Sb, Pb–Sn–Sb, а также на основе цинка (с добавками меди и алюминия), на основе алюминия (с добавками меди, никеля, сурьмы).

Оловянные и свинцовистые баббиты обладают хорошими антифрикционными свойствами, хорошо прирабатываются, но имеют низкое сопротивление усталости (таблица 9.5). Прочность таких баббитов $\sigma_B = 60\text{--}120$ МПа, твердость НВ 130–350 МПа. Наиболее распространенными оловянными баббитами являются сплавы Б88, Б83 на основе системы сплавов сурьма–олово. У них мягкая основа олово и твердые включения на основе химических соединений SnSb, Cu_3Sn . Свинцовые баббиты Б16, БН, БС6 имеют мягкую основу – эвтектику (Pb + Sb) и твердые включения.

Алюминиевые подшипниковые сплавы обладают более высокими свойствами (низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью), но менее технологичны. Применяют обычно вместо оловянных и свинцовых баббитов.

Алюминиевые антифрикционные сплавы служат для получения биметаллической ленты со сталью. Зачастую на поверхность этих сплавов наносится слой олова. Данные сплавы используются в тяжело нагруженных скоростных подшипниках (таблица 9.6).

Таблица 9.5 – Химический состав в % и применение подшипниковых сплавов баббитов

Сплав	Sb	Cu	Cd	Sn	Pb	Другие элементы	Применение
Б88	7,3–7,8	2,5–3,5	0,8–1,2	Остальное	–	0,15–0,25 никеля	Тяжелонагруженные машины, турбонасосы
Б83	11	6	–	83	–	–	
Б89	10–12	5,5–6,5	–	Остальное	–	–	
БН	13–15	1,5–2,0	0,1–0,7	9–11	Остальное	0,1–0,5 никеля	Машины средней нагруженности
Б16	15–17	1,5–2,0	–	15–17	Остальное	0,5–0,9 As	
БС6	5,5–6,5	0,1–0,3	–	5,5–6,5	Остальное	–	

Таблица 9. 6 – Химический состав в % и применение алюминиевых подшипниковых сплавов

Сплав	Содержание элементов, %					Применение
	Sn	Cu	Ni	Si	Al	
АО3-1	2–4	0,8–1,2	0,3–0,5	1,3–2,1	Остальное	Монометаллические вкладыши и втулки, толщиной более 10 мм
АО9-2	8–10	2,0–2,5	0,8–1,2	3,0–0,7		
АО20-1	17–23	0,7–1,2	–	–	Остальное	В машинах средней нагруженности, автомобильные моторы
АН2,5	–	–	2,7–3,3	–		

Вопросы для самоконтроля

1. Какими свойствами обладает медь?
2. Какие существуют сплавы на основе меди?
3. Где применяется медь и сплавы на ее основе?
4. Какие марки меди существуют?
5. Что такое бронза?
6. Какие существуют бронзы?
7. Что такое латунь?
8. Какими свойствами обладает алюминий?
9. Где применяются алюминий и его сплавы?
10. Какие существуют сплавы на основе алюминия?
11. Какие марки алюминия Вы знаете?
12. Какие Вы знаете сплавы на основе алюминия?
13. Назовите деформируемые сплавы на основе алюминия.

2. МАТЕРИАЛЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Лабораторная работа № 1 «Определение прочности, пластичности и ударной вязкости металлов и сплавов»

Цель работы: ознакомиться с методиками определения прочности, пластичности и ударной вязкости металлов и сплавов, научиться определять значения этих свойств.

Содержание работы:

- общие сведения о методах определения механических свойств металлов и сплавов;

- испытание металлов на растяжение;

- испытание металлов на ударную вязкость;

- оборудование и порядок выполнения работы;

- протоколы испытаний и выводы.

Студент должен

знать сущность понятия прочности, пластичности, ударной вязкости металлов и сплавов;

уметь выбирать образцы для статических и динамических испытаний и проводить испытания.

Литература: [3], [7], [9], [10].

Лабораторная работа № 2 «Определение твердости металлов»

Цель работы: изучить методы определения твердости металлов по Бринеллю и Роквеллу.

Содержание работы:

- общие сведения о методах определения твердости;

- измерение твердости по методу Бринелля;

- измерение твердости по методу Роквелла;

- оборудование и порядок выполнения работы;

- протоколы испытаний и выводы.

Студент должен

знать: сущность понятия твердости, методы ее определения по Бринеллю и Роквеллу;

уметь: готовить образцы материалов для испытаний на твердость; выбирать условия испытаний и проводить их по методу Бринелля и Роквелла.

Литература: [5], [6], [7].

Лабораторная работа № 3

«Микроструктурный метод исследования металлов»

Цель работы:

- 1) изучить микроструктурный метод исследования металлов;
- 2) изучить устройство металлографического микроскопа;
- 3) ознакомиться с процессом приготовления микрошлифов;
- 4) провести микроанализ сплава и определить марку стали.

Содержание работы:

- общие сведения;
- методика приготовления микрошлифа;
- характеристики и устройство оптического микроскопа;
- оборудование, материалы и инструменты;
- порядок выполнения работы и выводы.

Студент должен

знать методику приготовления микрошлифа;

уметь: пользоваться металлографическим микроскопом, определять марки сталей.

Литература: [6], [7], [11].

Лабораторная работа № 4

«Термический метод исследования

сплавов и построение диаграммы состояния сплавов свинец–сурьма»

Цель работы: изучить методику определения критических точек сплавов и построения диаграммы состояния сплавов свинец–сурьма.

Содержание работы:

- общие сведения;
- термический метод построения диаграмм состояния;
- метод измерения температур;
- анализ диаграмм состояния сплавов свинец–сурьма;
- 1 и 2 правило отрезков;
- оборудование, материалы и инструменты;
- порядок выполнения работы;
- кривые охлаждения сплавов и таблица критических точек;
- построенная диаграмма состояния сплавов свинец–сурьма и выводы.

Студент должен

знать сущность термического метода построения диаграммы состояния сплавов;

уметь:

приготовить сплавы заданной концентрации;

снимать показания охлаждающихся сплавов с помощью термоэлектрического пирометра.

Литература: [1], [7], [11].

Лабораторная работа № 5 «Анализ диаграммы состояния сплавов железо–цементит»

Цель работы: изучить диаграмму состояния сплавов железо–цементит.

Содержание работы:

- общие сведения
- компоненты и фазы в системе железо–углерод;
- метастабильная диаграмма состояния железо–цементит;
- стабильная диаграмма состояния железо–графит;
- порядок выполнения работы;
- кривые охлаждения сплавов системы железо–цементит и выводы.

Студент должен

знать:

основные структурные составляющие и фазы железоуглеродистых сплавов;

превращения, происходящие в сплавах при нагреве и охлаждении;

уметь анализировать изменения, происходящие в сплавах, с помощью правила фаз и правила отрезков.

Литература: [1], [2], [5], [8].

Лабораторная работа № 6 «Изучение микроструктуры, свойств и применения углеродистых сталей и чугунов»

Цель работы:

1) изучить влияние углерода и постоянных примесей на свойства сталей и чугунов;

2) изучить классификацию, маркировку и применение углеродистых сталей и чугунов.

Содержание работы:

- стали, общие сведения;
- классификация сталей;
- углеродистые конструкционные и инструментальные стали, структура, свойства и их применение;
- легированные стали.
- чугуны, общие сведения и классификация;

- влияние примесей на структуру и свойства чугунов;
- белые и серые чугуны, их микроструктура, свойства, применение;
- оборудование и материалы;
- порядок выполнения работы и выводы.

Студент должен

знать классификацию и маркировку углеродистых сталей и чугунов;

уметь выбрать материал с заданными свойствами для конкретной детали.

Литература: [1], [3], [4], [6].

Лабораторная работа № 7

«Термическая обработка углеродистых сталей»

Цель работы:

- 1) изучить теоретические основы закалки и отпуска стали;
- 2) освоить технологию закалки и отпуска стали;
- 3) установить зависимость изменения структуры и свойств стали в результате закалки и отпуска.

Содержание работы:

- общие сведения;
- основные способы закалки;
- виды отпуска и их применение;
- оборудование, материалы и инструменты;
- порядок выполнения работы;
- протоколы измерений, графики и выводы.

Студент должен

знать основные методы закалки и отпуска стали;

уметь назначить режим термической обработки деталей.

Литература: [1], [2], [6], [11].

Лабораторная работа № 8

«Поверхностное упрочнение стальных изделий»

Цель работы:

- 1) изучить основные методы поверхностной закалки и химико-термической обработки сталей;
- 2) изучить изменение структуры и свойств стали после высокочастотной закалки и цементации.

Содержание работы:

- общие сведения;
- способы поверхностной закалки;

- химико-термическая обработка сталей;
- оборудование, материалы и инструменты;
- порядок выполнения работы;
- схемы микроструктур после индукционной закалки и цементации;
- выводы.

Студент должен

знать:

- 1) сущность и методы поверхностных закалок;
- 2) физическую сущность и методы химико-термической обработки;

уметь назначить режим поверхностного упрочнения деталей.

Литература: [1], [2], [6], [11].

Лабораторная работа № 9

«Изучение микроструктуры, свойств и применения цветных металлов»

Цель работы: изучить структуру, свойства и применение цветных металлов и сплавов на основе меди и алюминия.

Содержание работы:

- алюминий, общие сведения;
- маркировка алюминия и его сплавов;
- литейные и деформируемые сплавы;
- структура, свойства и применение алюминиевых сплавов;
- медь, общие сведения и маркировка;
- бронзы и латуни;
- микроструктуры, свойства и применение медных сплавов;
- оборудование и материалы;
- подшипниковые сплавы;
- оборудование, материалы и инструменты;
- порядок выполнения работы;
- выводы.

Студент должен

знать классификацию и маркировку латуней, бронз, литейных и деформируемых алюминиевых сплавов;

уметь определить структуру бронз, латуней, силуминов и дюралюминов.

Литература: [1], [4], [7], [8].

3. УПРАВЛЯЕМАЯ САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТОВ

Управляемая самостоятельная работа студентов (УСРС) – целенаправленная учебная деятельность студентов, осуществляемая под непосредственным или опосредованным управлением преподавателя. При этом необходимо учитывать специфику и логику дисциплины «Материаловедение», ее цели и задачи.

УСРС (помимо лекционного материала, методических указаний к лабораторным работам) должна быть обеспечена вопросами и заданиями для контролируемой самостоятельной работы, рекомендациями по их выполнению.

Изучение материалов по темам, включенным в УСРС, проводится с использованием рекомендуемой литературы и приведенных ниже рекомендаций.

Формой контроля самостоятельного изучения материалов под руководством преподавателей является проведение опросов, решение задач и подготовка рефератов по соответствующим темам в соответствии с вопросами, рекомендуемыми при изучении темы.

Ниже приведены рекомендации по выполнению студентами управляемых самостоятельных работ по предложенным темам.

Рекомендации по выполнению УСРС по теме «Железоуглеродистые сплавы»

Решение задач по выполнению задания управляемой самостоятельной работы студентами по теме «Железоуглеродистые сплавы» с применением правила фаз, 1 и 2 правил отрезков.

Теоретические вопросы данной темы освещены в лекциях, темы 2,3. Они включают в себя изучение основных диаграмм состояния сплавов и применение правила фаз, ознакомление со структурными составляющими железоуглеродистых сплавов, анализ диаграммы состояния железо–цементит.

Выполнение задания по управляемой самостоятельной работе состоит в анализе сплава определенного состава, заданного с помощью правила фаз, в определении концентрации (состава) фаз и их количественного соотношения при заданной температуре.

Пример задачи. Проанализировать сплав состава 3 % С, остальное – Fe, построив кривую охлаждения с помощью правила фаз, определить состав и количественное соотношение фаз с помощью правила отрезков при температуре 1300 °С.

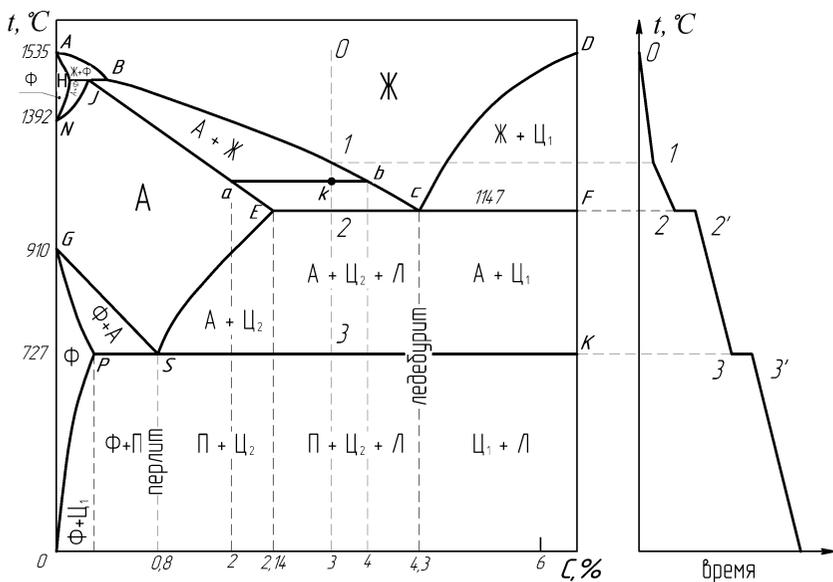


Рисунок 1 – Диаграмма состояния сплавов железо–цементит

При выполнении УСРС необходимо осуществить следующие действия.

1. Нанести сплав на диаграмму состояния сплавов железо–цементит (рисунок 1), точки пересечения сплава с линиями диаграммы отметить цифрами «1», «2», «3» и т. д.
2. Рассчитать число степеней свободы с помощью правила фаз на участках сплава:

$$C = K + 1 - f,$$

где C – число степеней свободы;
 K – количество компонентов;
 F – количество фаз.

3. Проанализировать изменения, происходящие в сплаве при охлаждении.

На участке «01» происходит охлаждение жидкого сплава. Компонентов два – железо и углерод; фаза одна – жидкий сплав. По правилу фаз:

$$C_{01} = 2 + 1 - 1 = 2 \text{ (жидкий сплав).}$$

В точке «1» при пересечении сплава с линией «ликвидус» начинается процесс кристаллизации жидкого сплава с образованием аустенита. Процесс протекает от точки «1» до точки «2». Компонентов два – железо и углерод; фазы две – жидкий сплав и аустенит:

$$C_{12} = 2 + 1 - 2 = 1 \text{ (жидкий сплав, А)}$$

В точке «2» сплав пересекает линию «солидус». Конец кристаллизации жидкого сплава. Жидкий сплав затвердевает в виде равномерной механической смеси: аустенита и цементита – ледебурита. Компонентов два, фазы три – жидкий сплав, аустенит, цементит.

$$C_{22} = 2 + 1 - 3 = 0 \text{ (жидкий сплав, А, Ц).}$$

На участке 2–3 из аустенита кристаллизуется цементит вторичный. Компонентов два, фазы две – аустенит, цементит:

$$C_{23} = 2 + 1 - 2 = 1 \text{ (А, Ц).}$$

В точке «3» сплав пересекает линию «эвтектоидного» или «перлитного» превращения. На этой линии весь аустенит кристаллизуется в «перлит». Компонентов два, фазы три – аустенит, феррит, цементит:

$$C_{33} = 2 + 1 - 3 = 0 \text{ (А, Ф, Ц).}$$

На участке 3–4 происходит дальнейшее охлаждение сплава. Компонентов два, фазы две – феррит и цементит:

$$C_{34} = 2 + 1 - 2 = 1 \text{ (Ф, Ц).}$$

Для определения состава и количественного соотношения фаз в точке «К» при температуре 1300°C через данную точку проводим «коноду» – горизонталь до пересечения с линиями диаграммы, ограничивающими данные фазы (точки «a» и «b»). Проекции, опущенные из точек «a» и «b» на ось концентрации, показывают концентрацию каждой фазы. Концентрация жидкой фазы в точке «k» равна: 4% С, остальное – Fe. Концентрация аустенита в точке «k» равна 2% С, остальное – Fe.

Количество жидкого сплава в точке «k» равно:

$$Q_{\text{ж. сплава}} = \frac{ak}{ab} 100\% ;$$

$$Q_{\text{ж. сплава}} = \frac{3-2}{4-2} \times 100\% = 50\% .$$

Количество аустенита в точке «k» равно:

$$Q_A = \frac{kb}{ab} 100\% ;$$

$$Q_A = \frac{4-3}{4-2} \times 100\% = 50\% .$$

Рекомендации по выполнению УСРС по теме «Поверхностное упрочнение сталей»

Решение задач по выполнению задания управляемой самостоятельной работы студентами по теме «Поверхностное упрочнение сталей».

Теоретические вопросы по данной теме изложены в темах лекций 4, 5, 7.

Они включают в себя маркировку, структуру, свойства и применение сталей, основы термической обработки и технологии поверхностного упрочнения.

Выполнение данного задания по УСРС состоит в выборе материала для предложенной детали, технологии поверхностного упрочнения с назначением режимов поверхностной закалки или химико-термической обработки.

Пример задачи. Выбрать материал и назначить режимы термической обработки для шестерни. Твердость поверхности на глубину 1,2_{мм} 54–56 HRC, твердость сердцевины – 30–35 HRC.

1-й вариант. Для изготовления шестерни можно выбрать сталь 45. В этом случае для получения твердости сердцевины необходимо провести *улучшение*. Это закалка с температуры 830–850 °С в воде. Структура, образующаяся после закалки, мартенсит + аустенит остаточный. Далее – высокий отпуск, температура отпуска 600 °С. Структура – сорбит отпуска. Для получения твердости на поверхности назначают поверхностную закалку ТВЧ, затем низкий отпуск, температура отпуска 200 °С (или поверхностную закалку с самоотпуском).

2-й вариант. При выборе материала для шестерни стали 20ХГТ назначают ХТО – цементацию газовую, температура цементации 900–930 °С, время выдержки в печи – 5 часов. Далее подстуживание на воздухе до температуры 880 °С и закалка в масле. Затем вторичный нагрев до температуры 800–820 °С и закалка с охлаждением в масле. После второй закалки – низкий отпуск, температура отпуска 200 °С, время выдержки в печи – 2 часа.

4. ПРИМЕРЫ БИЛЕТОВ МНОГОУРОВНЕВОГО КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО РАЗДЕЛУ «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»

Белорусский государственный аграрный
технический университет

Кафедра «Технология металлов»
дисциплина «Материаловедение и ТКМ»

БИЛЕТ № 1

Вопросы 1-го уровня

1. Что такое сталь?
2. Как классифицируют чугуны по назначению?
3. Что представляет собой критическая точка A_{c1} ?
4. Какие существуют виды отпуска?
5. Какую термическую обработку проводят после цементации?
6. Что такое хромирование?

Вопросы 2-го уровня

1. Расшифруйте марки сплавов: сталь X18H9T, бронза БрАЖ4-4-2, сталь 5ХНМ, латунь ЛА77-2.
2. Определить температуру полной закалки для стали 50, используя диаграмму Fe-Fe₃C.

Вопрос 3-го уровня

1. Назначить режим термической обработки лемеха плуга из стали 65Г.

Белорусский государственный аграрный
технический университет

Кафедра «Технология металлов»
дисциплина «Материаловедение и ТКМ»

БИЛЕТ № 2

Вопросы 1-го уровня

1. Какая сталь называется кипящей?
2. Какой чугун называется белым?
3. Какими свойствами обладает мартенсит?
4. Для каких стальных деталей принято назначать низкий отпуск?
5. Для каких сталей возможно проведение поверхностной закалки?
6. Что такое нитроцементация?

Вопросы 2-го уровня

1. Расшифруйте марки сплавов: сталь 50ХФА, сталь Р18, Т15К6, бронза БрБ2.
2. Назначить температуру нормализации для стали 50, используя диаграмму Fe–Fe₃C.

Вопрос 3-го уровня

1. Назначить режим термической обработки метчика из стали У13А.

Белорусский государственный аграрный
технический университет

Кафедра «Технология металлов»
дисциплина «Материаловедение и ТКМ»

БИЛЕТ № 3

Вопросы 1-го уровня

1. Назовите самую твердую структурную составляющую в железоуглеродистых сплавах.
2. Как классифицируют серые чугуны по форме графитных включений?
3. Как проводится изотермическая закалка?
4. Как влияет температура отпуска на механические свойства сталей?
5. Что такое диффузионная металлизация?
6. Какие существуют марки алюминия?

Вопросы 2-го уровня

1. Расшифруйте марки сплавов: сталь ШХ13, сталь 5ХГТ, ТТ30К4, баббит Б83.
2. Выбрать температуру нагрева для закалки стали У10А, используя диаграмму Fe–Fe₃C.

Вопрос 3-го уровня

1. Назначить режим термической обработки пружины из стали 55Г.

Белорусский государственный аграрный
технический университет

Кафедра «Технология металлов»
дисциплина «Материаловедение и ТКМ»

БИЛЕТ № 4

Вопросы 1-го уровня

1. Как маркируются инструментальные углеродистые стали?
2. Какие постоянные примеси присутствуют в составе чугунов?
3. Как проводится закалка с самоотпуском?
4. Какова продолжительность выдержки при отпуске?
5. Что входит в состав твердого карбюризатора при цементации?
6. Где применяется алюминий и его сплавы?

Вопросы 2-го уровня

1. Расшифруйте марки сплавов: сталь 40ХГР, сталь Х18К8МТ, силумин АК9, бронза БрС30.
2. Указать температуру и время выдержки при газовой цементации деталей из стали 18ХГТ.

Вопрос 3-го уровня

1. Назначить режим термической обработки вала из стали 45 с твердостью поверхности на глубине 1,8 мм 56 HRC и с твердостью сердцевины 30 HRC.

5. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ РАЗДЕЛА «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ» СТУДЕНТАМИ ЗАОЧНОЙ ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ

Общие методические указания и требования

Раздел «Материаловедение» дает студентам заочной формы обучения необходимые сведения о современных методах термической обработки металлов и других конструкционных материалов, об их свойствах и строении.

В соответствии с учебным планом студенты выполняют контрольные задания путем самостоятельного изучения теоретического материала.

Приступая к изучению данной дисциплины, необходимо иметь учебную литературу и настоящие методические указания. Рекомендуется освоение теоретического материала совмещать с практическим изучением каждой темы раздела на соответствующих производственных предприятиях. Это осуществляется путем ознакомления с технологическими процессами, конструкцией и работой применяемого оборудования. Практическое ознакомление с производственными процессами и оборудованием намного облегчает изучение материала по учебным пособиям, закрепляет полученные знания, способствует успешному выполнению лабораторных работ во время экзаменационной сессии.

При подготовке к выполнению контрольного задания следует изучить представленные темы. После изучения всех тем соответствующего раздела следует в письменном виде ответить на вопросы. Порядок выполнения контрольных заданий изложен в конце методических указаний. В случае затруднений рекомендуется обратиться за письменной или устной консультацией в университет.

По основным темам раздела «Материаловедение» дисциплины М.ТКМ программой предусматриваются лабораторные занятия, которые проводятся в лабораториях университета во время экзаменационной сессии. К сдаче экзамена (зачета) по разделу допускаются студенты, имеющие зачтенные контрольные задания и лабораторные работы.

Методические указания по изучению отдельных тем и вопросы для самостоятельной проверки знаний

Введение

Материаловедение – наука, изучающая строение и свойства материалов и устанавливающая связь между их составом, строением и свойствами, а также разрабатывающая пути воздействия на их свойства с целью получения необходимых эксплуатационных характеристик.

Большой вклад в развитие этой науки сделали отечественные ученые и инженеры. Познакомьтесь с историей данной науки, уясните конкретный вклад отечественных ученых и производителей в разное время, пути развития металлургической и машиностроительной промышленности в странах СНГ и Республике Беларусь.

Строение и свойства металлов и сплавов

Общие сведения о металлах

Пояснить, что такое металл, какими основными свойствами обладают металлы и чем эти свойства обусловлены. Познакомиться и разобраться с классификацией металлов. Уяснить атомно-кристаллическое строение металлов, отличие их строения от строения неметаллов. Узнать основные типы кристаллических решеток. Здесь нужно разобраться, почему металлы, имеющие однотипные кристаллические решетки, обладают неодинаковыми свойствами. Характеристики кристаллических решеток – параметры, координационное число, плотность упаковки. Познакомиться с основными типами связей, встречающимися в твердых телах, в частности, в металлах. Уяснить отличие строения «реальных» кристаллов от «идеальных». При этом необходимо понять, что металлы, используемые в практике, тела поликристаллические, состоят из множества мелких кристаллов – зерен, в которых имеется большое количество точечных, линейных и поверхностных дефектов (вакансий, дислокаций). Уясните их появление в кристаллах и влияние на свойства металлов, обратив особое внимание на роль дислокаций при пластической деформации. Познакомьтесь с явлением анизотропии свойств в кристаллах и возможностями получения этого явления у поликристаллических металлов. Разберитесь с явлением аллотропии металлов, в его использовании для получения нужных эксплуатационных свойств металлов.

При рассмотрении вопросов плавления и кристаллизации металлов нужно разобраться в термодинамических основах фазовых превращений. Следует уяснить, что стремление к наименьшему запасу свободной энергии, которое обуславливает плавление и кристаллизацию металла, является частным случаем общего закона природы. Этим же объясняется наличие при разных температурах в одних и тех же металлах разных типов кристаллических решеток.

Разберитесь в механизме процесса кристаллизации чистых металлов, влиянии примесей на этот процесс, образовании зерен, дендритов, образовании и строении слитка. Уясните, какими параметрами характеризуются механические, технологические, физические и химические свойства металлов, основные методы их определения.

Вопросы для самопроверки

1. В чем отличие строения металлов от неметаллов?
2. Опишите строение «реального» и «идеального» кристаллов металла.
3. Укажите основные механические, физические и химические свойства металлов?

Теория сплавов

Ознакомьтесь с понятиями: система, компонент, фаза, структура, сплав, а также способами получения сплавов. Важно понять, что в зависимости от свойств, количественного соотношения элементов, входящих в состав сплава, при его кристаллизации образуются структуры, представляющие собой механические смеси кристаллов этих металлов, кристаллы твердых растворов и химических соединений. Уясните особенности фазовых превращений в сплавах в твердом состоянии. Необходимо иметь представление о современных методах исследования металлических сплавов, построении диаграмм состояния сплавов, их основных типах.

Научитесь проводить анализ диаграмм состояния сплавов с применением правила фаз и правила отрезков, строить кривые охлаждения для двухкомпонентных сплавов. Познакомьтесь с установленной связью между диаграммами состояния и свойствами сплавов (закон Н. С. Курнакова).

Вопросы для самопроверки

1. Что такое система, компонент, фаза, структура, сплав?
2. Объясните сущность термического метода построения диаграмм сплавов?

3. Сформулируйте правило фаз.
4. Приведите правило отрезков.

Железоуглеродистые сплавы

Диаграммы состояния сплавов железо–углерод

Железоуглеродистые сплавы являются важнейшими сплавами, широко применяемыми в различных отраслях народного хозяйства для изготовления деталей машин и конструкций. В связи с этим нужно уделить большое внимание изучению их строения, свойств и методов получения.

Изучение данной темы начинается с рассмотрения строения, полиморфных превращений и свойств чистого железа при различных температурах. Следует изучить свойства чистого углерода, уделив особое внимание графиту, а также взаимодействие углерода с железом.

Метастабильную диаграмму состояния сплавов системы железо–цементит нужно научиться анализировать по основным точкам, линиям, областям. Необходимо знать условия образования и существования равновесных фаз сплавов железа с различным содержанием углерода и их свойства; иметь представление о стабильной диаграмме железо–графит и условиях образования свободного графита в железоуглеродистых сплавах.

Вопросы для самопроверки

1. Когда была построена диаграмма железо–углерод?
2. Вычертите метастабильную диаграмму сплавов системы железо–цементит и покажите, какие структуры существуют в равновесном состоянии у железоуглеродистых сплавов при различных температурах.

Углеродистые стали

Необходимо уяснить влияние углерода и постоянных примесей на микроструктуру, механические и технологические свойства стали, изучить современную классификацию и маркировку сталей по назначению и качеству согласно ГОСТ 380–94, ГОСТ 1050–88, ГОСТ 1435–99, области их применения.

Вопросы для самопроверки

1. Как влияют углерод и постоянные примеси на свойства углеродистой стали?
2. Как классифицируется и маркируется углеродистая сталь?

Чугуны

Изучить влияние углерода и примесей на строение и свойства чугуна. Разобраться с условиями графитизации чугуна, получением, строением и свойствами белого, серого, ковкого и высокопрочного чугунов, их маркировкой по ГОСТ 1412–85, ГОСТ 1215–79, ГОСТ 7293–85 и областью применения.

Вопросы для самопроверки

1. Как влияют углерод и примеси на строение и свойства чугуна?
2. Как классифицируются и маркируются чугуны?

Легированные стали

Изучение этой части начните с классификации примесей. Рассмотрите влияние легирующих элементов на полиморфизм железа, на положение критических точек диаграмм, структуру и свойства стали. Разберитесь, какие элементы образуют в стали карбиды, что они собой представляют, как влияют на ее свойства. Уясните основные дефекты, встречающиеся в легированной стали. Внимательно разберитесь с классификацией и маркировкой легированных сталей по ГОСТ 4543–71.

Вопросы для самопроверки

1. Как влияют легирующие элементы на критические точки диаграмм, структуру и свойства стали?
2. Как классифицируются и маркируются легированные стали?

Термическая обработка сталей

Основы теории термической обработки стали

Изучение теории термической обработки, которая строится на основе общей теории фазовых превращений переохлажденных систем, нужно начать с повторения материала по теории сплавов. Представив, что любая термическая обработка заключается в нагреве сплава, выдержке и охлаждении, разберите процессы, происходящие в сплавах поэлементно. Сначала уясните, как происходит образование зерна аустенита при нагреве, какие наблюдаются разновидности его роста (наследственная величина зерна в стали), что такое действительное зерно стали и как определяется его величина. Затем рассмотрите, что происходит при выдержке стали при температурах образования аустенита. Только после изучения этих превращений перейдите к рассмотрению превращений аустенита при охлаждении. Здесь нужно внимательно разобраться, что собой

представляет перлитное превращение, мартенситное и промежуточное превращения. Все эти превращения рассмотрите по диаграмме изотермического превращения аустенита для эвтектоидной стали, уясните ее теоретическое и практическое значение. Разберитесь с превращениями аустенита при непрерывном охлаждении.

Вопросы для самопроверки

1. Что понимают под наследственной величиной зерна стали, ее разновидности?
2. Охарактеризуйте превращения, происходящие в стали при ее нагреве и охлаждении.

Технология термической обработки стали

Изучение технологии термической обработки стали начните с рассмотрения современной классификации видов термической обработки.

Разберитесь с различными видами отжига, уяснив, какие цели преследует каждый отжиг, режим его проведения. Рассмотрите нормализацию как разновидность отжига. Четко уясните, какой вид термической обработки называется закалкой. Изучите ее разновидности для сталей по температуре нагрева и технологии проведения. Познакомьтесь с применяемыми на практике охлаждающими средами, уяснив этапы механизма охлаждения в них. Необходимо знать понятия закаливаемости и прокаливаемости стали, дефекты в стали, возникающие при закалке, и возможности их предупреждения. Изучите, что такое технология отпуска, разновидности отпуска, для каких целей применяется каждый его вид. Необходимо иметь понятие о термомеханической обработке стали, познакомиться с поверхностной закалкой стали при различных способах нагрева: индукционном, газопламенном, лазерным лучом. Нужно знать особенности термической обработки легированной стали, уяснить назначение и технологию проведения обработки холодом.

Вопросы для самопроверки

1. Приведите классификацию видов термической обработки.
2. С какой целью проводят отжиг, нормализацию, закалку и отпуск?
3. В чем заключаются особенности термической обработки легированной стали?

Основы химико-термической обработки

Подробнее разобрать сущность происходящих процессов и технологию проведения основных видов химико-термической обработки (ХТО): цементации, азотирования, цианирования и диффузионной металлизации. Рассмотрение технологии проведения ХТО необходимо осуществлять на примерах обработки конкретных деталей машин.

Вопросы для самопроверки

1. В чем сущность ХТО?
2. Какие виды ХТО и диффузионной металлизации нашли широкое распространение в промышленности?
3. Из каких сталей детали подвергают цементации, азотированию и цианированию?

Материалы, применяемые в автомобилях, тракторах и сельскохозяйственных машинах ***Конструкционные стали и сплавы***

Изучение начните с повторения материала по углеродистым и легированным сталям. Уясните, какие углеродистые и легированные стали используются в качестве цементируемых и улучшаемых, за счет чего и как изменяются их свойства в результате термической обработки. Разберите, какие стали используют для изготовления пружин, рессор, лемехов плугов, изучите их термическую обработку. Выясните, при добавлении каких элементов в сталь улучшается ее обработка резанием (автоматные стали).

Вопросы для самопроверки

1. Какие конструкционные стали применяются в качестве цементируемых и улучшаемых?
2. Какие стали используются для изготовления пружин, рессор, лемехов плугов?

Инструментальные стали и твердые сплавы

Внимательно разберитесь, какие стали (углеродистые и легированные) применяются для изготовления режущего и измерительного инструментов. Уясните технологию их термической обработки, придающей необходимые свойства инструментам. Изучите штамповые стали для холодной и горячей штамповки. Особое внимание обратите на свойства, структуру и технологии изготовления пластин

из металлокерамических твердых сплавов для оснащения инструментов.

Вопросы для самопроверки

1. Какие стали и сплавы применяются для режущего и измерительного инструментов, штампов?

Стали и сплавы с особыми физико-химическими свойствами

К сталям и сплавам с особыми физико-химическими свойствами относятся: нержавеющая сталь, сталь и сплавы для работы при высоких температурах (жаропрочные и жаростойкие сплавы), износостойкие, электротехнические, с особыми тепловыми свойствами. Уясните, за счет чего получаются необходимые свойства этих материалов и где они применяются.

Вопросы для самопроверки

1. Какие стали являются нержавеющими, износостойкими, жаропрочными, жаростойкими?

Цветные металлы и сплавы

Изучение начните со свойств чистой меди, затем перейдите к изучению строения, свойств и термической обработки медных сплавов, которые делятся на две основные группы: латуни и бронзы.

Латунь и бронза классифицируются по своим технологическим свойствам на литейные и деформируемые. В свою очередь, бронзы литейные и деформируемые делятся на оловянистые (содержащие в своем составе олово) и безоловянистые. Рассматривая их маркировку по государственным стандартам, обратите внимание на различие маркировки литейных и деформируемых бронз и латуней.

Изучение алюминиевых и магниевых сплавов начните с рассмотрения свойств чистого алюминия и магния. Как и медные сплавы, алюминиевые и магниевые сплавы делятся на литейные и деформируемые. Обратите особое внимание на термическую обработку сплавов этих металлов. Познакомьтесь с их маркировкой и применением.

Рассмотрение антифрикционных сплавов начните с требований, предъявляемых к ним. Изучите структуру сплавов, обеспечивающую выполнение этих требований, их маркировку. Рассмотрите

применение цветных металлов и сплавов в сельскохозяйственном и автотракторном машиностроении.

Вопросы для самопроверки

1. Какой термической обработке подвергаются медные, алюминиевые, магниевые сплавы и как при этом изменяются их свойства?
2. Какие сплавы отвечают требованиям, предъявляемым к антифрикционным сплавам?

Базовый материал для подготовки к сдаче зачета

1. **Металлы – тела кристаллические.** Они состоят из атомов, расположенных в пространстве в строго определенном порядке, на определенном расстоянии друг от друга, образуя простейшие геометрические фигуры, элементарные кристаллические решетки.

Типы кристаллических решеток:

- объемно-центрированный куб – ОЦК (рисунок 1);
- гранецентрированный куб – ГЦК (рисунок 2);
- гексагональная плотно упакованная – ГПУ (рисунок 3).

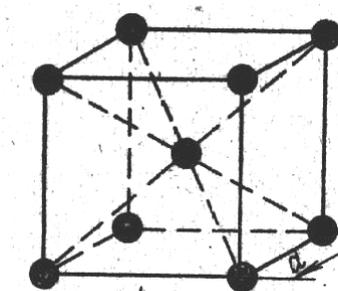


Рисунок 1 – ОЦК. Атомы в узлах и один в центре

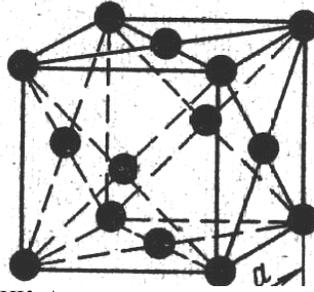


Рисунок 2 – ГЦК. Атомы в узлах и в центре каждой грани

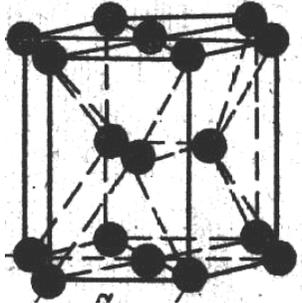


Рисунок 3 – ГПУ. Атомы в узлах, в центре верхней и нижней граней, а также 3 атома в центре кристаллической решетки

2. **Твердость** – способность металла сопротивляться внедрению в него более твердого тела.

Прочность – способность металла сопротивляться разрушению под действием внешних сил.

Пластичность – способность металла изменять размеры, форму под действием внешних сил без разрушения.

Ударная вязкость – способность металла выдерживать ударные и другие динамические нагрузки.

Характеристики прочности и пластичности определяются при статических испытаниях на растяжение (рисунок 4).

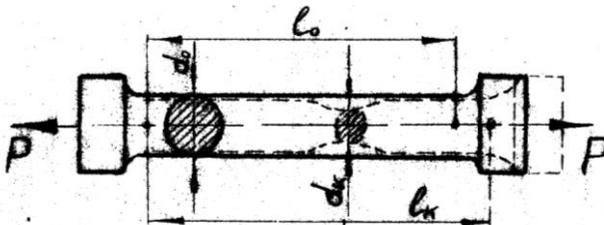


Рисунок 4 – Образец для испытания на растяжение

Предел прочности: – условное напряжение, соответствующее максимальной нагрузке, выдержанной образцом до разрушения, МПа.

$$\delta = \frac{L_k - L_0}{L_0} 100\% \text{ – относительное удлинение;}$$

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} 100\% \text{ – относительное сужение.}$$

Ударная вязкость определяется при динамических испытаниях на маятниковом копре на стандартных образцах (рисунок 5).

$$KC = \frac{K}{S_0}, \text{ Дж/м}^2,$$

где K – работа удара, Дж;

S_0 – площадь поперечного сечения образца в месте концентратора напряжения, м²

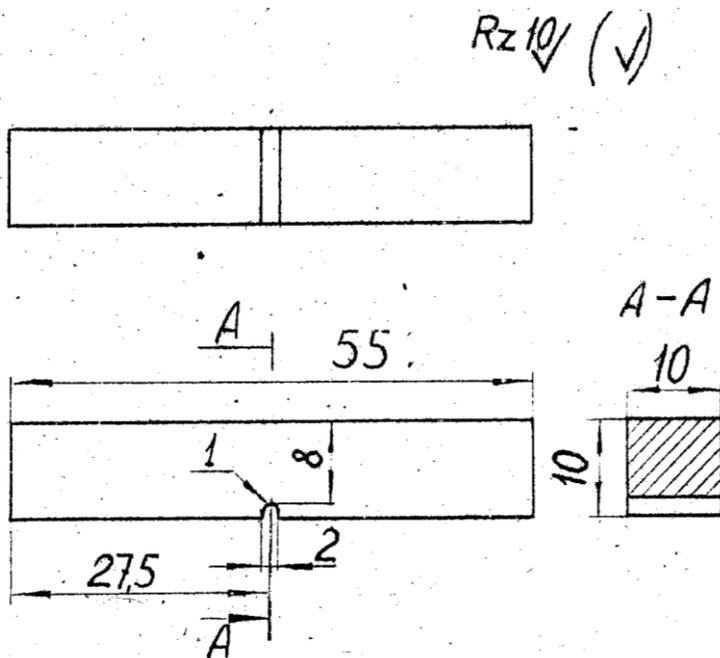


Рисунок 5 –Образец для испытаний на ударную вязкость

Твердость металлов и сплавов определяется двумя основными методами.

По методу Бринелля (HB, HBW)

В испытуемый металл под нагрузкой внедряется стальной закаленный или твердосплавный шарик определенного диаметра. В результате испытания образуется отпечаток в виде шарового сегмента. Измеряется диаметр полученного отпечатка. Твердость по Бринеллю HB рассчитывается как отношение усилия к площади полученного отпечатка (площадь шарового сегмента), кгс/мм² (МПа).

По методу Роквелла. (HRC, HRB, HRA и др.)

В испытуемый материал внедряется твердосплавный или алмазный конус – для измерения твердых материалов, шарик – для измерения мягких материалов.

Внедрение инденторов происходит с предварительной и последующей основной нагрузкой. Мерой твердости является разность глубин внедрения от основной и предварительной нагрузки. Отсчет твердости проводится по шкалам С, В, А в условных единицах.

Железо (Fe) – металл серебристо-серого цвета.

HB 60 кгс/мм² (600 МПа) – твердость по Бринеллю; $\sigma_B = 200$ МПа – предел прочности; $\delta = 40$ % – относительное удлинение; $\gamma = 7,85$ г/см³ – плотность.

Железо обладает аллотропностью. Изменяет тип кристаллической решетки при различных температурах.

Структурные составляющие: феррит, аустенит, цементит, перлит, ледебурит.

Феррит – твердый раствор внедрения углерода в α -Fe при $t^\circ = 727^\circ\text{C}$ растворяет 0,02% С, при $t^\circ = 20^\circ\text{C}$ растворяет 0,006% С.

HB 60 кгс/мм² (600 МПа); $\sigma_B = 250$ МПа; $\delta = 40$ %.

Аустенит – твердый раствор внедрения углерода в γ -Fe при $t^\circ = 1147^\circ\text{C}$ растворяет 2,14% С, при $t^\circ = 727^\circ\text{C}$ растворяет 0,8% С

HB 160–200 кгс/мм² (1600–2000 МПа).

Цементит – химическое соединение Fe₃C содержит углерода 6,67%. HB 800 кгс/мм² (8000 МПа); $\delta = 0$ %.

Перлит – равномерная механическая смесь (феррит и цементит) HB 120–220 кгс/мм² (1200–2200 МПа). Кристаллизуется из твердого

раствора аустенита при постоянной $t^{\circ} = 727^{\circ}\text{C}$. Содержание углерода 0,8%.

Ледобурит – равномерная механическая смесь (аустенит и цементит). Образуется при кристаллизации жидкого сплава состава 4,3% С при $t^{\circ} = 1147^{\circ}\text{C}$. НВ 600 кгс/мм² (6000 МПа).

Сталь – это сплав железа с углеродом, при содержании углерода до 2,14%. Во всех сталях присутствуют постоянные примеси: Si, Mn, S, P, O₂, N, H₂.

Стали по назначению подразделяются на

- конструкционные;
- инструментальные;
- специального назначения.

По качеству стали делятся на

- стали обыкновенного качества;
- качественные;
- высококачественные.

Углеродистые качественные стали маркируются по содержанию углерода в сотых долях: 08, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75. Они могут быть с обычным и с повышенным содержанием марганца (обозначаются буквой Г в конце марки).

Стали 10кп, 15кп – мягкие пластичные, применяются для листовой холодной штамповки, вытяжки. Из них изготавливаются все кузовные детали грузовых, легковых автомобилей.

10, 15, 20, 25 – цементируемые стали. Применяются для деталей, требующих твердости и износостойкости поверхности при сохранении вязкой сердцевины.

35, 40, 45, 50 – улучшаемые стали (валы, втулки, шестерни, шатуны, поршневые пальцы).

55, 60, 65 – пружинно-рессорные. Лучшие комплексы механических свойств у сталей 55Г, 60Г, 65Г.

65, 70, 75 – стали для изготовления деталей, требующих высокой износоустойчивости при абразивном изнашивании (лемеха, лапы культиваторов, диски посевных и почвообрабатывающих машин). Лучшие комплексы механических свойств у сталей 65Г, 70Г, 75Г.

Высококачественные углеродистые стали – марки У7А, У8А, У9А, У10А, У11А, У12А, У13А. Цифры указывают на содержание углерода в десятых долях, буква А обозначает, что сталь высококачественная (меньшее содержание серы и фосфора).

У7А, У8А, У9А – марки сталей для изготовления инструментов по дереву.

У10А, У11А, У12А, У13А – марки сталей для изготовления мелких сверл, фрез, метчиков, разверток.

Легированные стали – сплавы на основе железа и углерода, в состав которых введены легирующие элементы.

По назначению делятся на

- конструкционные;
- инструментальные;
- специального назначения.

По качеству стали подразделяются на

- качественные;
- высококачественные;
- особо высококачественные.

Буквы указывают на легирующий элемент, цифра после букв – количество легирующего элемента в целых долях. Две цифры в начале маркировки стали указывают содержание углерода в сотых долях, одна цифра – содержание углерода в десятых долях.

Легирующие элементы: Х – хром; Г – марганец; М – молибден; В – вольфрам; Н – никель; Т – титан; Ф – ванадий; Ю – алюминий; Ni – ниобий; А (в середине марки) – азот.

18ХГТ (0,18% С, 1% Cr, 1% Mn, 1% Ti) – качественная;

38ХМЮА (0,38% С, 1% Cr, 1% Mo, 1% Al) – высококачественная;

12ХН3А (0,12% С, 1% Cr, 3% Ni) – высококачественная;

40ХН (0,40% С, 1% Cr, 1% Ni) – качественная.

Закалка сталей проводится для получения высокой твердости деталей при образовании неравновесной структуры (мартенсита).

Закалка – операция термической обработки, при которой доэвтектоидные стали нагревают выше критической точки A_{c3} (линия GS на диаграмме Fe – Fe₃C) на 30–50 °С; эвтектоидные и заэвтектоидные стали выше A_{c1} (линия PSK) на 30–50 °С, выдерживают при этой температуре и охлаждают со скоростью выше критической. В результате образуется структура – мартенсит + Аост. Закалка не является окончательной операцией термической обработки.

Критическая скорость заковки – наименьшая скорость охлаждения, при которой образуется структура мартенсит.

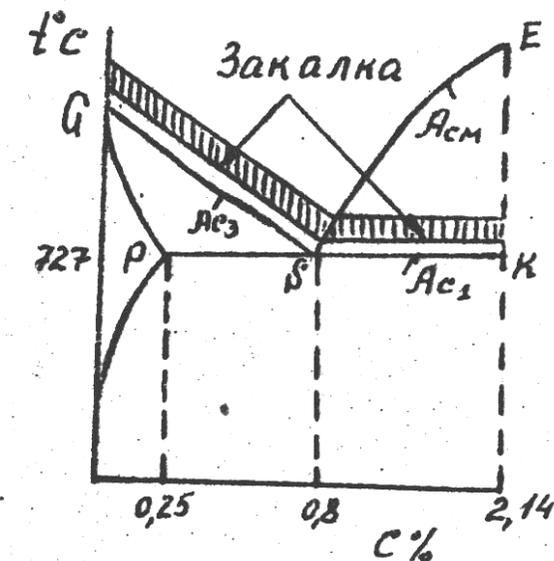


Рисунок 6 – Температурные интервалы нагрева стали под закалку

Способы заковки:

- непрерывная – в одном охладителе;
- прерывистая – в двух охладителях (вода, масло);
- ступенчатая – охлаждают до температуры выше начала мартенситного превращения и выдерживают до начала распада аустенита, далее – охлаждение в масле, на воздухе;
- изотермическая – соляная ванна, выдержка до полного распада аустенита, чаще всего для получения структуры бейнита;
- заковка с самоотпуском.

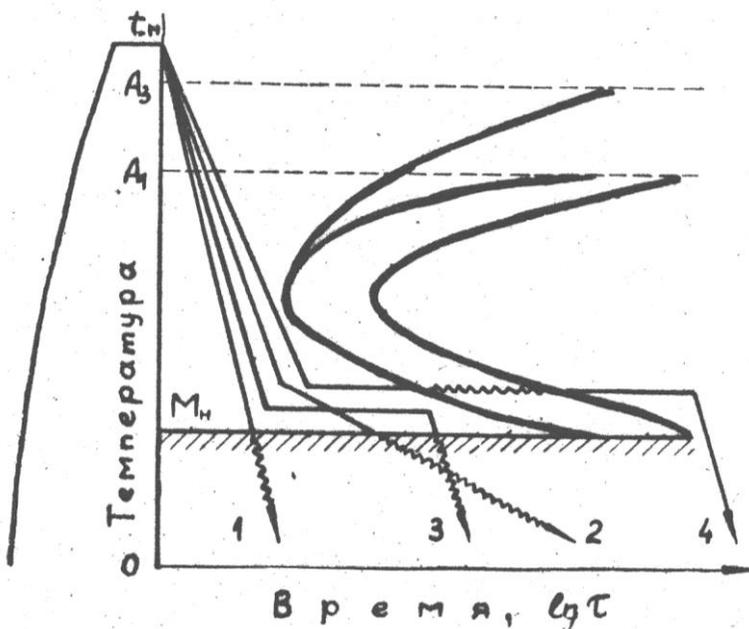


Рисунок 7 – Способы закалки

Отпуск стали – операция термической обработки, при которой закаленную сталь нагревают ниже критической точки A_{c1} , выдерживают при этой температуре, затем (чаще всего) охлаждают на воздухе.

Отпуск сталей применяют для снятия напряжений и получения необходимых механических свойств. Существуют 3 вида отпуска.

Низкий отпуск – нагрев закаленной стали до $t^\circ = 200^\circ\text{C}$, структура – мартенсит отпуска. Сохраняется высокая твердость. Применяется для изготовления деталей, требующих высокой твердости (все инструменты, шестерни, валы, втулки, распределительные валы и т. д.).

Средний отпуск – нагрев закаленной стали до $t^\circ = 350\text{--}500^\circ\text{C}$, структура – троостит отпуска (пружины, рессоры, детали, требующие максимальной упругости).

Высокий отпуск – нагрев закаленной стали до $t^\circ = 500\text{--}650^\circ\text{C}$, структура – сорбит отпуска. Применяется для изготовления деталей, требующих вязкой структуры.

Улучшение = закалка + высокий отпуск.

Поверхностная закалка сталей применяется для изготовления деталей, работающих поверхностью (шестерни, поршневые пальцы, распределительные валы (кулачки), валы, втулки и т. д.). При поверхностной закалке деталь нагревают так, чтобы поверхностный слой был нагрет до t° закалки, а сердцевина – до t° ниже температуры закалки, с выдержкой и последующим охлаждением со скоростью выше критической. При поверхностной закалке нагрев всегда проводится с большой скоростью.

Способы поверхностной закалки:

- закалка ТВЧ;
- с газопламенным нагревом;
- в среде электролита;
- лазерная закалка.

Для поверхностной закалки применяют среднеуглеродистые стали.

Самым распространенным способом поверхностной закалки является закалка ТВЧ. Детали помещают в магнитное поле высокой частоты (в индуктор). В результате в детали индуцируются токи той же частоты. Частота тока может быть от 2500 Гц до 20000 Гц. Срабатывает поверхностный эффект, ток течет только по поверхности детали. При дальнейшем охлаждении со скоростью выше критической закаливается поверхностный слой. Сердцевина остается вязкой.

Химико-термическая обработка (ХТО) – насыщение поверхностей стали каким-либо элементом с целью получения высокой твердости, износостойкости, в ряде случаев коррозионной стойкости и т. д. при сохранении вязкой, пластичной сердцевины. При ХТО изменяются химический состав, структура и свойства стали.

Сущность ХТО.

Получение насыщаемого элемента в атомарном состоянии – диссоциация.

Поглощение насыщающего элемента поверхностью детали – адсорбция.

Перемещение насыщающего элемента вглубь – диффузия.

Цементация – насыщение низкоуглеродистых сталей углеродом. Деталь помещают в среду, богатую углеродом, выдерживают при $t^{\circ} = 900\text{--}930^{\circ}\text{C}$ длительное время.

При газовой цементации скорость насыщения 0,2 мм в час. При цементации в твердом карбюризаторе – 0,1 мм в час. После цементации всегда проводят закалку и низкий отпуск. Если требуется повышенная твердость сердцевины, то проводят две закалки (для сердцевины и поверхности), а затем – низкий отпуск.

Азотирование – насыщение поверхности детали азотом. Азотирование проводят для получения высокой твердости, износостойкости, коррозионной стойкости детали (при сохранении вязкой сердцевины). Азотированию подвергают легированные стали со средним содержанием углерода (например, 35ХМЮА, 38ХМЮА). Азотирование проводится при температуре 500–580 °С. Процесс длительный. Промышленный способ – газовое азотирование. В настоящее время применяют азотирование «в тлеющем разряде». Азотирование – окончательный процесс термообработки. Перед азотированием проводят закалку и высокий отпуск.

Цианирование – одновременное насыщение поверхности стали углеродом и азотом в жидких средах.

Нитроцементация – одновременное насыщение поверхности стали углеродом и азотом в газовой среде ($t = 800\text{--}880^{\circ}\text{C}$), часто заменяет процесс цементации. После нитроцементации проводят закалку и низкий отпуск.

Примеры контрольных самостоятельных заданий

Задание 1. Классификация, маркировка, свойства и применение сталей и чугунов

Содержание задания:

1. Изучить влияние углерода и постоянных примесей на свойства сталей и чугунов.
2. Изучить и описать классификацию, маркировку и применение углеродистых конструкционных и инструментальных сталей.
3. Изучить и описать классификацию, маркировку и области применения белых и серых чугунов.
4. Подготовить выводы по заданию

Задание 2. Технология термической обработки углеродистых сталей. Закалка и отпуск

Содержание задания:

1. Изучить теоретические основы закалки и отпуска стали.
2. Практически освоить технологии закалки и отпуска закаленной стали
3. Установить изменение структуры и свойств стали в результате закалки.
4. Изучить изменение структуры и свойств закаленной стали при отпуске.
5. Подготовить выводы по заданию.

6. ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНУ (ЗАЧЕТУ) СТУДЕНТОВ ДНЕВНОЙ И ЗАОЧНОЙ ФОРМ ОБУЧЕНИЯ

Теоретические вопросы

1. Атомно-кристаллическое строение металлов. Типы связей, кристаллические решетки.
2. Процесс кристаллизации металлов. Получение крупно и мелкозернистой структуры при самопроизвольной развивающейся кристаллизации.
3. Типы кристаллических решеток металлов и их дефекты.
4. Аллотропия и анизотропия металлов.
5. Плавление и кристаллизация металлов. Влияние примесей и других факторов на процесс кристаллизации.
6. Понятия: сплав, компонент, фаза. Механические смеси, твердые растворы, химические соединения.
7. Типы твердых растворов (схемы кристаллических решеток).
8. Диаграмма состояния сплавов и экспериментальный метод ее построения.
9. Правило отрезков и его применение для определения химического состава и количественного соотношения фаз в сплаве.
10. Чугун. Маркировка и применение ковкого чугуна.
11. Связь между диаграммами состояния и свойствами сплавов. Закон Н. С. Курнакова.
12. Железо и его свойства. Кривая охлаждения чистого железа.
13. Аллотропия железа и его формы.
14. Фазовый состав железоуглеродистых сплавов.
15. Эвтектическое превращение в системе Fe–Fe₃C.
16. Эвтектоидное превращение в системе Fe–Fe₃C.

17. Структурные составляющие железоуглеродистых сплавов и их свойства.
18. Стали. Влияние углерода и постоянных примесей на свойства сталей.
19. Углеродистые качественные стали, маркировка, применение.
20. Углеродистые стали обыкновенного качества, маркировка и применение.
21. Белые чугуны. Влияние постоянных примесей на процесс графитизации чугунов.
22. Микроструктура, свойства, маркировка и применение серого чугуна.
23. Микроструктура свойства, маркировка и применение высокопрочного чугуна.
24. Получение, микроструктура, свойства, маркировка и применение ковкого чугуна.
25. Легированная сталь. Классификация и маркировка легированных сталей.
26. Классификация видов термической обработки.
27. Превращения перлита в аустенит при нагреве.
28. Действительная и наследственная величина зерна, влияние размера зерна на механические свойства сталей.
29. Способы нагрева сталей при термообработке.
30. Превращение аустенита в перлит при медленном охлаждении.
31. Диаграмма изотермического превращения аустенита для стали У8.
32. Превращение аустенита в перлит при охлаждении стали У8.
33. Полная и неполная закалка углеродистых сталей.
34. Мартенситное превращение в сталях.
35. Отжиг и нормализация. Виды отжигов.
36. Закалка сталей, различные ее способы.
37. Охлаждающие среды при закалке, их достоинства и недостатки.
38. Отпуск закаленной стали, его виды. Применение отпуска.
39. Превращения при отпуске.
40. Термомеханическая обработка стали.
41. Прокаливаемость сталей, методы ее определения.
42. Углеродистая инструментальная сталь, маркировка, свойства, применение.
43. Низколегированные инструментальные стали. Маркировка, свойства, применение.

44. Быстрорежущая инструментальная сталь, свойства, применение.
45. Твердые инструментальные сплавы, технология получения, маркировка, особенности применения.
46. Поверхностная закалка сталей.
47. Теоретические основы химико-термической обработки.
48. Методы поверхностного упрочнения деталей машин.
49. Дефекты, возникающие при закалке, их причины и методы устранения.
50. Цементация сталей.
51. Цианирование и нитроцементация.
52. Процесс азотирования стали.
53. Диффузионная металлизация.
54. Медь и ее сплавы. Латунь, маркировка, свойства и применение.
55. Алюминий и его сплавы. Силумин и дюралюминий, маркировка, свойства и применение.
56. Бронзы, их состав, структура, свойства и применение.
57. Требования к подшипниковым сплавам для подшипников скольжения. Основные сплавы.
58. Стали. Классификация сталей по назначению.

Практические вопросы

59. Назначьте режим термической обработки лемеха плуга из стали 65Г.
60. Определите температуру полной и неполной закалки стали 50 и укажите ее структуру после закалки.
61. Назначьте технологию термической обработки поршневого пальца из стали 40 для получения твердости поверхности на глубине 1–2 мм 56 HRC. Опишите получаемую структуру после термической обработки.
62. Постройте кривую охлаждения стали с 0,6% углерода по диаграмме Fe–Fe₃C с помощью правила фаз.
63. Расшифруйте марки сплавов: 20ХНЗА, 38Х2МЮА, Р6М5, Х12М.
64. Назначьте режим термической обработки для сверла из стали У11А.
65. Расшифруйте марки сплавов: СЧ10, ВЧ100, КЧ50-4, СЧ25.

66. Постройте кривую охлаждения для сплава системы Fe–Fe₃C с 5% углерода и определите количественное соотношение структурных составляющих при $t = 20^{\circ}\text{C}$.

67. Расшифруйте марки сплавов: Б88, БрАЖН10-4-4, 9ХС, стали 65.

68. Выберите сталь для изготовления молотка и назначьте режим термообработки.

69. Расшифруйте марки сплавов: КЧ-33-8, Ст1кп, 20ХН, 50ХФА, ЛА77-2.

70. Постройте кривую охлаждения для сплава системы Cu–Ni с 40% никеля с помощью правила фаз по диаграмме состояния.

71. Определите состав и количество фаз сплава системы Pb–Sb с 60% сурьмы при $t = 300^{\circ}\text{C}$ по диаграмме состояния.

72. Назначьте термическую обработку шестерни из стали 18ХГТ для получения твердости поверхности зубьев на глубине до 1,2 мм 55 HRC.

73. Объясните технологию полной закалки и высокого отпуска для вала из стали 40. Опишите получаемую структуру после термической обработки.

74. Расшифруйте химический состав сплавов: ЛА6 7-2,5, ЛК80-3, БрОЦ 4-3, БрОЦСН 3-7-5-1.

75. Расшифруйте химический состав сплавов: Б88, А20, Ст3кп, стали У12ГА, стали 50.

76. Расшифруйте химический состав и применение сплавов ВК6, Т15К6, ТТ30КЧ.

77. Назначьте режим термической обработки метчика из стали У10А.

78. Определите количественное соотношение структурных составляющих в сплаве системы Pb–Sb с содержанием сурьмы 20% при 20°C на диаграмме состояния.

79. Выберите материал для изготовления напильника и назначьте режим его термической обработки.

80. Расшифруйте химический состав сталей 65Г, 12ХН3А, У10А, Х13, ХВГ.

81. Назначьте режим закалки и отпуска пружины из стали 65Г.

82. Постройте кривую охлаждения железоуглеродистого сплава с 3% углерода по диаграмме состояния Fe–Fe₃C с применением правила фаз.

83. Изложите методы определения твердости металлов.

84. Назначьте режим термической обработки пружины из стали 65Г.

85. Определите состав и количественное соотношение фаз сплава Pb–Sb, содержащим 30% сурьмы, при $t = 300^{\circ}\text{C}$ на диаграмме состояния.

86. Приведите методы определения прочности, пластичности и ударной вязкости.

87. Определите количественное соотношение структурных составляющих в стали 40 при комнатной температуре.

88. Определите состав и количественное соотношение фаз в сплаве железа с углеродом 1% С при 1400°C по диаграмме состояния Fe–Fe₃C.

89. По диаграмме Fe–Fe₃C определить максимальное количество углерода в аустените при следующих температурах: 800°C , 900°C и 1100°C .

90. Опишите метод микроструктурного анализа металлов и сплавов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дисциплина «Материаловедение», рассмотренная в учебно-методическом комплексе, позволяет студентам агротехнических специальностей квалифицированно решать вопросы выбора необходимых конструкционных материалов для изготовления различных деталей сельскохозяйственной техники как при выполнении курсовых и дипломных проектов, так и в дальнейшей инженерной деятельности.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная литература

1. Гуляев, А.П. Металловедение : учебник / А.П. Гуляев. – Изд. 6-е, перераб. и доп. – Москва : Металлургия, 1986. – 544 с.
2. Евстратова, Н.Н. Материаловедение / Н.Н. Евстратова и др. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2006. – 268 с.
3. Фетисов, Г.П. Материаловедение и технология металлов / Г.П. Фетисов [и др.]. – 3-е изд. – Москва : Высшая школа, 2005. – 862 с.
4. Арзамасов, Б.Н. Материаловедение / Б.Н. Арзамасов [и др.]. – Москва : МГТУ, 2003 – 646 с.
5. Лахтин, Ю.М. Металловедение / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – Москва : Машиностроение, 1990. – 528 с.
6. Капцевич, В.М. Материаловедение и технология конструкционных материалов : метод. указ. / В.М. Капцевич [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2008. – 105 с.
7. Практикум по технологии конструкционных материалов и материаловедению / под общ. ред. С.С. Некрасова. – Москва : Агропромиздат, 1991. – 287 с.

Дополнительная литература

8. Ржевская, С.В. Материаловедение: учебник для вузов / С.В. Ржевская. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – Москва : Логос, 2004. – 424 с.
9. Технология конструкционных материалов. Лабораторный практикум / под ред. В.М. Ковалевского. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 288 с.
10. Золотаревский, В.С, Механические свойства металлов / В.С. Золотаревский [и др.]. – Москва : МИСИС – 1998. – 400 с.
11. Худокормова, Р.Н. Материаловедение. Лабораторный практикум : учеб. пособие для вузов / Р.Н. Худокормова, Ф.И. Пантелеенко. – Минск : Высшэйшая школа, 1988. – 224 с.

ПРИМЕРЫ ТЕСТОВЫХ ЗАДАНИЙ

*по разделу «Материаловедение» дисциплины
«Материаловедение и технология конструкционных материалов»
для сдачи лабораторных работ*

Тестирование является одной из наиболее современных форм автоматизированного контроля, при которой компоновка заданий в блочно-модульной системе обучения позволяет весь процесс оценки знаний студентов вести с помощью компьютерной техники.

Тестовые задания предназначены для помощи в активной самостоятельной работе студентов над материалами дисциплины «Материаловедение и технология конструкционных материалов», изучаемой на всех инженерных факультетах сельскохозяйственных вузов. Они составлены применительно к программированному обучению раздела «Материаловедение» при сдаче лабораторных работ. Для каждой темы приведен пример тестового задания в форме вопросов.

Опыт преподавания раздела «Материаловедение» показывает, что программированное обучение и текущий контроль знаний активизируют самостоятельную работу студентов и создают условия для качественного изучения дисциплины на протяжении всего семестра.

Форма тестовых заданий предусматривает выбор одного правильного ответа из нескольких предложенных вариантов. Задания представлены главным образом в виде утверждения, которому соответствует одно правильное суждение или ответ.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ

**ПРОЧНОСТИ, ПЛАСТИЧНОСТИ И УДАРНОЙ
ВЯЗКОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ»**

1. Способность материала сопротивляться деформации или разрушению в условиях статического нагружения называется:

- 1) ударной вязкостью;
- 2) пластичностью;

- 3) износостойкостью;
- 4) прочностью.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2
«ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ»

1. Твердость по Роквеллу измеряется:
 - 1) в %;
 - 2) в МПа (кг/мм^2);
 - 3) в Дж/м^2 ;
 - 4) твердость по Роквеллу – безразмерная величина.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3
«МИКРОСТРУКТУРНЫЙ
МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ»

1. Структура доэвтектоидной стали состоит из:
 - 1) цементита;
 - 2) феррита и перлита;
 - 3) перлита и цементита;
 - 4) перлита.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4
«ТЕРМИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ
СПЛАВОВ И ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ
СПЛАВОВ СВИНЕЦ–СУРЬМА»

1. Отсутствие горизонтальной площадки на кривой охлаждения говорит о том, что:
 - 1) кривая охлаждения принадлежит чистому металлу;
 - 2) кривая принадлежит эвтектическому сплаву;
 - 3) кривая отображает образование твердого раствора;
 - 4) у металлических сплавов такой кривой охлаждения не может быть.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5
«АНАЛИЗ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ
ЖЕЛЕЗО–ЦЕМЕНТИТ»

1. Количество углерода в эвтектическом сплаве диаграммы состояния сплавов железо–цементит составляет:
 - 1) 0,8%;
 - 2) 2,14%;
 - 3) 4,3%;
 - 4) 6,67%.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6
«ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ, СВОЙСТВ
И ПРИМЕНЕНИЕ УГЛЕРОДИСТЫХ
СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ»

1. Структура серого чугуна на перлитной основе состоит из:
 - 1) феррита и графита глобулярного;
 - 2) перлита и графита пластинчатого;
 - 3) феррита, перлита и графита пластинчатого;
 - 4) феррита и графита хлопьевидного.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7
«ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛЕЙ.
ЗАКАЛКА И ОТПУСК»

1. Критическая скорость закалки – это:
 - 1) наименьшая скорость получения чистого мартенсита;
 - 2) скорость, при которой образуется трещина;
 - 3) характеристика охлаждающей среды;
 - 4) наибольшая из возможных скоростей охлаждения.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8
«ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ
СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ»

1. Сущность процесса цементации заключается:
 - 1) в насыщении поверхностного слоя углеродом;
 - 2) в насыщении поверхностного слоя азотом;
 - 3) в насыщении поверхностного слоя углеродом с последующей закалкой;
 - 4) в насыщении поверхностного слоя углеродом и азотом.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9
«ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ, СВОЙСТВ
И ПРИМЕНЕНИЯ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ»

1. Сплав алюминия с кремнием называется:
 - 1) бронза;
 - 2) латунь;
 - 3) силумин;
 - 4) дуралюмин.

**РЕШЕНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ПО ВЫБОРУ
РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЬНЫХ
ИЗДЕЛИЙ ПО ТЕМЕ
«Технология термической обработки сталей»**

Задача: *Назначить режим термической обработки детали, указав окончательную структуру стали*

Пример решения. Назначить режим термической обработки пружины, изготовленной из стали 65Г.

Сталь 65Г конструкционная, качественная, с повышенным содержанием марганца – 1,0%, углерода – 0,65%. Сталь – доэвтектоидная.

Пружина должна обладать высокой упругостью. Назначается режим – закалка и средний отпуск.

Температура под закалку находится по диаграмме Fe–C (рисунок 1).

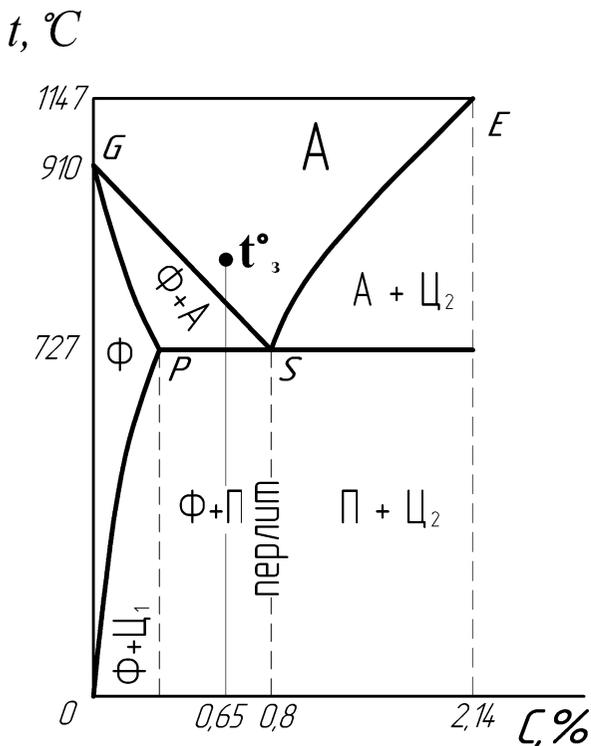


Рисунок 1 – Левый (стальной) угол диаграммы Fe–C

Деталь нагревается выше критической точки A_{c3} на 30–50°C. Температура нагрева под закалку 790–810°C (определяется по диаграмме). Изделие выдерживается при этой температуре, затем непрерывно охлаждается в одном охладителе, в масле. Структура после закалки – *мартенсит + аустенит остаточный*. После закалки назначается средний отпуск при температуре 450°C. Окончательная структура стали – *троостит отпуска*.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Научно-теоретическое содержание учебно-методического комплекса «Материаловедение»	4
1.1 Глоссарий	4
1.2 Темы лекций и их содержание	9
1.3 Основной текст	11
Тема 1 «Введение. Атомно-кристаллическое строение металлов и процесс кристаллизации»	11
Тема 2 «Теория сплавов»	25
Тема 3 «Железоуглеродистые сплавы»	40
Тема 4 «Углеродистые стали и чугуны. Легированные стали»	53
Тема 5 «Теория термической обработки»	78
Тема 6 «Технология термической обработки сталей»	94
Тема 7 «Поверхностное упрочнение сталей»	109
Тема 8 «Инструментальные стали и сплавы»	122
Тема 9 «Цветные металлы и сплавы. Антифрикционные сплавы»	136
2 Материалы к лабораторным работам	149
3 Управляемая самостоятельная работа студентов	154
Рекомендации по выполнению УСРС по теме «Железоуглеродистые сплавы»	154
Рекомендации по выполнению УСРС по теме «Поверхностное упрочнение»	156
4 Примеры разноуровневых вопросов для проверки результатов изучения модуля	158
5 Методические указания по изучению раздела «Материаловедения» студентами заочной формы обучения	162
Общие методические указания и требования	162
Методические указания по изучению отдельных тем и вопросы для самостоятельной проверки знаний	163
Базовый материал для подготовки к сдаче зачета	170
Примеры контрольных самостоятельных заданий	179
6 Перечень вопросов для подготовки к экзамену (зачету) студентов дневной и заочной форм обучения	180
Заключение	185
Рекомендуемая литература	186
Приложение А	187
Приложение Б	190

Учебное издание

Андрушевич Андрей Александрович
Романова Татьяна Константиновна

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Учебно-методический комплекс

Компьютерная графика *А.А. Кадолич*

Ответственный за выпуск *М.В. Капцевич*
Редактор *Н.А. Антипович*
Корректор *Н.А. Антипович*
Компьютерная верстка *Н.А. Антипович, Ю.П. Каминская*

Подписано в печать 19.12.2008 г. Формат 60×84¹/₁₆
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 11,2.
Уч.-изд. л. 8,7. Тираж 200 экз. Заказ 1145.

Издатель и полиграфическое исполнение
Белорусский государственный аграрный технический университет
ЛИ № 02330/0131734 от 10.02.2006. ЛП № 02330/0131656 от 02.02.2006.