

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

О.С. СИРОТКИН, А.Е. БУНТИН, Р. О. СИРОТКИН

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.
ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Практикум

2-е изд. перераб., доп. и испр.

Казань 2017

УДК 621.315

ББК 30.3

С40

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор Казанского государственного
технологического университета *Р.Я. Дебердеев*;
кандидат химических наук, доцент Казанского государственного
энергетического университета *Т.Б. Татаринцева*

С40 Сироткин О.С., Бунтин А.Е., Сироткин Р.О.

Материаловедение. Технология конструкционных материалов:
практикум – 2-е изд. перераб., доп и испр / О.С. Сироткин,
А.Е. Бунтин, Р.О. Сироткин – Казань: Казан. гос. ун-т, 2017. – 156 с.

В практикуме изложено десять лабораторных работ, посвященных
исследованию структуры и свойств металлических материалов.
Из них четыре лабораторные работы основаны на использовании программного
обеспечения – виртуальной лабораторной среды по сопротивлению материалов,
предназначенной для моделирования методов испытаний механических свойств
различных материалов.

Учебное издание предназначено для студентов всех направлений
подготовки, в том числе бакалавров, изучающих металлические материалы,
применяемые в производстве различных по функциональности изделий
и конструкций.

УДК 621.315

ББК 30.3

© Сироткин О.С., Шибяев П.Б., Бунтин А.Е., 2011

© Сироткин О.С., Бунтин А.Е., Сироткин Р.О., 2017,

2-е изд. перераб., доп и испр.

© Казанский государственный энергетический университет, 2017

ВВЕДЕНИЕ

Материаловедение – наука о совокупном вкладе влияния элементного состава и типа его связи на разных уровнях структурной организации (микро- мезо- и макро) металлических и неметаллических материалов на их строение и свойства, которые определяют область применения и методы модификации их структуры и переработки в изделия. В широком смысле материал – это любая форма материи (поле и вещество) или уровень организации (вид) вещества, который может быть использован или используется природой и человеком для получения других его видов и форм в эволюционных процессах, с целью реализации конкретной практической задачи, необходимости в целом и т.д. В более узком *практическом смысле материал* – это *тот вид вещества или совокупность нескольких его типов (фаз) в виде одной материальной системы (материального тела), предназначенные для получения продукции в виде сырья, изделия или конструкции*. Изучение дисциплины «Материаловедение и технология материалов» основано на исследовании зависимости между составом, типом химической связи, строением и свойствами металлов и сплавов, закономерностей их изменения под воздействием внешних факторов: химических, тепловых, механических.

Цель издания практикума – учебно-методическое обеспечение проведения лабораторных работ.

Детальное изложение состава, типов связей в основных соединениях, структуры, свойств и областей применения металлических материалов даст обучающимся более глубокие познания в последующем освоении специальных дисциплин, необходимых для формирования у студентов **способностей**:

– использовать на практике современные представления наук о материалах, о влиянии структуры на их свойства, взаимодействии с окружающей средой;

– применять основные типы современных неорганических и органических материалов для решения производственных задач, владеть навыками выбора материалов для заданных условий эксплуатации с учетом требований технологичности, экономичности, надежности и долговечности, экологических последствий их употребления;

– использовать основные закономерности, действующие в процессе изготовления продукции требуемого качества, заданного количества при наименьших затратах общественного труда;

– выбирать основные и вспомогательные материалы для изготовления изделий с учётом их физико-механических свойств и технологических показателей; способы реализации основных технологических процессов; стандартные методы их проектирования, прогрессивные способы эксплуатации оборудования;

– определять номенклатуру параметров продукции (материалов, изделий, деталей оборудования: аппаратов, устройств и приборов) и технологических процессов её изготовления;

– проводить оценку уровня брака материалов, анализировать причины его появления, разрабатывать мероприятия по его предупреждению и устранению, совершенствованию продукции, производственных и технологических операций, средств управления процессами, жизненным циклом материальных тел и повышению их качества; технического обеспечения их разработки, испытаний и эксплуатации;

– участвовать в организации, проведении приёмки, освоении, внедрении и корректировке вводимых в эксплуатацию оборудования, технических средств и систем контроля, диагностики, испытаний и управления; технологических процессов при подготовке производства новой продукции (материалов и изделий) и оценке её конкурентоспособности; в разработке технической документации (сертификация технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов), связанной с профессиональной деятельностью;

– осуществлять анализ работы, техническое состояние и остаточный ресурс объектов профессиональной деятельности, организацию профилактических осмотров и текущего ремонта оборудования;

– принимать участие в проектировании оборудования, принять и обосновать конкретные технические решения при создании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования;

– обеспечивать соблюдение экологической безопасности и планировать экозащитные, энерго- и ресурсосберегающие мероприятия на производстве;

и готовностей:

– применять способы рационального использования сырьевых, энергетических и других видов ресурсов, современные методы разработки малоотходных, энергосберегающих и экологически чистых технологий;

– обеспечивать требуемые режимы и заданные параметры технологического процесса по заданной методике;

– участвовать в типовых, плановых испытаниях, сдаче в эксплуатацию

опытных образцов материалов и изделий, ремонтах технологического оборудования.

Значительный вклад в развитие материаловедения внесли следующие ученые: П.П. Аносов, Д.И. Менделеев, А.М. Бутлеров, Д.К. Чернов, а также англичанин Роберт Аустен, немец А. Мартенс, А.А. Бочвар, Г.В. Курдюмов, В.Д. Садовский, В.А. Каргин, В.В. Коршак, К.А. Андриянов и Н.В. Белов и др.

Хронология становления материаловедения включает в себя ряд исторических этапов:

28 тыс. лет до н.э. – первый искусственный материал, полученный человеком, – керамика. Вторым (после керамики) основным неметаллическим материалом цивилизации было стекло.

8 тыс. лет до н.э. – начало металлургии, так как люди неолита стали ковать украшения из самородной меди. Каменные инструменты сменились более надежными медными.

5 тыс. лет до н.э. – начало металлургии и открытие недр Земли как кладовой минералов. Люди, жившие в Малой Азии, обнаружили, что можно получить медь при обжиге малахита и лазурита и из нее можно отливать различные фигуры.

3,5 тыс. лет до н.э. – впервые выплавлено железо (видимо, в качестве побочного продукта рафинирования меди), в дальнейшем оно использовалось для изготовления украшений. Тем самым, был раскрыт первый секрет получения главного металла цивилизации.

3 тыс. лет до н.э. – обнаружено, что добавка оловянной руды к медной руде позволяет получать значительно более прочный материал, чем чистая медь или олово, бронзу. Появилась концепция сплавления, идея о том, что смесь двух и более металлов дает вещество, свойства которого превосходят свойства каждого из компонентов.

2,2 тыс. лет до н.э. – изготовлено первое стекло. Появился второй (после керамики) основной неметаллический материал цивилизации.

В 400 г. индийские металлурги воздвигли недалеко от Дели железный столб высотой в семь метров. Столб, выдержавший без последствий полуторатысячелетние коррозионные испытания в весьма агрессивной атмосфере этого влажного региона, служит ярким примером торжества материаловедения и остается археологической загадкой.

В 1450 г. Иоганн Гутенберг создал сплав системы свинец-олово-сурьма, из которого можно было отливать в медных формах наборные шрифты для типографии. Создана технологическая основа средств

массовой информации.

В 1688 г. Антон ван Левенгук разработал оптический микроскоп с 200-кратным увеличением.

В 1755 г. Джон Смитон создал бетон. Появление главного строительного материала современности.

В 1863 г. Эмиль и Пьер Мартен разработали мартеновский процесс плавки стали. Начало крупномасштабного производства стали общего назначения из смеси лома и железной руды – благодаря этому сталь превратилась в материал, который можно перерабатывать так много раз, как никакой другой.

В 1864 г. Д.И. Менделеев открыл Периодическую систему элементов. Создано бесценное руководство, без которого немислима работа материалововеда.

В 1886 г. Чарльз Мартин Холл и Пьер Херо одновременно и независимо открыли способ получения алюминия из его оксида с помощью электролиза. Алюминий превратился из драгоценной экзотики в конструкционный металл, который можно получать в промышленных масштабах.

В 1890 г. Адольф Мартенс исследовал микроструктуру твердой закаленной стали и обнаружил, что она отличается от структуры менее твердых сталей: зерна заполнены иголками и пластинками. Начало использования микроскопа для распознавания кристаллических структур и установления связи между структурой и свойствами.

В 1904 г. Леон Жиллет разработал состав первой нержавеющей стали. Начало использования стали в условиях высокой коррозии.

В 1906 г. Альфред Вильм обнаружил, что алюминиевые сплавы упрочняются за счет выделения мелких частиц. Появился первый высокопрочный алюминиевый сплав — дюралюминий.

В 1909 г. Лео Бейкланд синтезировал твердый термопластичный полимер – бакелит, он же фенолформальдегидная смола. Начало эры пластиков и появление промышленности пластмасс.

В 1939 г. Руссель Ол, Джордж Саутворт, Джек Скафф и Генри Тьюерер обнаружили в кремнии области с электронной и дырочной проводимостью. Без этого вряд ли через восемь лет был бы создан первый транзистор.

В 1964 г. Стефания Кволек создала высокопрочный, легкий пластик кевлар. Кевларовые волокна – неременный компонент современных композитов, из которых делают огромное количество вещей, – от шин

до бронезилов.

В 1970 г. Джеймс Фергасон, используя полевой эффект перекрученных нематиков, создал первый работающий жидкокристаллический дисплей. Результат полностью преобразил множество изделий, начиная от компьютерных дисплеев и телевизоров и заканчивая медицинскими приборами.

В 1981 г. Генрих Рорер и Герд Карл Биннинг создали туннельный сканирующий микроскоп. Появилась возможность рассматривать структуру поверхности на уровне атомов.

Решение важнейших технологических задач, включая создания наноматериалов и технологий, связанных с экономным расходом энергии, уменьшением массы машин и приборов, во многом зависит от уровня развития материаловедения. Непрерывный процесс создания новых материалов и совершенствования имеющихся обогащает различные направления науки и техники.

Основой для лабораторных работ, проводимых на каф. МВТМ КГЭУ и изложенных в данном практикуме, является лабораторный практикум авторов Уварова В.И., Гаделшина К.Г., Татаринцевой Т.Б. «Материаловедение. Технология конструкционных материалов». – Казань: КГЭУ, 2003 г. и лабораторный практикум авторов Сироткина О.С., Шибеева П.Б., Бунтина А.Е. – Казань: КГЭУ, 2011 г.

В данном лабораторном практикуме помимо традиционных лабораторных работ изложены и ряд дополнительных с использованием различного программного обеспечения.

Авторы пособия отдают дань заслугам профессора Ф. З. Тинчурина в зарождении материаловедения в КГЭУ.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УРОВНЕЙ СТРУКТУРНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ МАТЕРИАЛОВ

Среди всего многообразия природных и искусственных материалов для материаловедения наибольший интерес представляют материалы на основе металлов (главным образом различные сплавы), а также полимеров: органических и неорганических (таких как стекла, керамика). Вследствие огромной практической значимости в настоящее время именно эти группы материалов лучше всего изучены (в том числе их структура).

Единая иерархия уровней структурной организации различных материалов

Наблюдать, измерять, анализировать структуру материала можно невооруженным глазом, а также с помощью различных световых и электронных микроскопов (рис. 1.1). По мере детализации элементов структуры (структурных составляющих) и уменьшения их размеров могут быть использованы лупа, металлографический микроскоп, электронный микроскоп, автоионный микроскоп, туннельный и атомно-силовой микроскопы. При этом возрастает достигаемое увеличение изображения (от ~ 2 до $\sim 200\,000$ раз) и выявляются новые детали структуры: от внешней формы образца, размера зерна в изломе до отдельных дислокаций и их ансамблей при использовании трансмиссионного электронного микроскопа.

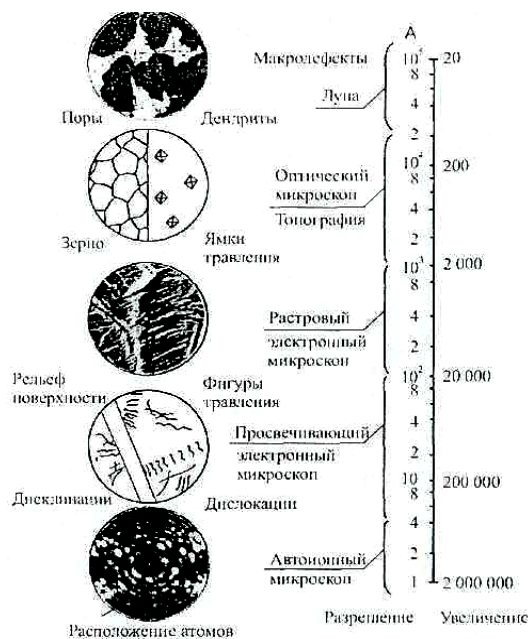


Рис. 1.1. Шкала увеличений и реальные примеры использования микроскопов при изучении структуры материалов

В металлографии (науке, изучающей структуру металлов и сплавов) структура материала традиционно подразделяется на четыре уровня (рис. 1.2, верхний ряд): макроструктура ($\sim 10^{-1}$ м); микроструктура ($\sim 10^{-4}$ м); субструктура ($\sim 10^{-7}$ м); тонкая структура (субмикроструктура) ($\sim 10^{-9}$ м). Современные достижения структурной химии и физики привели к необходимости выработки общих подходов к иерархии структур по Л.И. Тушинскому (рис. 1.2, нижний ряд): макроструктура (вид излома, дендритное и полиэдрическое строение, размеры зерен и их ориентация, $\sim 10^{-3} \dots \sim 10^{-1}$ м); мезоструктура (структура внутри зерен, дислокации и их ансамбли, дисклинации, ячейки, полигоны, их размеры и ориентация, $\sim 10^{-7} \dots \sim 10^{-3}$ м); микроструктура (иначе – рентгеноструктура, точечные дефекты, размеры и тип кристаллических решеток, величиной $\sim 10^{-10} \dots \sim 10^{-7}$ м), включая видимо и наноструктуры. Иногда в зависимости от размеров структурных составляющих и применяемых методов их выявления различают следующие уровни структурной организации материала: тонкая структура, субструктура, микроструктура и макроструктура.

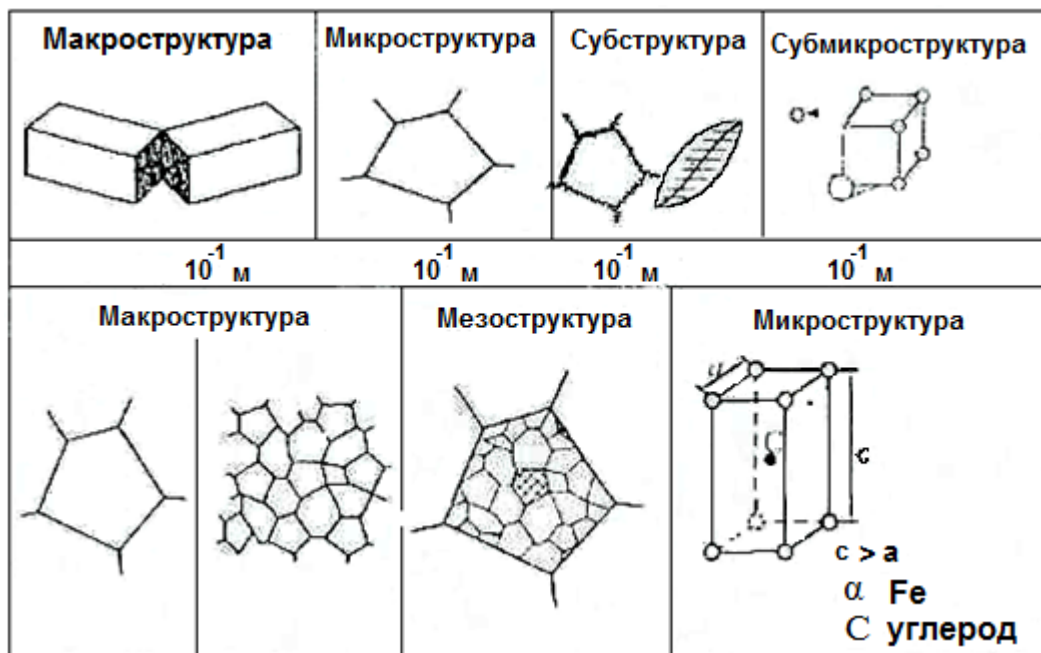


Рис. 1.2. Иерархия структур материалов (по Л.И. Тушинскому): верхний ряд – традиционная классификация; нижний ряд – новый подход (интеграция химии, физики, механики и материаловедения)

Данные классификации традиционно базируются на систематизации структур металлов (без попыток привязки к ним структур неметаллов, типа полимеров), а положение наноструктур в них определены недостаточно четко. Поэтому уточненную классификацию уровней структурной организации металлических и неметаллических материалов можно представить следующим образом: *микроструктура* (включая 3 подуровня: *электронно-ядерная*, *молекулярная* (образуют *тонкую* структуру) и *наноструктура*), *мезоструктура* и *макроструктура*. Размерные характеристики этих уровней для металлов и полимеров и элементы их составляющие приведены в табл. 1.1. Причем данная классификация применима и для керамических материалов, так как их микроструктура (в том числе электронно-ядерная структура) во многом подобна полимерной (преимущественно ковалентное связывание ядер) и металлической (поликристалличность). Главные выводы, которые можно сделать, анализируя настоящую таблицу:

1) электронно-ядерная структура является единой (общей по химической природе), базовой для любого вида металлического и неметаллического материала;

2) отличия в структуре последующих уровней (и, естественно, свойствах) усиливаются начиная с молекулярного и наноподуровней металлических и неметаллических материалов, и далее в мезо- и макроуровнях.

Таблица 1.1

Классификация основных уровней структурной организации металлических и полимерных материалов

О.С. Сироткин, Р.О. Сироткин 2006 г.

Уровни структуры и их размерный интервал		Структурные элементы в металлах	Структурные элементы в полимерах
1. Микроструктура:		Атомные остовы и обобществленные электроны, которые осуществляют химическую связь (преимущественно металлическую в металлах и преимущественно ковалентную в полимерах); точечные дефекты: вакансии и т.д. (0,0001–0,0005 мкм)	
То нк ая	<i>1а) электронно-ядерная;</i> ~1–5 Å (1–5·10 ⁻¹⁰ м)		
	<i>1б) молекулярная;</i> ~5–10 Å (0,5–1·10 ⁻⁹ м)	Молекулы в металлах отсутствуют	Фрагменты макромолекул (атомные группировки) и единичные межзвенные (ван-дер-ваальсовы (ВДВ) и водородные) связи (0,0005–0,001 мкм)
<i>1в) наноструктура;</i> ~10–10 000 Å (10 ⁻⁹ –10 ⁻⁶ м)		Наночастицы (0,001–0,1 мкм) и поверхности раздела; фрагменты, блоки, полигоны (0,1–1 мкм) и область когерентного рассеивания (0,001–0,01 мкм); линейные дефекты: дислокации и дисклинации (0,1–1 мкм)	Макро(олиго-)молекулы, внутри- и межмолекулярное ВДВ или водородное взаимодействие; НМС*: наночастицы и поверхности раздела; кристаллиты, ламели и границы раздела; линейные дефекты
2. Мезоструктура ~10 ⁴ –10 ⁷ Å (10 ⁻⁶ –10 ⁻³ м)		Субзерна (1–100 мкм) и субграницы; зерна (100–1000 мкм) и границы между ними; поверхностные дефекты (дислокационные ансамбли)	НМС: небольшие аксиалиты, эдриты и сферолиты диаметром до нескольких десятков мкм; поверхностные и небольшие объемные дефекты (поры и т.д.)
3. Макроструктура ~10 ⁷ –10 ⁹ Å (10 ⁻³ –10 ⁻¹ м)		Структуры, образованные зернами (волокна, дендриты и т.д.) и поверхность раздела; объемные дефекты (усадочные раковины, поры, трещины и т.д.)	НМС: крупные надмолекулярные образования в виде крупных аксиалитов, эдритов и сферолитов (от нескольких десятков мкм и выше); крупные объемные дефекты (трещины и т.д.)

Примечание: *НМС – надмолекулярные структуры в полимерных материалах.

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Выполнение каждой лабораторной работы складывается из следующих этапов:

1. Самостоятельная подготовка студентов к работе. Перед началом работы необходимо четко представить себе цель работы, знать схему установки, метод измерения, физическую сущность ожидаемых результатов. Должен быть предоставлен протокол измерений, содержащий таблицы для записи результатов измерений и основные расчетные формулы. Студенты, не подготовившиеся к работе в соответствии с этими требованиями, к выполнению работы не допускаются.

2. Проведение эксперимента. Этот этап осуществляется в соответствии с методическими указаниями, содержащимися в каждой работе.

3. Отчет о проделанной работе должен выполняться на одной стороне чистых листов формата А-4 и содержать:

- 1) цель работы;
- 2) схему установки, основные технические характеристики приборов и описание методики измерения, а также расчетные формулы, используемые в работе;
- 3) числовой материал эксперимента и вычислений, сведенный в таблицу;
- 4) графики, построенные на основании числового материала эксперимента;
- 5) общие выводы по работе и заключение о качестве исследованных материалов.

Каждый график должен сопровождаться теоретическим обоснованием причин, влияющих на ход его построения, для чего в процессе составления отчета студент обязан по литературным источникам детально ознакомиться с материалом, который был объектом его исследования в лаборатории.

4. Защита лабораторной работы проходит с предоставлением отчета. При ответе на контрольные вопросы студент должен показать понимание сущности физических явлений в исследованных материалах, объяснить полученные результаты и сделать выводы.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении работ в лаборатории материаловедения студенты обязаны помнить о возможном поражении электрическим током и необходимости соблюдения правил техники безопасности.

ЗАПРЕЩАЕТСЯ:

1. Прикасаться к открытым токоведущим частям приборов, находящихся под напряжением.
2. Производить какие-либо измерения в схеме термоустановок, находящихся под напряжением.
3. Включать приборы, находящиеся под напряжением, без разрешения преподавателя и без предупреждения всех работающих на данной установке.
4. Выполнять лабораторные работы без надзора сотрудников лаборатории.
5. Оставлять без наблюдения лабораторные установки, находящиеся под напряжением.
6. Без ознакомления с правилами техники безопасности студенты к выполнению лабораторных работ не допускаются. Обязательство выполнять требования этой инструкции фиксируется в контрольном листе по технике безопасности под роспись, студент расписывается в журнале.

Примечание. В лаборатории термической обработки должно находиться не более 12 студентов на одного преподавателя.

Лабораторная работа № 1

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ И СОЛЕЙ

Цель работы

Исследовать процесс кристаллизации методами моделирования на примере изучения влияния условий кристаллизации на характер и форму роста кристаллов.

Рабочее задание

1. Провести эксперимент по кристаллизации водных растворов солей, зафиксировать движения фронта кристаллизации, графическим дифференцированием по способу нормалей определить скорости кристаллизации для трех моментов времени, объяснить причину изменения скорости кристаллизации;

2. Изучить по излому слитков кристаллизацию металлов в зависимости от скорости ее охлаждения в холодной и горячей формах, зарисовать структуру излома и объяснить причину изменения характера кристаллизации в зависимости от скорости охлаждения.

Оборудование и реактивы

Микроскоп Levenhuk 740, МБС-10, стеклянная палочка, предметное стекло, насыщенный водный раствор соли.

Порядок оформления отчёта

Каждый студент должен оформлять отчёт индивидуально в следующей последовательности:

- 1) номер работы и ее название;
- 2) цель работы и задачи, подлежащие решению;
- 3) краткое описание используемых установок и приборов;
- 4) теоретические основы;
- 5) описание экспериментальной части работы;
- 6) таблицы результатов измерений;
- 7) графики по результатам измерений;
- 8) вычисления и анализ результатов измерений;
- 9) выводы.

Основные термины и понятия, необходимые для освоения данной работы

Аморфное вещество, ближний порядок, дальний порядок, дендрит, диффузия, зародыш, зональная ликвация, изложница, кристалл, кристаллит, кристаллическая решётка, кристаллографическая система, критический размер зародыша, ковалентная связь, модификатор, металлическое стекло, металлическая связь, модифицирование, плотность, поверхностное натяжение, поверхностно-активное вещество, пора, транскристаллическая структура, термодинамический потенциал, температурный гистерезис, усадочная раковина, шлак, шлам, энтропия, энтальпия, элементарная ячейка, сингония, свободная энергия, степень переохлаждения.

Описание метода эксперимента

Процесс кристаллизации изучается методом моделирования на прозрачных водных растворах солей. При этом кристаллизация солей, а также влияние модификаторов на нее исследуются на насыщенных водных растворах: бихромата калия $K_2Cr_2O_7$ – кристаллы, кубической формы, хлористого аммония NH_4Cl – кристаллы дендритной формы.

Проведение эксперимента

Капля раствора наносится на стеклянную пластину, которая помещается на предметный столик микроскопа. Передвигая стеклянную пластину с каплей, следует установить край капли на начало шкалы окуляра, совмещая при этом линию шкалы радиусом капли. После настройки начинаем отсчет времени и снимаем показания шкалы с интервалом времени 1 мин. Данные эксперимента записываем в табл. 1.1. Количество измерений должно быть не менее 10. Опыт считается законченным, если получены три одинаковых значения размера кристалла в течение трех последних измерений.

Таблица 1.1

№ измерения	Измеряемые величины		Вычисляемая величина
	Время, мин.	Положение фронта, кристаллизации, X_{III} в делениях шкалы	Истинное положение фронта кристаллизации, X_0 , мм

Чтобы определить размер объекта (в мм), достаточно подсчитать число делений шкалы, которое укладывается в измеряемом участке объекта и это число (X_{III}) разделить на 56 (кратность увеличения микроскопа):

$$X_0 = X_{III}/56.$$

Обработка результатов измерений

По данным табл. 1.1 строится график зависимости X_0 (положение фронта кристаллизации, мм) – τ (время, мин.).

Графическим дифференцированием и методом нормали определяют первую производную (т.е. скорость кристаллизации) в крутой (точка 1), средней (точка 2) и пологой (точка 3) частях кривой на рис. 1.1.

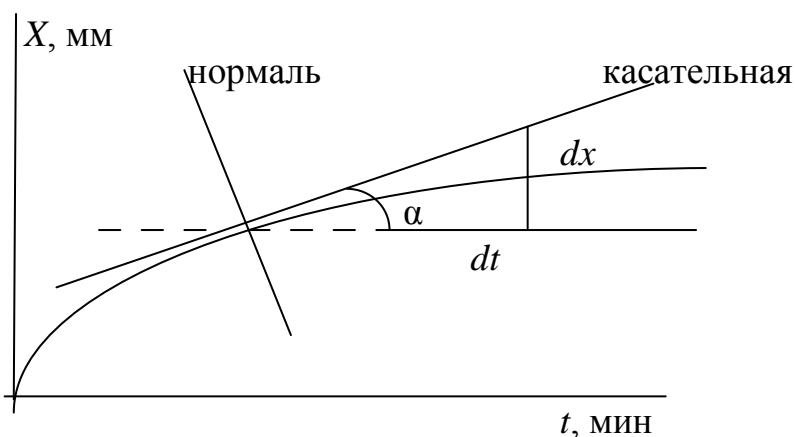


Рис. 1.1. Графическое изображение первой производной

Проведя касательные к трем произвольно выбранным точкам (например, на 2, 5, и 8 минуте) определяем производные в этих точках. По смыслу производная функции $x = f(t)$, т.е. dx/dt является тангенсом угла наклона касательной к кривой в данной точке: $dx/dt = \operatorname{tg} \alpha$, рис. 1.1.

Для перехода к численным значениям производной (скорости кристаллизации $V_{кр}$, мм/мин.) умножаем значения отрезков, найденных графическим построением (т.е. катетов прямоугольного треугольника) в миллиметрах на масштабы величины по осям.

$$V_{кр} = \frac{\Delta X \cdot M_x}{\Delta \tau \cdot M_\tau}$$

Если по оси Y 20 мм чертежа соответствует 0,1 (X_0), то $M_x = 0,1 \text{ мм}/20 \text{ мм} = 0,005$.

Если по оси X 10 мм чертежа соответствует 1 мин (τ), то $M_\tau = 1 \text{ мин}/10 \text{ мм} = 0,1 \text{ мин}/\text{мм}$

Ошибка применяемого метода уменьшается по мере приближения наклона кривой к 45° .

Три полученные величины скорости кристаллизации сопоставляются между собой, и формулируется вывод о влиянии формы и размеров капли на скорость кристаллизации.

Теоретические основы процесса кристаллизации

Все вещества могут находиться в трех агрегатных состояниях: твердом, жидком и газообразном, переходы между которыми (так называемые фазовые переходы) сопровождаются скачкообразными изменениями свободной энергии энтропии, плотности и других физических свойств.

Жидкости и твердые тела относят к конденсированному состоянию вещества. В отличие от газообразного состояния у вещества в конденсированном состоянии атомные остовы расположены ближе друг к другу, что приводит к их более сильному взаимодействию и, как следствие этого, жидкости и твердые тела имеют постоянный собственный объем. Для теплового движения атомных остовов в жидкости характерны малые колебания атомных остовов вокруг равновесных положений и частые перескоки из одного равновесного положения в другое. Это приводит к наличию в жидкости только так называемого ближнего порядка в расположении атомных остовов, т.е. некоторой закономерности в расположении соседних атомных остовов на расстояниях, сравнимых с межатомными. Для жидкости в отличие от твердого тела характерно такое свойство, как текучесть.

Атомные остовы в твердом теле, для которого в отличие от жидкого тела характерна стабильная, постоянная собственная форма, совершают только малые колебания около своих равновесных положений. Это приводит к правильному чередованию атомных остовов на одинаковых расстояниях для сколь угодно далеко удаленных атомных остовов, т.е. существование так называемого дальнего порядка в расположении атомных остовов. Такое правильное, регулярное расположение атомных остовов в твердом теле, характеризующееся периодической повторяемостью в трех измерениях, образует кристаллическую решетку, а тела, имеющие кристаллическую решетку, называют твердыми телами. Кроме того, существуют аморфные тела (стекло, воск и т.д.). В аморфных телах атомные остовы совершают

малые колебания вокруг хаотически расположенных равновесных положений, т.е. не образуют кристаллическую решетку. Аморфное тело находится с термодинамической точки зрения в неустойчивом (так называемом метастабильном) состоянии и его следует рассматривать как сильно загустевшую жидкость, которая с течением времени должна закристаллизоваться, т.е. атомные остовы в твердом теле должны образовать кристаллическую решетку и превратиться в истинно твердое тело.

Аморфное состояние образуется при быстром – (10^6 °C/с и более) охлаждении расплава. Например, при охлаждении ряда сплавов из жидкого состояния образуются так называемые металлические стекла, обладающие специфическими физико-механическими свойствами.

Атомные остовы в кристаллическом твердом теле располагаются в пространстве закономерно, периодически повторяясь в трех измерениях через строго определенные расстояния, т.е. образуют кристаллическую решетку. Кристаллическую решетку можно «построить», выбрав для этого определенный «строительный блок» (аналогично постройке стены из кирпичей) и многократно смещая этот блок по трем непараллельным направлениям. Такая «строительная» единица кристаллической решетки имеет форму параллелепипеда и называется элементарной ячейкой. Все элементарные ячейки, составляющие кристаллическую решетку, имеют одинаковую форму и объемы. Атомные остовы могут располагаться как в вершинах элементарной ячейки, так и в других ее точках (в узлах кристаллической решетки). В первом случае элементарные ячейки называются простыми (примитивными), во втором – сложными. Если форма элементарной ячейки определена и известно расположение всех атомов внутри нее, то имеется полное геометрическое описание кристалла, т.е. известна его атомно-кристаллическая структура.

При переходе из жидкого состояния в твердое образуется кристаллическая решетка, возникают кристаллы. Такой процесс называется *кристаллизацией*. Переход металла из жидкого или парообразного состояния в твердое с образованием кристаллической структуры называется первичной кристаллизацией. Образование же новых кристаллов в твердом кристаллическом веществе называется вторичной кристаллизацией.

Процесс кристаллизации складывается из двух одновременно идущих процессов: зарождения и роста кристаллов. Кристаллы могут зарождаться самопроизвольно (самопроизвольная кристаллизация) или расти на имеющихся готовых центрах кристаллизации (несамопроизвольная кристаллизация).

В природе все самопроизвольно протекающие превращения, а, следовательно, кристаллизация и плавление, обусловлены тем, что новое состояние в новых условиях является энергетически более устойчивым, обладает меньшим запасом энергии.

Поясним примером. Тяжелый шарик из положения 1 (рис. 1.2) стремится попасть в более устойчивое положение 2, так как потенциальная энергия в положении 2 меньше, чем в положении 1.



Рис. 1.2. Пример самопроизвольной кристаллизации

Энергетическое состояние системы, имеющей огромное число охваченных тепловым движением частиц (атомных остовов, молекул), характеризуется термодинамической функцией (потенциалом) $Z(F)$, также называемой свободной энергией. Свободная энергия $F(Z) = H - TS$, где H – внутренняя энергия системы (энтальпия); T – абсолютная температура; S – энтропия, равная энергии колебания элементарных частиц в узлах решетки (вибрационная составляющая) и энергии поступательного движения валентных электронов при тепловом возбуждении (электронная составляющая). Таким образом, чем больше свободная энергия системы, тем система менее устойчива, и если имеется возможность, то система переходит в состояние, где свободная энергия меньше («подобно» шарик, который скатывается из положения 1 в положение 2, если на пути нет препятствия).

С изменением внешних условий, например, температуры, свободная энергия системы изменяется по сложному закону, но различно для жидкого и кристаллического состояний. Схематически характер изменения свободной энергии жидкого и твердого состояний с температурой показан на рис. 1.3.

Выше температуры T_s , меньшей свободной энергией обладает вещество в жидком состоянии, ниже T_s – вещество в твердом состоянии. Следовательно, выше T_s , вещество должно находиться в жидком состоянии, а ниже T_s – в твердом, кристаллическом.

Очевидно, что при температуре, равной T_s , свободные энергии жидкого и твердого состояний равны, металл в обоих состояниях находится в равновесии. Эта температура T_s и есть равновесная или теоретическая температура кристаллизации. Однако при T_s не может происходить процесс кристаллизации (плавление), так как при данной температуре $F(Z)_{\text{ж}} = F_{\text{кр}}$ и процесс кристаллизации (плавления) не может идти, так как при равенстве обеих фаз это не будет сопровождаться уменьшением свободной энергии.

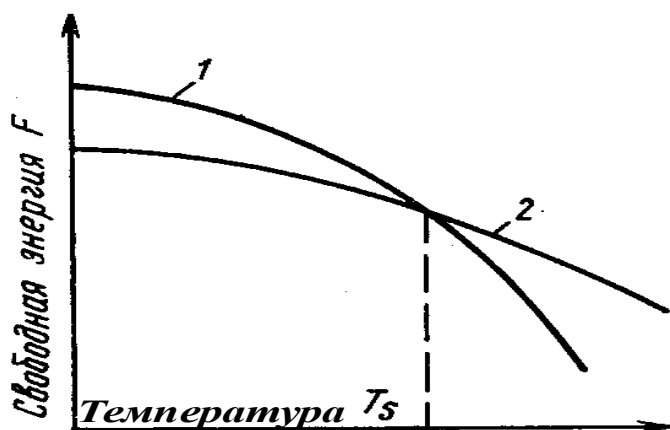


Рис. 1.3. Изменение свободной энергии жидкого (1) и кристаллического (2) состояния в зависимости от температуры

Для начала кристаллизации необходимо, чтобы процесс был термодинамически выгоден системе и сопровождался уменьшением свободной энергии системы. Из кривых, приведенных на рис. 1.4, видно, что это возможно только тогда, когда жидкость будет охлаждена ниже точки T_s . Температура, при которой практически начинается кристаллизация, может быть названа фактической температурой кристаллизации.

Так в металлических кристаллах плотноупакованные структуры ГПУ ($K = 12$) и ГЦК ($K = 12$) имеют большую энергию связи и устойчивы при низких температурах (до T_1). Более «рыхлая» структура ОЦК ($K = 8$) имеет большую энтропию, вследствие большей амплитуды колебаний атомов, а поэтому устойчива при повышенных температурах. Этим объясняется стабильность ОЦК решетки при повышенных температурах во многих металлах Ti, Zr, Hf, Fe.

Разница между равновесной (T_s) и реальной (T_n) температурой кристаллизации называется *степенью переохлаждения* (ΔT).

Разница между реальными температурами плавления и кристаллизации называется *температурным гистерезисом*.

Степень переохлаждения увеличивается с ростом скорости охлаждения. Обычная степень переохлаждения металлов при кристаллизации в производственных условиях колеблется от 10 до 30 °С; при больших скоростях охлаждения она может достичь сотен градусов. Степень перегрева при плавлении металлов обычно невелика (не превышает нескольких градусов).

При кристаллизации выделяется теплота. Когда кристаллизуется чистый элемент, отвод теплоты, происходящий вследствие охлаждения, компенсируется теплотой кристаллизации. Поэтому на кривой охлаждения, изображаемой в координатах «температура – время» процессу кристаллизации соответствует горизонтальный участок (кривая 1, рис. 1.4).

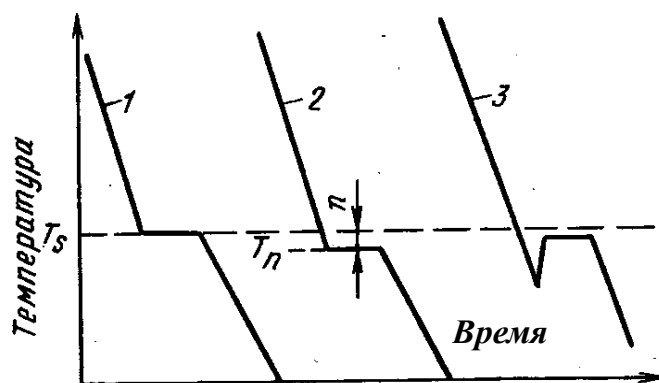


Рис. 1.4. Кривые охлаждения при кристаллизации

По окончании кристаллизации, т.е. после полного перехода в твердое состояние, температура снова начинает снижаться, и твердое кристаллическое вещество охлаждается. Теоретически процесс кристаллизации изображается кривой 1. Кривая 2 показывает реальный процесс кристаллизации. Жидкость непрерывно охлаждается до температуры переохлаждения T_n , лежащей ниже теоретической температуры кристаллизации T_s . При охлаждении ниже температуры T_s создаются энергетические условия, необходимые для протекания процесса кристаллизации.

В жидком состоянии атомные остовы вещества вследствие теплового движения перемещаются беспорядочно. В то же время в жидкости имеются сравнительно устойчивые группировки атомов небольшого объема. Эти группировки неустойчивы, рассасываются и вновь появляются в разных местах жидкости. В пределах группировки расположение атомных остовов вещества во многом аналогично их расположению в решетке кристалла. При переохлаждении жидкости некоторые из них,

наиболее крупные, становятся устойчивыми и способными к росту. Эти устойчивые группировки атомных остовов называются центрами кристаллизации (*зародышами*). Все зародыши большего размера будут центрами кристаллизации, а зародыши – меньшего размера окажутся неустойчивыми и вновь рассасываются в жидкости.

Центр кристаллизации, обрастая новыми слоями атомов, становится крупнее. Кристаллы растут свободно до тех пор, пока со всех сторон их окружает жидкость. Форма таких растущих кристаллов геометрически правильна и соответствует их кристаллическому строению.

При взаимном столкновении граней кристаллов их правильная форма нарушается и становится в момент окончания процесса кристаллизации *неправильной*.

Зародыши, возникающие в жидкой фазе, имеют трехмерные размеры и называются трехмерными.

Критический размер зародыша связан с термодинамическими параметрами:

$$r_{kp} = \frac{2\sigma}{\Delta f},$$

где σ – удельное (на 1 см^2) поверхностное натяжение на границе жидкость – кристалл; Δf – удельное (на 1 см^3) изменение свободной энергии при переходе жидкости в кристаллическое состояние.

С увеличением степени переохлаждения Δf быстро увеличивается. Следовательно, с ростом степени переохлаждения критический размер зародыша убывает, центров появляется больше.

Таким образом, кристаллизация состоит из двух процессов. Первый из них заключается в зарождении мельчайших кристаллических частиц, называемых зародышами или центрами кристаллизации, второй – в росте кристаллов из этих центров.

Скорость зарождения центров кристаллизации выражается числом зародышей, образующихся в единице объема жидкости за единицу времени. Оно обозначается (ч.ц.) – число центров.

Скорость роста кристаллов или скорость кристаллизации выражается линейной скоростью движения кристаллов в направлении перпендикулярном к ней. Эта скорость обозначается (с.к.) – скорость кристаллизации или (с.р.) – скорость роста кристаллов, она измеряется единицами длины в единицу времени.

На рис. 1.5 приведены кривые зависимости ч.ц. и с.р. от степени переохлаждения. С увеличением ΔT возрастает число центров

кристаллизации и увеличивается скорость их роста; при определенной степени переохлаждения наступает максимум. Однако металлы и сплавы отличаются в жидком состоянии сравнительно малой способностью к переохлаждению, т.е. их невозможно переохлаждать до таких температур, при которых ч. ц. достигали бы максимума. Поэтому для металлов кривые обрываются уже при малых степенях переохлаждения (сплошные линии).

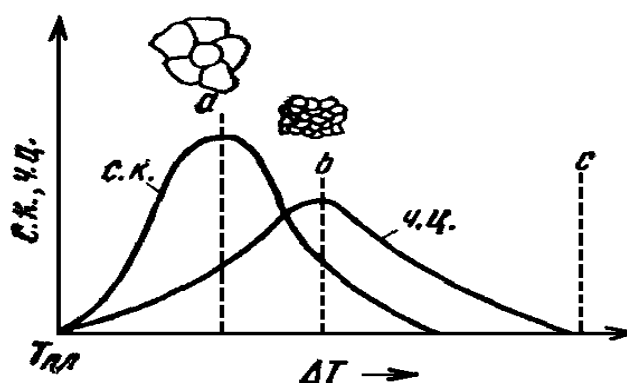


Рис. 1.5. Влияние степени переохлаждения на число центров кристаллизации (ч.ц.) и скорость роста кристаллизации (с.р.)

При малой степени переохлаждения, когда скорость образования центров кристаллизации мала, а скорость их роста велика, размеры кристаллов велики; при больших степенях переохлаждения скорость зарождения новых центров велика, а скорость роста мала: кристаллы получают более мелкими.

Фактический размер кристаллов определяется соотношением скоростей роста кристаллов и образования центров кристаллизации. Оба процесса связаны с перемещениями атомных остовов, т.е. являются диффузионными и зависят от температуры. У некоторых веществ (органические соединения, стекла) при очень больших степенях переохлаждения диффузия замедляет образование центров кристаллизации, и рост кристаллов. Однако скорость образования центров растет более резко и поэтому в металлах при увеличении степени переохлаждения получают все более мелкие кристаллы. Соответственно при малых степенях переохлаждения велик критический размер зародыша, а скорость зарождения мала и кристаллы получают крупными.

При заливке жидкого металла в форму с низкой теплопроводностью (земляная, шамотная) или в подогретую металлическую форму кристаллизация идет при небольших степенях переохлаждения. Увеличение переохлаждения получается при заливке жидкого металла в холодные металлические формы.

Число зерен (кристаллов) n в единицу объема металла и их размер при данной степени переохлаждения, может быть определен по формуле:

$$n = \sqrt{\frac{V}{V_0} \cdot \frac{1}{\Delta T}}$$

Таким образом, изменяя степень переохлаждения, можно получить кристаллы (зерна) различной величины. От величины зерен зависят многие свойства металлов. Более желательно мелкозернистое строение.

В реальных условиях процессы кристаллизации в значительной мере зависят от имеющихся готовых центров кристаллизации. Такими центрами могут быть твердые частицы разнообразных примесей, стенки формы. Особенно эффективны частицы таких веществ, которые по своему кристаллическому строению похожи на затвердевающий металл. Это сходство проявляется в близком соответствии расположения атомных остовов на определенных плоскостях решеток металла и примеси.

Растворенные примеси в металле способствуют увеличению числа центров, если примеси будут поверхностно-активными веществами, понижающими поверхностное натяжение. В этом случае уменьшается критический размер центра кристаллизации, что эквивалентно увеличению степени переохлаждения.

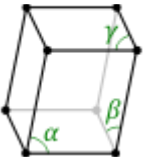

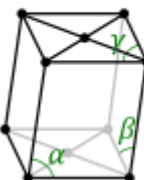
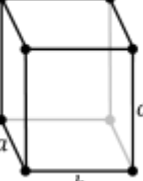
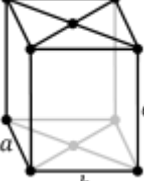
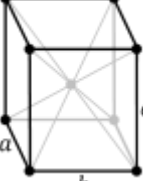
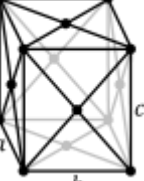
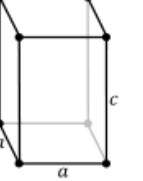
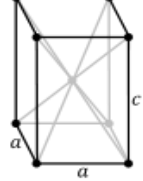
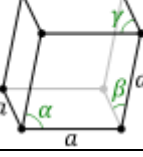
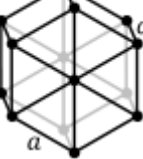
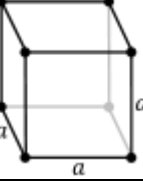
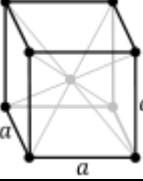
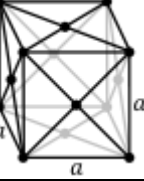
Для измельчения структуры широко применяют модифицирование – обработку жидких сплавов небольшими количествами добавок (модификаторов). В качестве модификаторов используют поверхностно-активные вещества (бор в стали, натрий в алюминии и его сплавах) и тугоплавкие металлы (титан, цирконий в алюминии и его сплавах).

При повышении температуры жидкого металла примеси, играющие роль дополнительных центров кристаллизации, растворяются, а поверхностно-активные примеси – дезактивируются, поэтому повышение температуры жидкого металла перед разливкой приводит к укрупнению зерна при кристаллизации.

Форма кристаллов и строение слитков

Форма зерен, образующихся при кристаллизации, зависит от условий их роста, главным образом от скорости и направления отвода теплоты и температуры жидкого металла, а также от примесей. Рост зерна происходит по дендритной (древовидной) схеме (рис. 1.6). Наибольшая скорость роста кристаллов наблюдается по таким плоскостям и направлениям решетки, которые имеют наибольшую плотность упаковки атомных остовов. В результате вырастают длинные ветви, которые называются осями первого порядка. Затем на этих осях появляются и начинают расти ветви второго порядка и т.д. Классификация кристаллических решеток показана в табл. 1.2.

Типы кристаллических решеток

Кристаллографическая система	Решётки Браве			
	Простая	Базо-центрир-ая	Объемно-центр-ая	Гране-центр-ая
Триклинная (параллелепипед) $a \neq b \neq c; \alpha \neq \beta \neq \gamma$ $K_2Cr_2O_7$	$\alpha, \beta, \gamma \neq 90^\circ$ 			
Моноклинная (правильная призма с параллелограммом в основании) $a \neq b \neq c; \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$ S_B	$\alpha \neq 90^\circ, \beta, \gamma = 90^\circ$ 	$\beta \neq 90^\circ, \alpha, \gamma = 90^\circ$ 		
Ромбическая (ромбоэдр) $a \neq b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ Fe_3C, S_a	$a \neq b \neq c$ 	$a \neq b \neq c$ 	$a \neq b \neq c$ 	$a \neq b \neq c$ 
Тетрагональная (прямой параллелепипед) $a = b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ TiO_2, Sn_B				
Тригональная(ромбоэдрическая) (равносторонний ромбоэдр As, Bi) $a = b = c; \alpha = \beta = \gamma < 120^\circ, \neq 90^\circ$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ 			
Гексагональная (призма с основанием) $a = b \neq c; \alpha = \beta = 90^\circ; \gamma = 120^\circ$ Zn, Cd				
Кубическая (правильный куб) $a = b = c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ $Cu, Fe, NaCl$				

Если гладкая (первичная) ось дендрита, ориентированная вдоль направления отвода тепла (ось первого порядка), намного длиннее осей, перпендикулярных к ней (оси второго порядка), то дендрит называется *столбчатым*. Если оси первого и второго порядков приблизительно равны по длине и достаточно развиты, дендрит называется *равноосным*. В том случае, когда в жидком металле возникает очень большое число центров кристаллизации (при значительной степени переохлаждения или вследствие присутствия большого числа посторонних центров кристаллизаций), то дендриты не успевают вырасти; такие дендриты называются *мелкоглобулярными*.

Чаще всего при кристаллизации металлов и сплавов, применяемых в промышленности, образуются дендриты всех трех видов.

Дендриты растут до тех пор, пока не соприкоснутся друг с другом. После этого окончательно заполняются межосные пространства, и дендриты превращаются в полновесные кристаллы с неправильной внешней огранкой. Такие кристаллы называются *зернами* или *кристаллитами*. На границах между зернами в участках между осями дендритов накапливаются примеси, появляются поры из-за усадки и трудностей подхода жидкого металла к фронту кристаллизации.

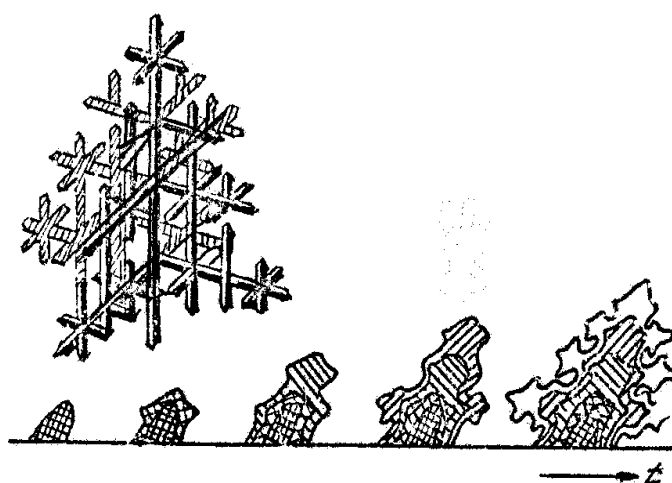


Рис. 1.6. Схема роста дендрита

Условия отвода теплоты при кристаллизации значительно влияют на форму зерен. Это видно на примере кристаллизации стального слитка (рис. 1.7).

Кристаллизация стального слитка идет в три стадии. Сначала на поверхности слитка образуется зона 1 (рис. 1.7) мелких кристаллов – это результат влияния холодной металлической формы, которая обеспечивает в первые моменты затвердевания слитка большую скорость охлаждения металла. Затем растут большие кристаллы (зона 2), вытянутые по направлению отвода теплоты. Их называют столбчатыми кристаллами.

Наконец, в середине слитка, где наблюдается наименьшая степень переохлаждения, образуются равноосные кристаллы больших размеров (зона 3).

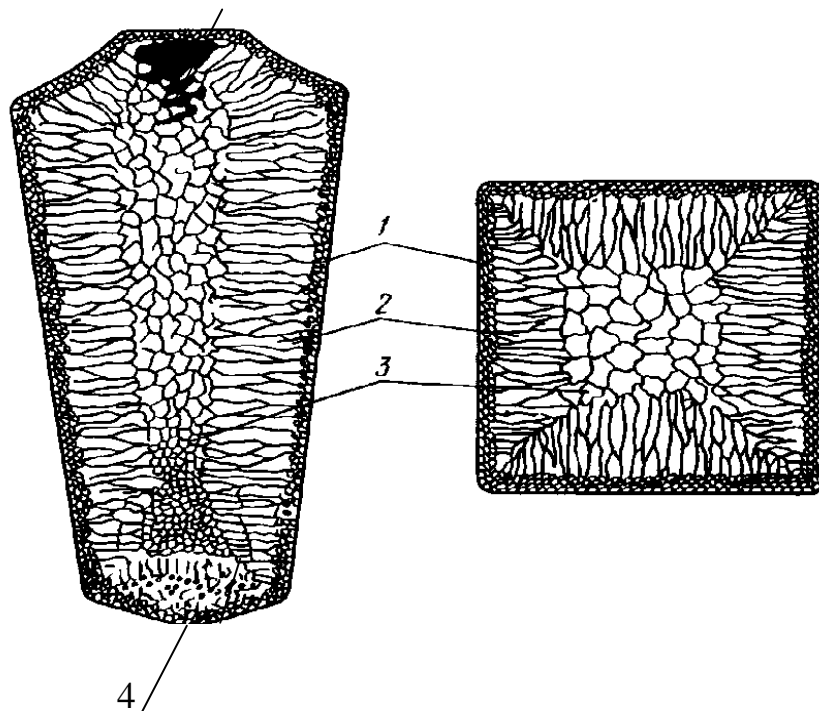


Рис. 1.7. Схема строения слитка спокойной стали: 1 – слой мелкоглобулярных кристаллов; 2 – область столбчатых кристаллов; 3 – равноосные дендриты; 4 – шлак; 5 – шлак

При известных условиях (перегретый жидкий металл, малое содержание примесей и др.) зона крупных равновесных кристаллов полностью исчезает. Структура слитка состоит практически из одних столбчатых кристаллов и называется транскристаллической. Зона столбчатых кристаллов характеризуется наибольшей плотностью, но в месте стыка столбчатых кристаллов собираются нерастворимые примеси и слитки с транскристаллической структурой часто растрескиваются при обработке давлением. Транскристаллизация часто наблюдается в сварных швах, уменьшая их прочность.

В верхней части слитка, которая затвердевает в последнюю очередь, концентрируется усадочная раковина. Под усадочной раковиной металл получается рыхлым, в нем содержится много усадочных пор. Часть слитка с усадочной раковиной и рыхлым металлом отрезают. Слиток имеет неоднородный состав. Например, в стали по направлению от поверхности к центру и снизу вверх увеличивается концентрация углерода и вредных примесей – серы и фосфора. Химическая неоднородность по отдельным зонам слитка называется зональной ликвацией. Она отрицательно влияет на механические свойства.

Контрольные вопросы и задачи

1. Приведите основные характеристики кристаллической структуры.
2. Почему не совпадают теоретическая и фактическая температуры кристаллизации?
3. Как влияет степень переохлаждения на процесс кристаллизации металла?
4. Как изменяются размеры кристаллов в зависимости от числа центров кристаллизации и скорости линейного роста кристаллов?
5. Как влияют посторонние примеси в расплаве на размеры кристаллов?
6. Какие условия влияют на образование вытянутых древовидных кристаллов (дендритов)?
7. Какими условиями кристаллизации определяется неоднородность дендритного строения металла в сечении слитка или отливки?
8. Каковы причины изменения скорости кристаллизации соли из раствора?

Задача

Две одинаковые детали из алюминиевого сплава (силумина) были отлиты в землю (рис.1.8) и кокиль (рис.1.9).

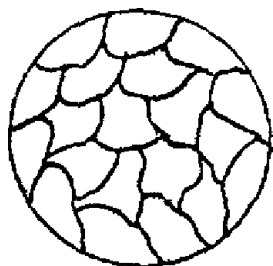


Рис. 1.8

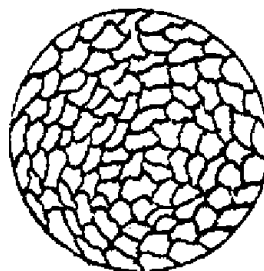


Рис. 1.9

Опишите:

1. Влияние на величину зерна скорости кристаллизации.
2. Влияние на величину зерна числа центров кристаллизации, зарождающихся в единице объёма в единицу времени.
3. Модифицирование и его влияние на величину зерна.

Лабораторная работа № 2

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель работы

Ознакомление с методами металлографического анализа металлических материалов и контроля качества конструкционных материалов.

Рабочее задание

1. Проанализировать визуально поверхности изломов лабораторных образцов и охарактеризовать их.
2. Провести доступный глазу макроанализ сварных швов, и запротоколировать обнаруженные поверхностные дефекты.
3. По макроструктуре, выявленной травлением, охарактеризовать обнаруженные внутренние дефекты и качество сварки.
4. Проанализируйте визуально поверхности изломов лабораторных образцов и охарактеризуйте их у каждого образца.
5. Пользуясь правилом рычага, по микроструктуре визуально определите содержание углерода в доэвтектоидной стали. Для этого визуально определите количество перлитной составляющей структуры стали в поле зрения окуляра в процентах, а затем по формуле $C = [(\% \text{ перлита} - 0,8) / 100] \%$ подсчитывают содержание углерода в анализируемой стали.

Оборудование и реактивы

Металлографический микроскопы и микроскринер, макрошлифы образцов для механических испытаний, исследований сварных соединений и видов изломов, 5 % раствор азотной кислоты.

Основные термины и понятия, необходимые для освоения лабораторной работы

Анизотропия, выплавка, включения, волокно, волочение, гаммадефектоскопия, графит, горячая деформация, горячекатаная сталь, дислокация, забоина, излом, металлографическая плоскость, макроанализ, макроструктура, микроструктура, микроанализ,

микрошлиф, холодная деформация, окисление, пачки скольжения, поры, пластическая деформация, подварка, прокатка, рыхлоты, раковина, сварное соединение, сварочная ванна, твёрдость, травление, трещина, шлак, шлаковые включения.

Состав, структура и классификация сталей

Сталь – деформируемый (ковкий) сплав железа с углеродом (и другими элементами), содержание углерода, в котором не превышает 2,14 %, но не меньше 0,022 %. Главным элементом стали является углерод, и это единственная примесь, которая специально вводится в сталь. С повышением содержания углерода прочность стали существенно возрастает из-за увеличения количества цементита в фазовом составе стали.

Стали делятся на конструкционные и инструментальные. Разновидностью инструментальной является быстрорежущая сталь.

По химическому составу стали делятся на углеродистые и легированные; в том числе по содержанию углерода – на низкоуглеродистые (до 0,25 % С) – это достаточно мягкие, пластичные, хорошо деформируемые в холодном и горячем состоянии стали; среднеуглеродистые (0,3–0,55 % С), являются широко распространённым конструкционным материалом для деталей, работающих в условиях обычных силовых нагрузок и высокоуглеродистые (0,6–1,4 % С), за счет чего они обладают высокой твердостью; легированные стали по содержанию легирующих элементов делятся на: низколегированные, среднелегированные и высоколегированные.

Стали, в зависимости от способа их получения, содержат разное количество неметаллических включений. Содержание примесей лежит в основе классификации сталей по качеству: обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особо высококачественные.

По структуре сталь различается на аустенитную, ферритную, мартенситную, бейнитную или перлитную. Если в структуре преобладают две и более фаз, то сталь разделяют на двухфазную и многофазную.

С увеличением содержания углерода в стали возрастает количество фаз, имеющих более высокую твердость (перлит, цементит).

Следовательно, и изменяются механические свойства: возрастает твердость, предел прочности, текучести, уменьшается относительное удлинение, относительное сужение и ударная вязкость (рис. 2.1).

Твердые и хрупкие частицы цементита повышают сопротивление движению дислокаций, т.е. повышают сопротивление деформации

и уменьшают пластичность и вязкость.

Таким образом, углерод придаёт сплавам железа прочность и твёрдость, снижая пластичность и вязкость.

Зная изменение механических свойств в зависимости от структуры (количества углерода) можно определить технологический процесс обработки той или иной стали.

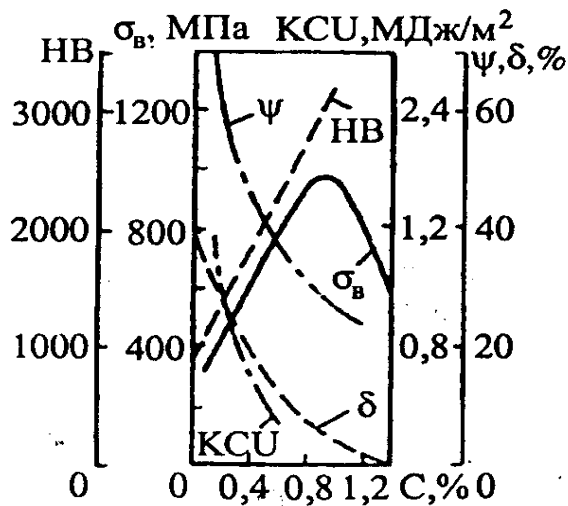


Рис. 2.1. Влияние углерода на свойства горячекатаных сталей

Металлографический анализ

В процессе производства металла (выплавки, разливки в слитки, горячей и холодной деформации, механической обработки, сварки, термической обработки) формируется структура, но одновременно возникают и частично «залечиваются» дефекты металлургического производства. Металлографический анализ предусматривает выявление дефектов, особенностей структуры и, как следствие, прогнозирование поведения металлов в эксплуатационных условиях.

Дефект — каждое отдельное несовершенство продукции или несоответствие требованиям, установленным нормативной документацией.

Для оценки соответствия материала детали надлежащему качеству или отдельно взятого сварного соединения используются разнообразные методы макро и микроанализа.

Термин «макроисследование» объединяет методы и способы контроля качества материала (детали, узла) невооруженным глазом или с помощью лупы. Понятие «микроисследование» связывает способы анализа микроструктуры материала с помощью оптического микроскопа. В совокупности обе названные группы методов составляют сущность

металлографического анализа.

Макроскопическое исследование

Итак, макроскопическое исследование объединяет методы визуального выявления поверхностных и внутренних дефектов материала детали и сравнительно грубых элементов его структуры. Оно может быть без разрушения детали или с разрушением для приготовления макрошлифа, либо в форме визуального внешнего осмотра, либо только после обработки анализируемой поверхности соответствующими для того химическими реактивами.

Анализ обычно начинается с тщательного визуального осмотра состояния поверхностей детали (наличие забоин, вмятин, царапин, изношенных участков, раковин, рыхлот, трещин и т.д.) и часто заканчивается получением макроснимка.

По поверхности излома, например аварийной детали, можно судить о степени однородности ее материала, установить, хрупок он или пластичен, как произошло разрушение – по границам (межкристаллитное) или по телу зерен (транскристаллитное). Поверхность излома у хрупкого металла кристаллична. По ее плоскостям скола отдельных зерен можно определить размеры и форму зерен. Поверхность излома пластичного материала характерна волокнистым строением (вязкий излом). Здесь форма зерен настолько искажена пластической деформацией, что установить, грубо – или мелкозернист анализируемый металл, практически не удастся.

При упругопластической деформации под действием внешней силы необратимо изменяются форма и размеры изготовленной из металла детали или испытуемого образца. Во время этой деформации, которую обычно называют пластической, зерна металла под действием силы P расслаиваются на пачки скольжения. Образующиеся пачки смещаются друг относительно друга, что приводит к вытягиванию зерен в волокна (рис. 2.2).

В волокнистой структуре металла между волокнами располагаются различные разделяющие волокна включения. Его прочность на разрыв вдоль волокон оказывается выше, чем поперек.

Образованию и перемещению пачек скольжения в зернах предшествует лавинообразный процесс передвижения дислокаций по определенным плоскостям – системам скольжения в кристаллической

решетке.

У серого чугуна поверхность излома темно-серого цвета (черный излом) из-за присутствия в его структуре включений графита.

Если поверхность излома слегка окислена и окрашена в цвета побежалости (цвет определяется химическим составом и толщиной окисной пленки), разрушение либо сопровождалось окислением, либо началось с трещины, образовавшейся после термической обработки детали.

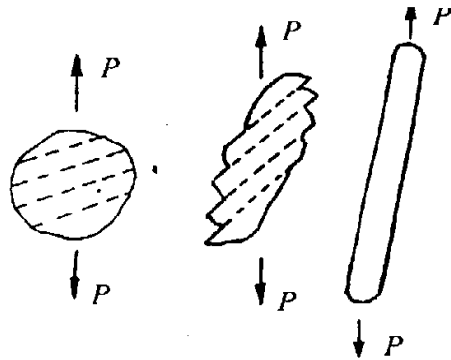


Рис. 2.2. Схема пластической деформации отдельного зерна металла

Сильно окисленная поверхность излома может быть у деталей, работающих при высоких температурах (горячий излом).

Под действием знакопеременных нагрузок возможно возникновение усталостного излома (рис. 2.3).

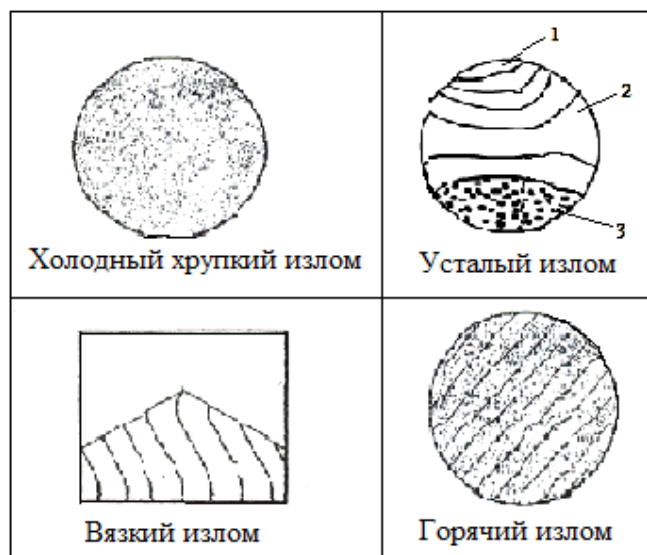


Рис. 2.3. Примеры изломов

Он состоит из очага разрушения 1 (места образования микротрещин) и двух зон – усталости 2 и долома 3. Очаг разрушения примыкает

к поверхности и имеет небольшие размеры. Зону усталости формирует последовательное развитие трещины усталости. В этой зоне видны характерные бороздки, которые имеют конфигурацию колец, что свидетельствует о скачкообразном продвижении трещины усталости. Последнюю стадию разрушения характеризует зона долома.

Дефекты сварных швов

Надежность эксплуатации сварных соединений зависит от их соответствия нормативной документации, которая регламентирует конструктивные размеры и форму готовых сварных швов, прочность, пластичность, коррозионную стойкость и свойства сварных соединений. Все встречающиеся типы дефектов сварных соединений можно подразделить на четыре группы: по расположению, форме, размерам и количеству.

По расположению различают дефекты наружные, внутренние и сквозные. По форме компактные и протяженные, плоские и объемные, острые (с надрезом) и округлые (без надреза). По размерам – мелкие, средние и крупные. По количеству – единичные и групповые (цепочки, скопления).

К наружным дефектам относятся нарушения формы, размеров и внешнего вида швов: неравномерная ширина шва по его длине, неравномерная высота шва, неравномерные катеты угловых швов, подрезы, наплывы, прожоги, не заваренные кратеры, свищи.

Образование внутренних дефектов при сварке связано с металлургическими, термическими и гидродинамическими явлениями, происходящими при формировании сварного шва.

К внутренним дефектам относятся трещины (горячие и холодные), непровары, поры, шлаковые вольфрамовые и окисные включения.

При макроанализе сварных швов выявляются следующие поверхностные дефекты:

а) неравномерность ширины и высоты наплавленного металла, наличие углов, наплывов, седловин у стыковых швов и неравная величина катетов у угловых швов.

Наплыв на сварном соединении – дефект в виде натека металла шва на поверхность основного металла или ранее выполненного валика без сплавления с ним;

б) подрезы, представляющие собой углубления у кромки шва в основном металле, возникают при завышенном режиме дуги

и уменьшают расчетное поперечное сечение материала, выступая одновременно в качестве концентраторов напряжений. Подрезы опасны и недопустимы, как очаги преждевременного разрушения (рис. 2.4);

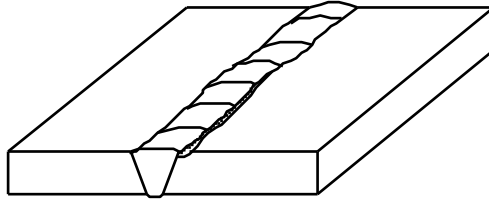


Рис. 2.4. Подрез

в) кратеры возникают при обрывах дуги. Они снижают стойкость шва против коррозии и локально уменьшают расчетное поперечное сечение. Поэтому часто являются очагами появления трещин и преждевременного разрушения;

г) прижоги – дефекты в виде окалины, пленки окислов или цветов побежалости на поверхности сварного соединения, появляются от чрезмерного завышения теплового режима сварочной дуги или в результате неравномерного перемещения электрода. При прижогах металл из-за укрупнения зерна становится недопустимо хрупким.

Все названные выше дефекты сварных швов могут быть устранены подваркой, если таковая допускается техническими условиями. Однако факт наличия этих поверхностных дефектов служит обычно основанием для предположения о наличии в металле шва опасных внутренних дефектов, схематически представленных на рис. 2.6.

Наиболее крупные из них можно выявить, не разрушая сварного соединения, например, с помощью рентгено – и гамма дефектоскопии, магнитным и ультразвуковым контролем.

Также важными дефектами являются следующие:

Прожог – дефект в виде сквозного отверстия в сварном шве, образовавшийся в результате вытекания сварочной ванны (рис. 2.5).

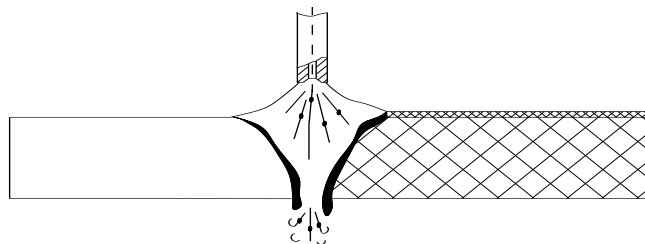


Рис. 2.5. Прожог

Брызги металла – дефект в виде затвердевших капель металла

на поверхности сварного соединения.

Смещение сваренных кромок – дефект в виде несовпадения сваренных кромок по высоте из-за некачественной сборки сварного соединения.

Занижение размеров сечения сварного шва – отклонение размеров сварного шва от минимально допустимых значений.

Вогнутость корня – дефект в виде углубления на поверхности обратной стороны сварного одностороннего шва.

Утяжина сварного соединения – дефект в виде углубления на поверхности обратной стороны сварного соединения в не полностью проплавленном основном металле детали или на остающейся подкладке вследствие усадки металла одностороннего шва.

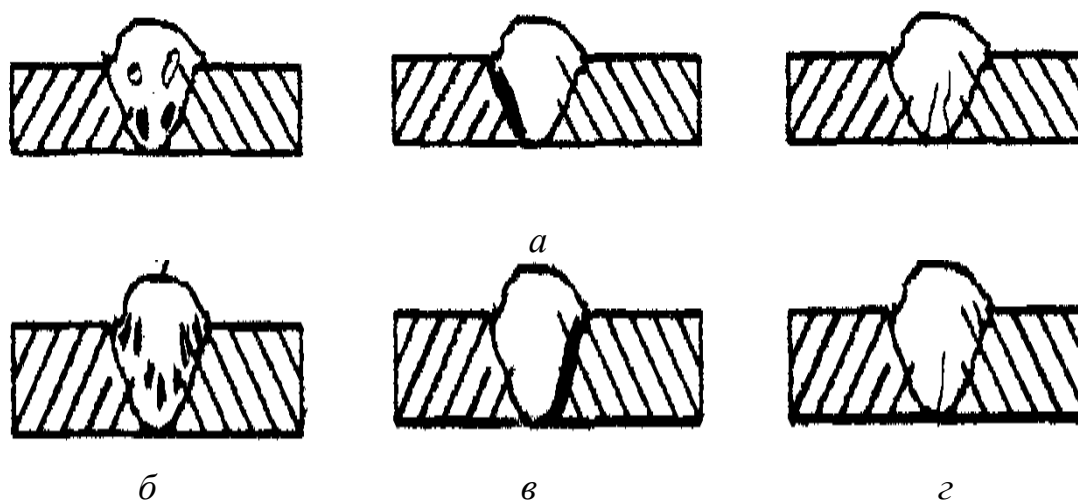


Рис. 2.6. Типичные внутренние дефекты: поры и газовые раковины – (а), шлаковые включения – (б), непровары – (в), трещины – (г)

Значительно сложнее – задача выявления мелких внутренних изъянов и особенно дефектов структуры.

К таким типичным недостаткам у сварных соединений относятся:

а) *газовые раковины и поры* (рис. 2.6, а). Пора – дефект сварного шва в виде полости округлой формы, заполненной газом возникающие вследствие насыщения газами металла сварочной ванны. Они могут быть и в результате загрязнения свариваемых кромок основного металла, сварки длинной дугой, наличия влаги в электродном покрытии и т.п.;

б) *шлаковые включения* – это полости в металле сварного шва, заполненные шлаками, не успевающими всплыть на поверхность шва.

Шлаковые включения образуются при больших скоростях сварки,

при сильном загрязнении кромок и при многослойной сварке в случаях плохой очистки от шлака поверхности швов между слоями. Форма шлаковых включений может быть самой разнообразной, вследствие чего они являются более опасными дефектами, чем округлые поры;

в) *непровар* – это участок сварного соединения, где отсутствует сплавление между свариваемыми деталями, например, в корне шва, между основным и наплавленным металлом (по кромке) или между смежными слоями наплавленного металла (рис 2.7). Непровары уменьшают рабочее сечение сварного шва, что может привести к снижению работоспособности сварного соединения. Являясь концентраторами напряжений, непровары могут вызвать появление трещин, уменьшить коррозионную стойкость сварного соединения, привести к коррозионному растрескиванию;

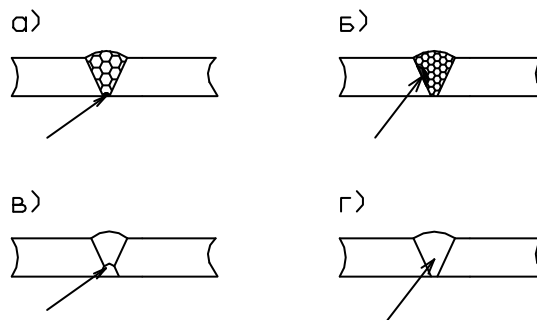


Рис. 2.7. Непровары:

a – в корне одностороннего стыкового шва; *b* – по кромке между основным и наплавленным металлом; *v* – в корне двустороннего шва; *г* – между слоями

г) *трещины* – наиболее опасные внутренние дефекты сварки. Они могут быть макроскопическими и микроскопическими, а по происхождению горячими и холодными. Первые из них возникают в процессе кристаллизации наплавленного металла под действием растягивающих напряжений. Холодные трещины появляются по тем же причинам в уже остывшем металле и до эксплуатации, и в процессе таковой (рис. 2.8).

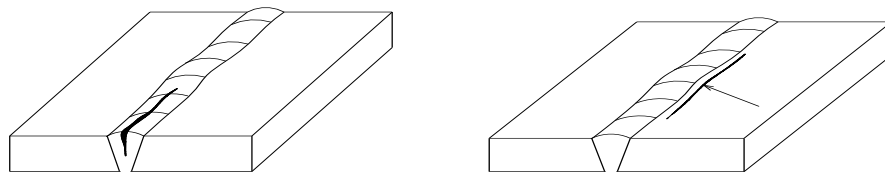


Рис. 2.8. Продольная горячая трещина и холодная трещина в около шовной зоне

Причины трещин:

- 1) усадочные напряжения, превышающие предел прочности металла;
- 2) жесткое закрепление свариваемых элементов;
- 3) структурные напряжения, например, образование мартенсита;
- 4) повышенное содержание углерода, серы и фосфора в металле;
- 5) сварка при низкой температуре;
- 6) дефекты шва (поры, шлаковые включения и т.д.), вызывающие местную концентрацию напряжений в металле шва;
- 7) сосредоточение нескольких швов на небольшом участке изделия, вызывающее повышенные местные напряжения (концентрация напряжений).

В табл. 2.1 приводятся термины различных видов трещин сварных соединений по ГОСТ 19232-73.

Таблица 2.1

Термин	Определение
Трещина сварного соединения	Дефект сварного соединения в виде разрыва в сварном шве и (или) прилегающих к нему зонах
Продольная трещина	Трещина, ориентированная параллельно продольной оси сварного шва
Поперечная трещина	Трещина, ориентированная перпендикулярно продольной оси сварного шва
Разветвления	Трещина сварного соединения, имеющая ответвления в различных направлениях
Микротрещины	Трещина сварного соединения, обнаруживаемая при увеличении не менее 50
Усадочная трещина	Дефект в виде полости, образовавшийся в результате усадки металла сварного шва при затвердевании

Сварные соединения с выявленными в них трещинами обычно отбраковываются и реже подлежат исправлению. Трещины – дефект недопустимый, а обнаружить их не всегда удается.

Для выяснения причин поломки сварного соединения или детали машины из них вырезают макрошлифы таким образом, чтобы анализируемая поверхность гарантировала достоверность и однозначность заключения. Исследуемая поверхность, например макрошлифа сварного шва, должна пересечь его поперек. Она тщательно шлифуется и полируется, травится соответствующим реактивом. Травление поверхности позволяет выявить макроструктуру (зерна, зоны перегрева, волокна) и установить характер дефектов. Так по макроструктуре можно вполне достоверно судить о качестве анализируемого сварного соединения.

Микроскопическое исследование

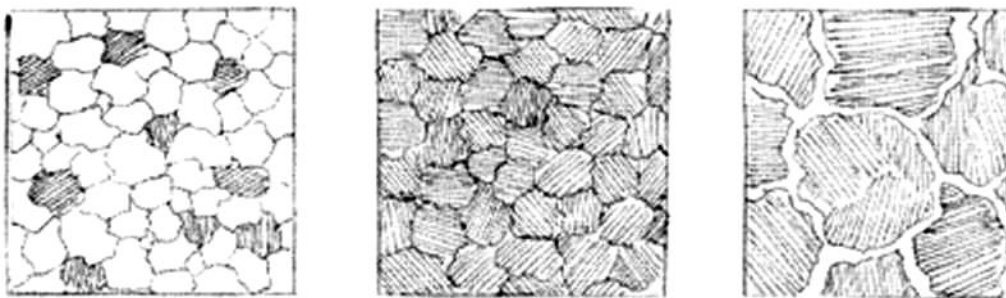
Метод основан на применении оптических микроскопов, работающих по принципу отраженного света, с полезным увеличением « 60^x - 2000^x ». Основные элементы мезоструктуры: зерно, фрагмент зерна, блоки, микровключения (их форма, размеры, количество и взаимное расположение), границы зерен, линии сдвига, полосы скольжения, микротрещины и микропоры.

Анализ мезоструктуры производится с помощью микрошлифов, рабочие поверхности которых в форме ровной площадки после тщательной шлифовки полируются до зеркального блеска. Затем они подлежат промывке чаще спиртом, и сушке обычной фильтровальной бумагой.

При анализе такой отполированной поверхности под микроскопом выявляются присутствующие в металле неметаллические включения (сульфиды, шлак, окислы, силикаты, графит и др.), рыхлоты и микротрещины. Все они легко выявляются потому, что взаимодействуют со световым потоком иначе, чем зеркально гладкая металлическая поверхность.

Действительную структуру анализируемого металла можно увидеть лишь после травления поверхности микрошлифа соответствующим реактивом. Реактив растворяет металл, прежде всего, по границам зерен.

Микроструктуры железоуглеродистых сплавов (схемы структур)

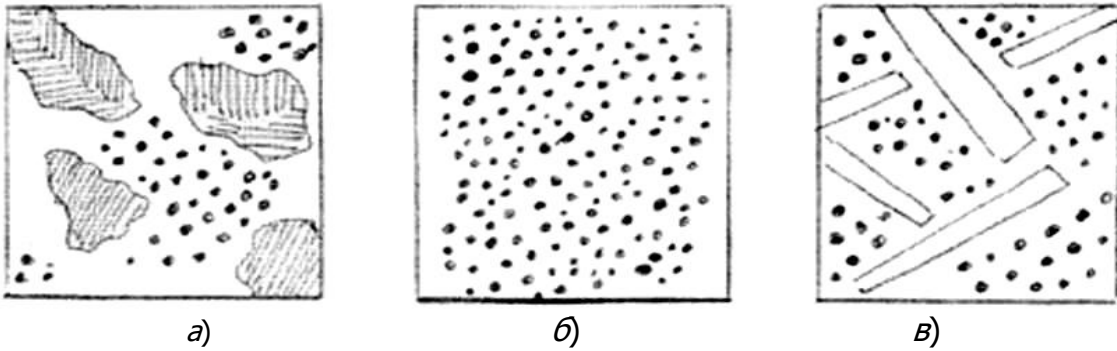


а)

б)

в)

Микроструктуры сталей: *а)* доэвтектоидной (феррит + перлит); *б)* эвтектоидной (перлит); *в)* заэвтектоидной (перлит + цементит вторичный)



Микроструктура чугунов:
 а) доэвтектического (ледебурит + перлит + цементит вторичный);
 б) эвтектического (ледебурит); в) заэвтектического (ледебурит + цементит первичный)

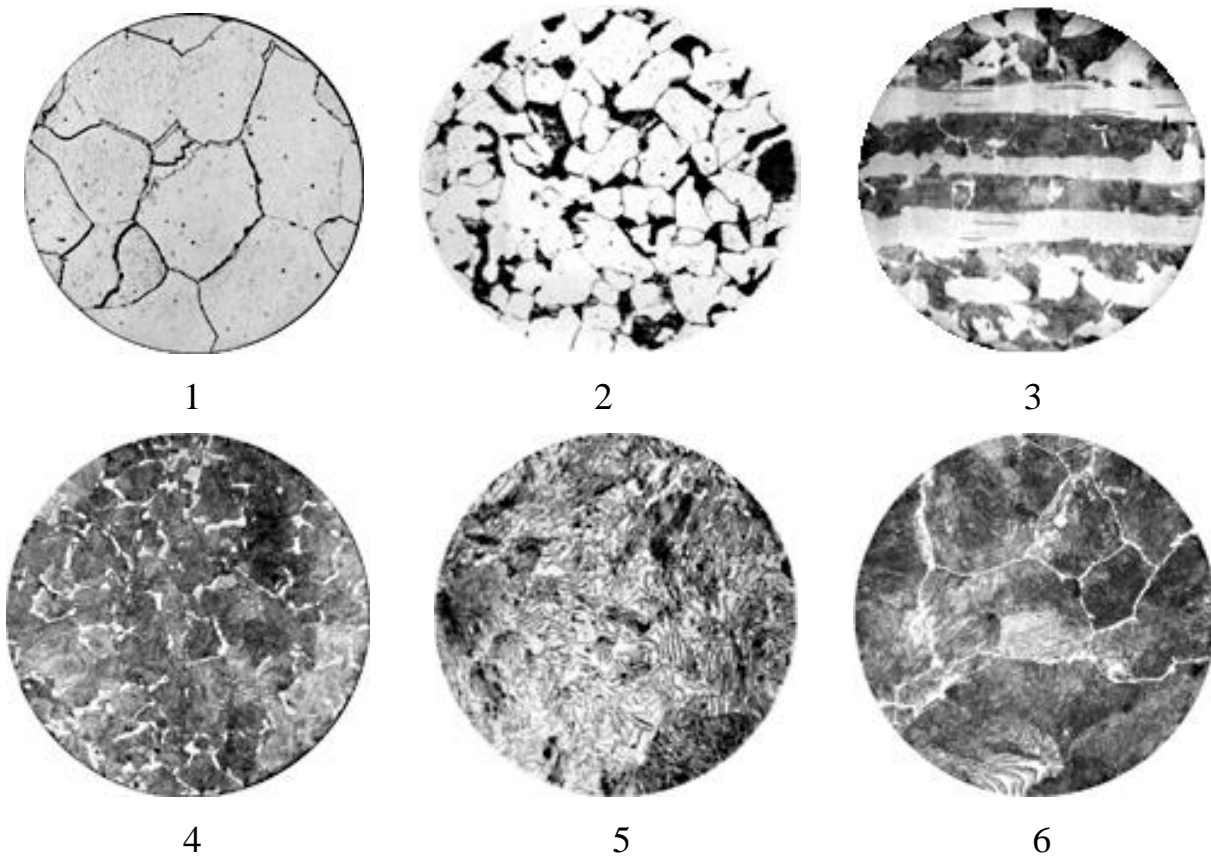


Рис. 2.9. Фотографии мезоструктуры сталей

Доэвтектоидной:

1. Сталь 10.

Структурные составляющие: феррит, третичный цементит.

Описание: Нежелательная структура. Зерна феррита (матрица) и отдельные включения третичного цементита в виде тонких прослоек по границам зерен. Темные пятна – дефекты полировки («грязь»).

2. Сталь 20.

Структурные составляющие: феррит, перлит.

Описание: Избыточный феррит (светлые зерна, матрица) и перлит (включения). Пример удовлетворительного травления. Границы зерен феррита отлично различаются и, несмотря на низкое разрешение фото, с трудом, но различается субструктура перлита.

3. Сталь 45.

Структурные составляющие: феррит, перлит.

Описание: Полосчатая структура в стали после горячей деформации. Шлиф с боковой поверхности (направление прокатки горизонтально относительно фото; обжатие при прокатке – вертикально). Внутри светлого феррита видны удлиненные включения (строчки) сульфидов.

4. Сталь 70.

Структурные составляющие: перлит, феррит.

Описание: Избыточный феррит в виде пограничных выделений и темный перлит (матрица) с различной пластинчатой структурой.

5. Сталь 80.

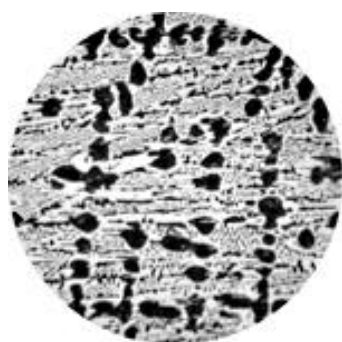
Структурные составляющие: перлит.

Описание: Колонии крупнопластинчатого перлита в зернах с хорошо различной пластинчатой структурой. Крупные пластины ухудшают механические свойства.

6. Сталь У12.

Структурные составляющие: перлит, цементит вторичный.

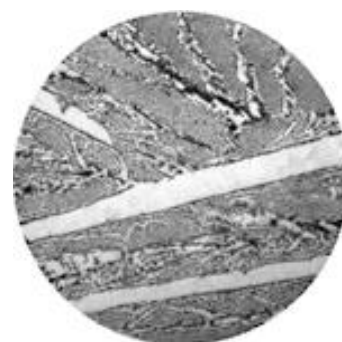
Описание: БРАК. Пограничные выделения вторичного цементита в виде сплошной тонкой светлой сетки (матрица) по границам зерен бывшего аустенита, превратившегося при медленном охлаждении в крупнопластинчатый перлит.



1



2



3



Рис. 2.10. Фотографии микроструктур чугунов

Белые чугуны:

1. Доэвтектический.

Структурные составляющие: ледебурит, перлит.

Описание: Дендриты превращенного в перлит аустенита (темные включения) и ледебурит (пестрая матрица).

2. Эвтектический.

Структурные составляющие: ледебурит.

Описание: Ледебурит

3. Заэвтектический.

Структурные составляющие: ледебурит, цементит первичный.

Описание: Крупные пластины первичного цементита (светлые) и ледебурит (пестрая матрица) в виде нескольких колоний.

Ковкий, серый и высокопрочные чугуны:

4. КЧ 35-10

Структурные составляющие: феррит, графит хлопьевидный.

Описание: Ковкий чугун на ферритной металлической основе. Хлопьевидные включения графита (темно-серые) в ферритной матрице.

5. СЧ 15

Структурные составляющие: феррит, графит крабовидный.

Описание: Серый чугун на ферритной металлической основе. Темные включения крабовидного (пластинчатого) графита в ферритной матрице.

6. ВЧ 60-5

Структурные составляющие: перлит, феррит, графит глобулярный.

Описание: Высокопрочный серый чугун на ферритно-перлитной металлической основе. Модифицирование магнием. Глобулярные включения графита (черный) окруженные слоем феррита (светлый) в темной перлитной матрице.

Обработка результатов, их обобщение и выводы

Полученные результаты следует обрабатывать следующим образом:

1. Зарисовать обследованные дефекты сварных соединений с их пояснением.
2. Привести эскизы увиденных изломов с их полной характеристикой.

Контрольные вопросы и задачи

1. Какие дефекты обнаруживаются при макроанализе и микроанализе?
2. Как выявляется микроструктура металлов?
3. Как подготавливается микрошлиф для исследования?
4. По каким группам производится классификация Fe–C сплавов?
5. Какие структурные составляющие характеризуют стали и чугуны?
6. Как протравливается перлитное и ферритное зерно?
7. Как подсчитать содержание углерода в доэвтектоидной стали?

Задача 1

Два коленчатых вала были разрушены в процессе эксплуатации в области шатунных шеек. Какие виды изломов изображены на рис. 2.11 и 2.12?

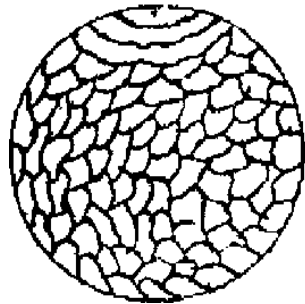


Рис. 2.11

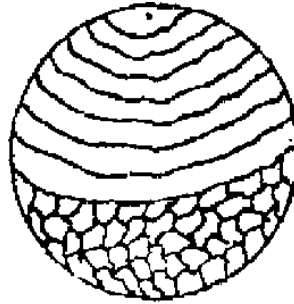


Рис. 2.12

Опишите:

1. Вид и строение изломов.
2. Характер нагружения коленчатых валов.
3. Причины разрушения.

Задача 2

Качество нагрева металла под штамповку контролируется по излому. Опишите изображенные на рис. 2.13 изломы и указать основные факторы, влияющие на рост зерна:

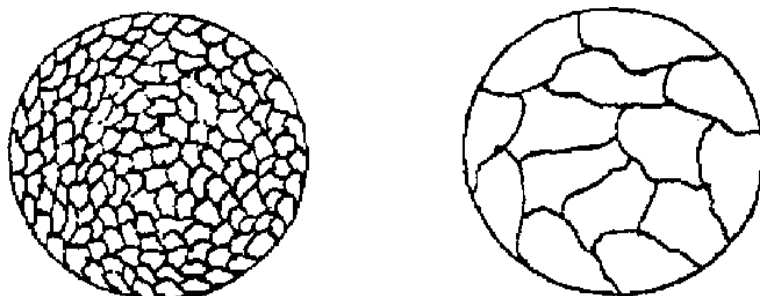


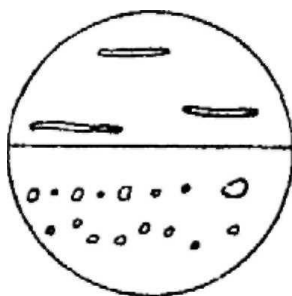
Рис. 2.13. Изломы

Опишите:

1. Влияние температуры нагрева.
2. Влияние времени нагрева.
3. Влияние химического состава стали.

Задача 3

Неметаллические включения располагаются в виде тонких вытянутых линз или округлых разрозненных включений.



Опишите:

1. Какие виды неметаллических включений встречаются в сталях.
2. Причины попадания их в металл.
3. Влияние неметаллических включений на механические свойства.
4. Радикальные средства уменьшения неметаллических включений в металле.

Задача 4

Два коленчатых вала имеют различную макроструктуру (рис. 2.14)

Опишите:

1. Строение макроструктуры, указанной на приведенных рисунках.

2. Способы получения коленчатых валов с данными макроструктурами.
3. Методы выявления макроструктуры.

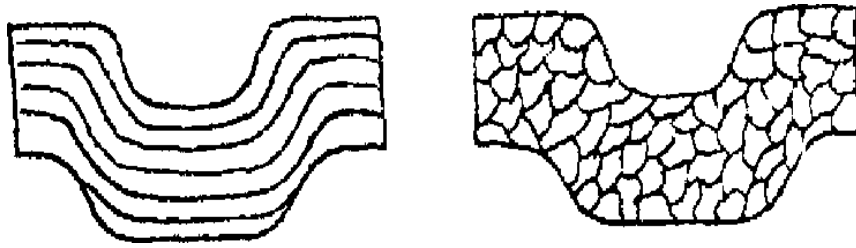
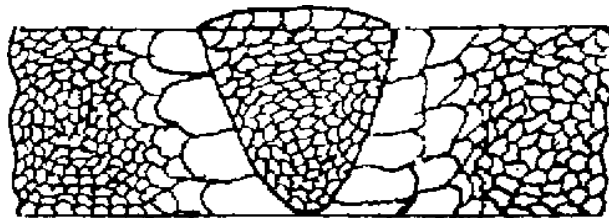


Рис. 2.14. Макроструктура сталей в равновесном состоянии в зависимости от содержания углерода (x450): а – 0,22%; б – 0,3%; в – 0,4%; г – 0,55%; д – 0,8%; е – 1,3%.

Задача 5

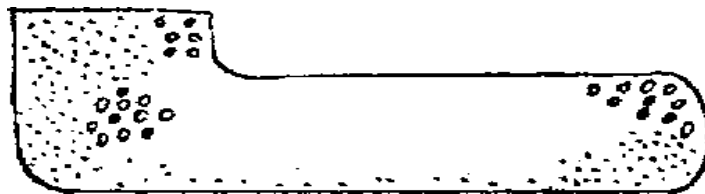


Сварной шов после сварки плавящимся электродом приобрёл макроструктуру, указанную на рисунке:

1. Опишите макроструктуру шва и околошовной зоны.
2. Укажите причину неоднородного строения шва и околошовной зоны.

Задача 6

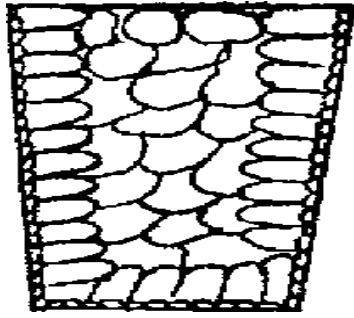
В стальных деталях после отливки их в земляную форму была обнаружена повышенная пористость.



Опишите:

1. Возможные причины образования пористости в литых деталях.
2. Влияние пористости на свойства отливок.
3. Способы предупреждения образования пористости.

Задача 7

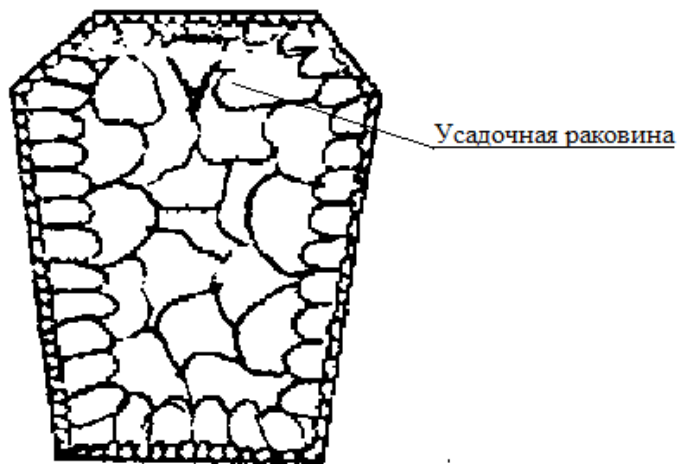


Стальной слиток после полного охлаждения имеет макроструктуру, указанную на рисунке.

Опишите:

1. Макроструктуру стального слитка.
2. Зональную ликвацию.
3. Дендритную ликвацию.

Задача 8



Стальной слиток после полного охлаждения имеет макроструктуру, указанную на данном рисунке.

Опишите:

1. Макроструктуру стального слитка.
2. Зональную и дендритную ликвацию.
3. Укажите марку сталей, кристаллизующихся с концентрированной усадочной раковинной, способ раскисления.

Лабораторная работа № 3

МЕЗОСТРУКТУРА, МАРКИРОВКА И КЛАССИФИКАЦИЯ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Цель работы

Изучение влияния легирующих элементов на кинетику распада переохлажденного аустенита, структуру и свойства легированных сталей различных структурных классов; знакомство с классификацией и маркировкой легированных сталей.

Основные термины и понятия, необходимые для освоения данной работы

Сталь, латунь, бронза, легирование, нормализация, закалка, аустенит, перлит, цементит, мартенсит, ползучесть, двойникование, предел прочности.

Порядок выполнения работы

Для выполнения работы студентам предоставляется микроскоп и набор микрошлифов сталей.

Необходимо:

1. Просмотреть под микроскопом все шлифы набора и зарисовать их мезоструктуру.
2. Определить структурный класс стали и стрелками указать на каждом рисунке структурные составляющие.

Структура, маркировка и классификация легированных сталей

Легированная сталь – это сплав железа с углеродом и легирующими элементами (Cr, Ni, Mo, W, V и др.), специально вводимыми в сталь с целью изменения ее структуры и свойств в желаемом направлении. Кремний и марганец присутствующие в стали в ограниченном количестве как технологические примеси (Si до 0,4 %, Mn до 0,81) также могут быть легирующими элементами, если их содержание превышает указанные выше значения.

Для маркировки легированных сталей в нашей стране принята система обозначения марок стали буквами и цифрами.

Каждый легирующий элемент обозначается заглавной буквой русского алфавита: А – азот; Б – ниобий; В – вольфрам; Г – марганец; Д – медь; К – кобальт; М – молибден; Н – никель; Р – бор; С – кремний; Т – титан; Ф – ванадий; Ц – цирконий; Ю – алюминий.

Цифры в начале марки указывают на содержание углерода в сотых (конструкционные стали) или в десятых (инструментальные стали) долях, процента. Цифра после буквы в марке стали указывает на количество того или иного элемента в процентах, округленное до целого числа. Отсутствие цифры после буквы указывает на то, что количество данного элемента составляет менее 1,5 %. Например: конструкционная сталь марки 30ХЗМФ содержит около 0,3 % углерода и 3 % хрома, а молибдена и ванадия менее 1,5 %; инструментальная сталь 9ХС содержит около 0,9 % углерода, хрома и кремния менее 1,5 %. Если в инструментальных сталях содержание углерода составляет один процент и более, то цифра в начале марки обычно не ставится. Так, сталь В2Ф содержит около 1,2 % углерода, 2 % вольфрама и менее 1,5% ванадия. Буква А в конце марки стали показывает на ее принадлежность к категории высококачественных (12Х2МФА).

Две буквы А или буква Ш (электрошлаковый переплав) в конце марки стали показывают, что сталь относится к категории особовысококачественных (15Х2НМФАА, 30ХГС-Ш).

Легированные стали различных качественных категорий различаются по тщательности выплавки, что определяется в первую очередь максимально допустимым содержанием вредных примесей серы и фосфора.

Содержание серы и фосфора в сталях различных категорий не должно превышать 0,04 % каждого в отдельности.

Буква А в середине марки стали указывает на содержание в ней азота (16Г2АФ, 23Г2САФ), а в начале марки – на то, что сталь автоматная, повышенной обрабатываемости (А35Г2).

Некоторые стали с особыми физическими свойствами, а также некоторые конструкционные и инструментальные стали, имеют в начале марки букву, характеризующую область применения: Ш – шарикоподшипниковые стали; Р – быстрорежущие стали; Е – стали для постоянных магнитов.

Легированные стали классифицируют по различным признакам.

По назначению легированные стали делят на конструкционные, инструментальные и стали с особыми свойствами.

Классификация легированных сталей

Категория стали	Содержание %	
	серы	фосфора
Качественная	0,035	0,035
Высококачественная	0,025	0,025
Особовысококачественная	0,015	0,025

По содержанию легирующих элементов, т.е. по степени легированности, легированные стали делят на низколегированные, в которых суммарное содержание легирующих элементов меньше 2,5 %, среднелегированные, содержащие от 2,5 до 10 % легирующих элементов, и высоколегированные, содержащие больше 10 % легирующих элементов.

По числу компонентов, считая железо, углерод и легирующие элементы, но пренебрегая примесями (марганцем, кремнием, серой и фосфором), стали могут быть двухкомпонентными (углеродистые), трехкомпонентными (один легирующий элемент), четырехкомпонентными (два легирующих элемента) и т.д. Стали, содержащие больше трех легирующих элементов, обычно называют многокомпонентными или сложнолегированными.

По структуре после нормализации (вид термической обработки) легированные стали делятся на три основных класса: **перлитный**, **мартенситный** и **аустенитный**. Образование той или иной структуры легированных сталей после нормализации можно объяснить с помощью диаграмм изотермического распада аустенита (рис. 3.1). Большинство легирующих элементов сдвигает С-образные кривые начала и конца распада аустенита вправо, увеличивая его устойчивость (т.е. время до начала распада) и снижает температуру начала мартенситного превращения M_n .

Устойчивость переохлажденного аустенита в сталях перлитного класса при температурах ниже A_c , невелика, поэтому при охлаждении на воздухе (скорость охлаждения на рис. 3.1, *a* обозначена стрелкой) происходит распад аустенита с образованием смеси феррита и цементита (перлит, сорбит или троостит). К сталям этого класса обычно относятся низколегированные стали, например четырехкомпонентная сталь 15ХМ. Наличие в стали молибдена увеличивает сопротивление ползучести и обуславливает ее применение для труб пароперегревателей, паропроводов и коллекторов, роторов и дисков турбин.

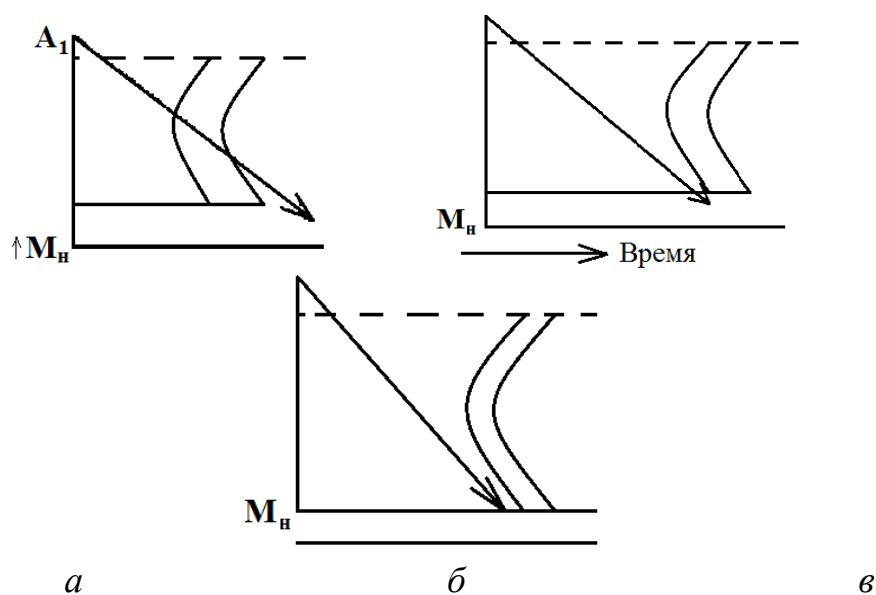


Рис. 3.1. Диаграммы изотермического распада переохлажденного аустенита сталей перлитного (*а*), мартенситного (*б*) и аустенитного (*в*) классов

Структура этой стали после нормализации состоит из феррита и перлита (рис. 3.2, *а*).

Среднелегированные стали относятся обычно к сталям мартенситного класса, т.е. после нормализации имеют структуру мартенсита. Кривые начала и конца распада аустенита этих сталей на диаграмме изотермического распада (рис. 3.1, *б*) так сильно сдвинуты вправо, что линия характеризующая скорость охлаждения, соответствующая процессу нормализации, пересекает изотерму мартенситного превращения, обычно не касаясь кривой начала распада аустенита.

К сталям мартенситного класса относится, например, сталь марки 18ХН4ВА. Эта сталь закаливается не только в масле, но и на воздухе. Она отличается высокими механическими свойствами и поэтому применяется для изготовления ответственных изделий: коленчатых валов, валов редукторов, шестерен. После нормализации и высокого отпуска она имеет предел прочности при растяжении 1000 МПа, относительное удлинение 10% и ударную вязкость 1,2 МДж/м². Ее структура после нормализации – мартенсит (рис. 3.2, *б*).



а

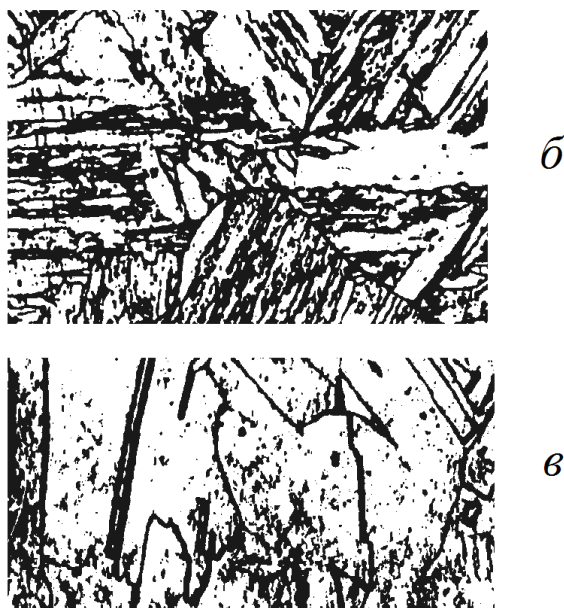


Рис. 3.2. Мезоструктуры легированных сталей: *а* – перлитного класса (15XM: перлит и феррит), *б* – мартенситного класса (18XN4BA: мартенсит), *в* – аустенитного класса (12X18N10T: зерна аустенита с двойниками скольжения)

При высоком содержании таких элементов как никель, марганец и некоторые другие кривые распада аустенита очень сильно сдвигаются вправо, а температура начала мартенситного превращения M снижается ниже нуля. Поэтому линия охлаждения, соответствующая процессу нормализации не пересекает ни кривую начала распада аустенита, ни линии мартенситного превращения (рис. 3.1, *в*).

Мезоструктура высоколегированных сталей, содержащих в своем составе большое количество никеля или марганца (или обоих элементов вместе), после нормализации состоит из зерен легированного аустенита.

На рис. 3.2, *в* показана мезоструктура стали 12X18N10T, относящейся к аустенитному классу: видны зерна аустенита с двойниками скольжения. Эта сталь является нержавеющей, так как содержание хрома в ней около 18 %, а при содержании хрома более 12 % в сталях на поверхности образуется защитная оксидная пленка Cr_2O_3 , надежно предохраняющая металл от окисления в морской воде, перегретом и насыщенном паре, в азотной и серной кислотах и в ряде других сред. Ее применяют для изготовления различной аппаратуры в химической, нефтяной и пищевой промышленности. Вследствие хорошей жаростойкости этой стали на воздухе и в выхлопных газах она применяется для изготовления выхлопных патрубков, коллекторов, глушителей и других деталей, отводящих отработанные газы.

Стали аустенитного класса немагнитные, поэтому они применяются в электротехнике и других областях промышленности для изготовления

немагнитных деталей повышенной прочности.

Кроме трех перечисленных классов имеются еще два структурных класса легированных сталей: ферритный и ледебуритный.

Стали ферритного класса содержат очень мало углерода и большое количество легирующих элементов (хром, кремний, вольфрам и др.), расширяющих область α -железа на диаграмме состояния. В сталях этого класса структура легированного феррита сохраняется до плавления, так как никаких аллотропических превращений эти стали не претерпевают и поэтому относятся к незакаливающимся. При их нагревании происходит только рост зерна. На рис. 3.3, *a* показана мезоструктура стали ферритного класса марки 1411(Э4). Ее химический состав: не более 0,03 % углерода, 3,8–4,8 % кремния. Мезоструктура состоит из крупных зерен кремнистого феррита. Сталь в виде тонких листов применяется для изготовления сердечников трансформаторов, так как отличается низкой коэрцитивной силой и высоким электросопротивлением, что снижает потери на вихревые токи.

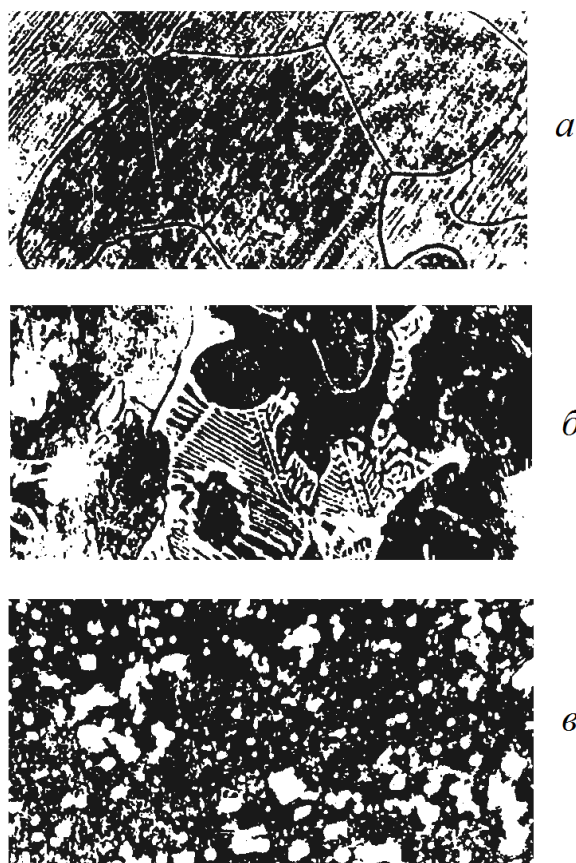


Рис. 3.3. Структуры легированных сталей: *a* – α -сталь ферритного класса: зерна кремнистого феррита; *б* – β -сталь ледебуритного класса Р18 литая; ледебуритная эвтектика, остаточный аустенит и продукты распада аустенита (трососторбит); *в* – γ -сталь Р18 ковчанная и термически обработанная: мартенсит отпущенный и мелкораздробленные карбиды

Стали ледебуритного класса содержат большое количество углерода и карбидообразующих элементов (Cr, Mo, W, V). Характерной особенностью их структуры является наличие ледебуритной эвтектики, состоящей из карбидов и перлита (сорбита, троостита). Возможно образование некоторого количества мартенсита и частичное сохранение аустенита.

Типичным представителем сталей ледебуритного класса является быстрорежущая сталь марки P18 следующего химического состава: 0,7–0,8 % углерода; 3,8–4,4 % хрома; 17–19 % вольфрама и 1–1,4 % ванадия. В литом состоянии структура этой стали состоит из остаточного аустенита, ледебуритной эвтектики, представляющей собой смесь сложных карбидов скелетообразного вида, и продуктов распада аустенита – сорбита и троостита (рис. 3.3, б). Ледебуритная эвтетика придает быстрорежущей стали повышенную хрупкость и создает опасность выкрашивания режущей кромки инструмента при ударах в процессе резания. Для устранения хрупкости литую быстрорежущую сталь подвергают горячей обработке давлением (прокатке, ковке), в процессе которой крупные карбиды размельчаются и в виде мелких включений равномерно распределяются в металлической основе.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается процесс легирования сталей?
2. С какой целью производят легирование Cr, Ni, Mo, W, V?
3. Как обозначаются легирующие элементы в марках сталей?
4. Как влияет процесс легирования на превращения при термообработке?
5. Какие категории сталей Вы знаете?
6. Опишите структуру легированных сталей после нормализации.
7. Что такое перлитные стали и их применение? Нарисуйте диаграмму.
8. Что такое мартенситные стали и их применение? Нарисуйте диаграмму.

Лабораторная работа № 4

СТРУКТУРА, СВОЙСТВА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Цель работы

Изучить основные свойства и области применения меди, алюминия и сплавов на их основе, а также сплавов на основе олова и свинца; освоить методики определения мезоструктуры цветных металлов и сплавов; научиться расшифровывать марки цветных металлов и сплавов.

Порядок выполнения работы

1. Просмотреть под микроскопом все шлифы, зарисовать наблюдаемую структуру и стрелками указать на зарисовках структурные составляющие сплавов.

2. По структуре определить состояние сплавов: литое (модифицированное или немодифицированное), деформированное или отожженное.

3. Изучить маркировку цветных металлов и сплавов, привести примеры марок из ГОСТа наиболее распространенных в технике цветных металлов и сплавов.

Основные термины и понятия, необходимые для освоения данной работы

Предел текучести, теплопроводность, отожжённая медь, двойники скольжения, литейный сплав, эвтектика, закалка, старение, твердый раствор.

Медь и ее сплавы

Медь достаточно тяжелый металл ($\gamma = 8,9 \text{ г/см}^3$) с кристаллической решеткой ГЦК, имеющий температуру плавления $1083 \text{ }^\circ\text{C}$. Чистая медь имеет ряд ценных технических свойств. Она отличается высокой тепло- и электропроводностью, хорошей коррозионной стойкостью. По электропроводности медь занимает второе место после серебра, что обуславливает ее преимущественное применение в электротехнике в качестве проводников. По теплопроводности медь также уступает только серебру

и широко используется в теплообменниках.

Медь обладает небольшой прочностью и высокой пластичностью: предел прочности отожженной меди составляет 200 МПа, предел текучести 80 МПа, поперечное сужение 80–95 %, относительное удлинение 35 %.

Марки меди обозначаются прописной буквой М, справа от которой ставится номер: М00(99,99 % Cu), М0 (99,95 % Cu), М1 (99,9 % Cu), ... , М4 (99,0 % Cu). Чем чище медь, тем меньше ее номер. Все примеси снижают электропроводность меди. Для проводников тока применяется чистая медь марок М0, М1, а в электронике и электровакуумной технике – бескислородная медь М06 (99,97% Cu) и медь вакуумной очистки М00.

На рис. 4.1 показана мезоструктура отожженной меди. Зерна меди имеют форму неправильных многогранников с двойниками скольжения, характерными для высоко пластичных металлов с решеткой ГЦК.

В качестве конструкционного материала медь не получила применения из-за низкой прочности. Сплавы на основе меди (латуни и бронзы) имеют более высокие прочностные свойства и широко применяются в машиностроении.

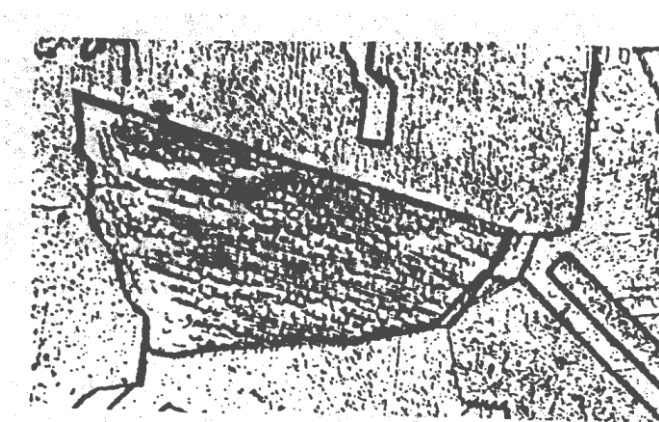


Рис. 4.1. Структура отожженной меди: зерна меди с двойниками скольжения

Латуни

Латуни – сплавы меди с цинком. При содержании цинка до 39 % латуни однофазны: мезоструктура состоит из α -твердого раствора цинка в меди. Такие латуни пластичны, отличаются высокой технологичностью, легко поддаются горячей и холодной обработке давлением.

При увеличении содержания цинка от 39 до 45 % структура латуней двухфазная: $\alpha + \beta'$, где β' – твердый раствор на основе химического соединения CuZn. Структура двухфазных латуней в литом состоянии состоит из светлых кристаллов α -фазы и темных β' -фазы (рис. 4.2).

Двухфазные латуни из-за наличия в структуре твердой β' -фазы менее технологичны, чем однофазные α – латуни. Малопластичны в холодном состоянии.



Рис. 4.2. Структура латуни Л59 в литом состоянии: дендриты α - и β' - фаз

Латуни маркируют буквой Л, за которой следует цифра, показывающая среднее содержание меди в сплаве. Например, латунь марки Л62 содержит 62% меди и, следовательно, 38 % цинка.

Кроме двухкомпонентных латуней (сплавов меди и цинка) применяют специальные латуни, которые содержат дополнительно один или несколько элементов. Легирующие элементы имеют буквенное обозначение: А – алюминий, Ж – железо, К – кремний, Н – никель, Мп – марганец, О – олово, С – свинец. Числа, проставленные в той же последовательности, что и соответствующие буквы, показывают процентное содержание меди и легирующих элементов. Например: латунь марки ЛАЖ60-1-1 имеет следующий химический состав: Cu – 60 %, Al – 1 %, Fe – 1 %, остальное Zn. Легирующие элементы (кроме свинца) увеличивают прочность и твердость латуни, Al, Si, Ni повышают сопротивление коррозии. Свинец улучшает обрабатываемость латуней резанием. Алюминиевые латуни обладают повышенной коррозионной стойкостью, из-за образования на поверхности плотной защитной окисной пленки Al_2O_3 .

Латуни применяются для изготовления деталей масло- и воздухоохладителей, трубок конденсаторов, уплотнительных сегментов турбин, работающих при температурах ниже 300 °С, а также для изготовления корпусов кранов, тройников, шпилек, штуцеров, болтов и других деталей. Несмотря на худшую по сравнению с медью электропроводность, латуни марок Л68 и Л62, вследствие их меньшей стоимости, идут на изготовление некоторых токоведущих деталей.

Бронзы

Бронзами называют сплавы меди с другими металлами, кроме цинка. Цинк может входить в состав бронз, как добавка, но не является основным компонентом.

Бронзы обладают высокой коррозионной стойкостью, хорошо обрабатываются резанием, имеют хорошие литейные и высокие антифрикционные свойства. Бронзы превосходят латуни в прочности и сопротивлении коррозии, особенно в морской воде.

Маркируются бронзы следующим образом: индекс Вг означает название сплава – бронза. Следующие за ним буквы указывают на наличие легирующих элементов, а цифры – их содержание в сплаве (в процентах). Например, бронза марки ВгОФ10-1 имеет следующий химический состав: Sn – 10 %, P – 1 %; остальное Cu.

Исходя из химического состава, бронзы делятся на *оловянные* и *безоловянные*.

Оловянные бронзы

Бронзы, содержащие менее 6 % олова, имеют в литом состоянии однофазную структуру – твердого раствора олова в меди. Структура сплавов с 6–10 % Sn в литом состоянии – дендриты α -твердого раствора и участки эвтектоида между ними (δ -твердый раствор на основе химического соединения) (рис. 4.3). С увеличением содержания олова свыше 10 %, вследствие присутствия в структуре значительного количества хрупкого соединения $Cu_{31}Sn_8$, пластичность оловянных бронз резко снижается.

Однофазные бронзы относятся к деформируемым. Из них изготавливают прутки, ленту, проволоку, пружины, мембраны. Примером может служить бронза БрОФ4-0,25.

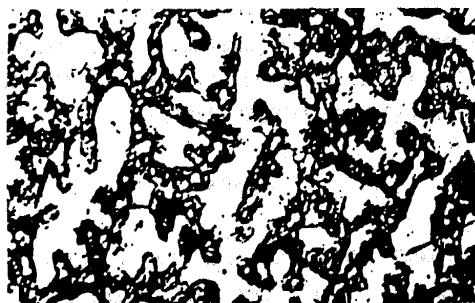


Рис. 4.3. Структура бронзы БрОФ10-1 в литом состоянии: дендриты α -твердого раствора (белого цвета) и эвтектоид $\alpha + Cu_{31}Sn_8$ (темный) между ними

Одной из наиболее широко применяемых литейных бронз является бронза БрОФ10-1. Она отличается высокой коррозионной стойкостью и хорошими антифрикционными свойствами. Эта бронза применяется для деталей, работающих в условиях сильного износа при статических и ударных нагрузках: фрикционные и зубчатые колеса, венцы червячных колес, вкладыши тяжело нагруженных подшипников и др.

Безоловянные бронзы

К безоловянным бронзам относят сплавы меди с алюминием, кремнием, бериллием и другими элементами.

Алюминиевые и кремнистые бронзы дешевле оловянных и вместе с тем превосходят их по ряду качеств. Алюминиевые бронзы БрАЖ9-4, БрАЖН10-4-4 имеют более высокие прочностные свойства. Кремнистые бронзы БрКМц3-1, БрКН1-3, благодаря высоким механическим свойствам, упругости и хорошей коррозионной стойкости, применяют для изготовления пружин, пружинящих деталей, работающих при температурах до 250 °С в пресной и морской воде.

Бериллиевые бронзы (например БрБ2) характеризуются высокими механическими свойствами, коррозионной стойкостью, отличной износостойкостью. Эти сплавы имеют высокую электро- и теплопроводность и могут работать в интервале температур от –200 до +250 °С. Бериллиевые бронзы применяют для ответственных деталей: мембраны, пружины детали, работающих на износ (кулачки полуавтоматов) и т.д. Широкому применению бериллиевых бронз препятствуют высокая стоимость и токсичность бериллия.

Алюминий и его сплавы

Алюминий – металл с ГЦК кристаллической решеткой, имеющий температуру плавления 658 °С. Характерными свойствами алюминия являются малый удельный вес $\gamma = 2,72 \text{ г/см}^3$ (он почти в 3 раза легче стали, у которой $\gamma = 7,8 \text{ г/см}^3$), высокая тепло- и электропроводность (около 60 % от электропроводности меди). Высокая электропроводность алюминия обуславливает широкое применение его для проводников электрического тока.

Алюминий обладает высокой стойкостью против атмосферной коррозии (она примерно в 20 раз больше, чем у стали), что объясняется

образованием на его поверхности окисной пленки Al_2O_3 , защищающей его от взаимодействия с окружающей средой. Алюминий характеризуется малой прочностью и высокой пластичностью: предел прочности прокатанного и отожженного алюминия 60 МПа, предел текучести 20 МПа, относительное удлинение 40 %. Алюминий отличается высокой технологичностью, хорошо деформируется прокаткой.

Маркируют алюминий буквой А, за которой следует число, соответствующее содержанию алюминия сверх 99 %. Например, в алюминии высокой чистоты А995 содержится 99,995 % А1, в алюминии технической чистоты А5 – 99,5 %. Основными примесями, загрязняющими алюминий, являются железо и кремний.

Алюминиевые деформируемые сплавы

Алюминиевые сплавы в зависимости от технологии изготовления из них деталей делятся на две группы: деформируемые и литейные. Деформируемые алюминиевые сплавы в свою очередь подразделяются на сплавы, не упрочняемые термической обработкой, и сплавы, упрочняемые термической обработкой.

К деформируемым, термически не упрочняемым сплавам, относятся сплавы алюминия с марганцем и магнием. Содержание марганца в этих сплавах не превышает 1,6 %, а содержание магния находится в пределах от 2 до 7 %.

Маркируются сплавы этой группы буквенными обозначениями АМп и АМg, где индекс Мп означает марганец, а Мg – магний.

Структура рассматриваемых сплавов представляет собой твердый раствор марганца (или магния) в алюминии. Поскольку содержание этих элементов в сплавах меньше предела их растворимости в твердом растворе при комнатной температуре, то оно остается неизменным при нагреве и охлаждении сплавов. Поэтому такие сплавы не упрочняются термической обработкой, а упрочняются наклепом при обработке давлением.

Среди сплавов, упрочняемых термической обработкой, наиболее распространенными являются *дюралюмины* – сплавы системы Al-Cu-Mg, содержащие 4–5 % меди и 0,5–1,5 % магния. В марках этих сплавов буквой Д обозначено название сплава – дюралюмин, за ней следует цифра или число, показывающие порядковый номер сплава в ГОСТе (например Д1, Д16).

Структура дюралюмина в отожженном состоянии состоит из

α -твердого раствора меди и магния в алюминии и включений химических соединений CuAl_2 , Al_2CuMg (рис. 4.4).

Максимальную прочность дуралюмины приобретают после термической обработки, заключающейся в закалке и старении. Так, для сплава Д16 предел прочности в отожженном состоянии равен 200 МПа; после закалки он составляет 250 МПа, а после закалки и старения значительно возрастает, достигая 400 МПа.

Естественное старение заключается в выдержке (вылеживании) закаленного материала при комнатной температуре в течение нескольких суток; при искусственном старении сплав нагревают до температуры 100–150 °С, а время выдержки сокращается до 10–20 часов.

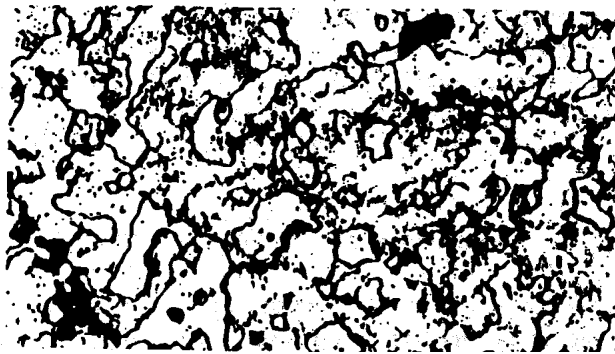


Рис. 4.4. Структура отожженного дуралюмина Д1: белые зерна α -твердого раствора и включения интерметаллидов CuAl_2 (темные точечные внутри зерен и твердого раствора)

Литейные алюминиевые сплавы

Наиболее распространенными литейными алюминиевыми сплавами являются силумины – сплавы алюминия с кремнием с содержанием кремния 8–13 %. Силумины относятся к эвтектическим сплавам со структурой ($\alpha + \text{Si}$) или доэвтектическим, структура которых состоит из первичных кристаллов α и эвтектики ($\alpha + \text{Si}$).

Механические свойства силуминов можно повысить путем измельчения кристаллов кремния, входящих в состав эвтектики. Это достигается модифицированием, т.е. введением в расплав малых добавок (сотые доли процента) натрия или лития. Измельчение структуры эвтектики приводит к улучшению механических свойств. Так, предел прочности немодифицированного силумина 140 МПа при относительном удлинении 3 %, а у модифицированного $\sigma_B = 180$ МПа, а $\delta = 10\%$. Структура немодифицированного силумина показана на рис. 4.5, а модифицированного – на рис. 4.6.



Рис. 4.5. Структура немодифицированного силумина АЛ2: грубая эвтектика ($\alpha + \text{Si}$) с крупными игольчатыми включениями кремния



Рис. 4.6. Структура модифицированного силумина АЛ₂: зерна α -твердого раствора (белые) и дисперсная эвтектика ($\alpha + \text{Si}$) между ними

Маркируют силумины буквенным обозначением АЛ: А означает, что сплав алюминиевый, Л – литейный; далее следует цифра или число, показывающие порядковый номер сплава в ГОСТе (АЛ2, АЛ9, АЛ32 и т.д.). Силумины широко применяются для изготовления литых деталей сложной формы: кронштейнов, блоков цилиндров двигателей, корпусов компрессоров и др.

Подшипниковые антифрикционные сплавы

Подшипниковыми сплавами называют сплавы, из которых изготавливают вкладыши подшипников скольжения. Для этой цели применяют чугун, бронзу и легкоплавкие сплавы на основе свинца, олова и алюминия, так называемые баббиты.

К подшипниковым материалам предъявляют следующие требования: небольшой коэффициент трения, способность работать при достаточно высоких нагрузках и высокая износостойкость.

К легкоплавким подшипниковым сплавам относятся сплавы системы Pb-Sb, Sn-Sb, Pb-Sn-Sb. Лучшим антифрикционным сплавом является баббит марки Б83, содержащий 83 % олова, 11 % сурьмы, 6 % меди. Структура этого сплава состоит из мягкой основы α -твердого раствора

сурьмы и меди в олове и твердых включений химических соединений Cu_3Sn и SnSb . В процессе работы твердые включения служат опорой для вращающегося вала, а мягкая основа, срабатываясь при трении, способствует образованию зазора, по которому поступает смазка. Это обеспечивает низкий коэффициент трения в подшипнике.

Структура баббита Б83 приведена на рис. 4.7. Темная основа представляет собой α -твердый раствор сурьмы и меди в олове. Светлые кристаллы квадратной формы являются соединением SnSb , а кристаллы игольчатой формы – соединением Cu_3Sn .



Рис. 4.7. Структура баббита Б83: основа – твердый раствор α и кристаллы SnSb и Cu_3Sn

Контрольные вопросы

1. Назовите принципы классификации цветных металлов.
2. Расскажите, что такое латунь. Ее маркировка. Применение.
3. Расскажите, что такое бронза. Ее маркировка. Применение.
4. Перечислите классификацию латунь и бронз.
5. Назовите, какие из применяемых алюминиевых сплавов являются литейными?
6. Какие сплавы меди и алюминия используются в качестве проводниковых материалов в электроэнергетике.
7. Какие металлы используются для подшипников скольжения?

Лабораторная работа № 5

ДИАГРАММА Fe–C И СТРУКТУРА ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

Цель работы

Изучить теорию процессов, происходящих в железоуглеродистых сплавах при охлаждении и нагреве; научиться определять по диаграмме состояния Fe – C фазовые и структурные состояния сталей и чугунов.

Рабочее задание

1. Зарисуйте диаграмму состояния железо-цементит. Постройте кривые охлаждения для доэвтектоидной, эвтектоидной и заэвтектоидной стали. Опишите, как формируется структура сталей при охлаждении из жидкого состояния до комнатной температуры.

2. С помощью микроскопа изучите структуру доэвтектоидных, эвтектоидных и заэвтектоидных сталей в равновесном состоянии. Зарисуйте наблюдаемые в микроскоп структуры, определите количество присутствующих фаз и структурных составляющих в процентах, сравните мезоструктуры углеродистой и легированной хромом сталей с одинаковым содержанием углерода и дайте описание.

3. Рассмотрите метод приближенного определения углерода в стали по структуре.

Основные термины и понятия, необходимые для освоения лабораторной работы

Аллотропная форма, видманитеттова структура, графит, зерно, изотерма, критическая точка, ледебурит, конода, мезоструктура, полиморфное превращение, перитектика, перекристаллизация, парамагнетик, парамагнетизм, правило фаз, правило отрезков, правило концентраций, правило фаз, равновесная структура, равновесное охлаждение, солидус, сольвус, сталь, структурная составляющая, твердый раствор внедрения, твердый раствор замещения, ферромагнетик, ферромагнетизм, химическое соединение, цементит первичный, цементит вторичный, цементит третичный, чугун, эвтектика, эвтектоид.

Основные теоретические положения

Металлический сплав получают сплавлением двух или более элементов. В технике широко применяют сплавы железа с углеродом, кремнием, марганцем, хромом, никелем и другими веществами.

Элементы – металлы и неметаллы, образующие сплав, – называются компонентами.

Свойства сплава зависят от многих факторов, но прежде всего они определяются составом фаз и их количественным соотношением.

Фаза – это однородная по химическому составу, строению, свойствам часть сплава, отделенная от других частей (фаз) поверхностью раздела, при переходе через которую химический состав или структура изменяется скачком.

Сплавы могут составлять следующие элементы структуры: механические смеси, твердые растворы и химические соединения.

Твердые растворы образуются в результате проникновения в кристаллическую решетку одного компонента атомов другого компонента. Твердые растворы бывают двух типов: твердые растворы замещения и твердые растворы внедрения.

При образовании химических соединений компоненты вступают в химическое взаимодействие. К химическим соединениям относят карбиды, оксиды, сульфиды и др.

Механические смеси представляют собой смесь двух фаз, когда отсутствует взаимодействие между компонентами, нет взаимного растворения, компоненты не вступают в химические реакции и их кристаллические решетки различны.

Процесс кристаллизации сплавов и связанные с ним закономерности строения сплавов изучают по диаграммам состояния. Диаграммы состояния – это графические изображения, показывающие в условиях равновесия фазовый состав и структуру сплавов в зависимости от температуры и химической концентрации компонентов.

При очень медленном охлаждении сплавов, начиная с температуры жидкого состояния, все фазовые превращения в них протекают равновесно благодаря тому, что процессы диффузии успевают изменять химический состав взаимодействующих фаз в строгом соответствии с диаграммой состояния. Такое охлаждение принято называть равновесным. Сплавы же после такого охлаждения, соответственно, находятся в равновесном состоянии и характеризуются равновесной структурой.

Технические металлы и сплавы обычно имеют поликристаллическую

зернистую структуру. Каждое зерно представляет собой кристалл микроскопических размеров, не имеющих той правильной геометрически внешней формы, которая ему присуща в соответствии с типом его кристаллической решетки.

Зерно, подобно сплавам, может быть однофазным, двухфазным и т.д. Если в пределах границ зерна химический состав однороден и кристаллическая решетка единая – такое зерно однофазно. Однофазные зерна имеют чистые металлы, ненасыщенные твердые растворы и химические соединения. У первых двух обычно высокая пластичность, а химические соединения отличаются высокой прочностью, твердостью и хрупкостью.

Зерна эвтектики и эвтектоидов, как минимум, двухфазны. Каждая фаза характеризуется своим химическим составом, своей кристаллической решеткой и присущими ей свойствами.

Особенности строения равновесной структуры, как зерен, так и любого сплава в целом, определяются спецификой типа диаграммы состояния, концентрирующей в себе чрезвычайно важную и богатую информацию. Каждая диаграмма состояния определяет и целесообразность технического применения сплавов, и их технологичность в литье, сварке, обработке резанием, и указывает возможное изменение структуры и свойств сплавов посредством соответствующей термической обработки.

Примером тому может служить диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов, объединяющая в себе важнейшие технические конструкционные материалы – стали и чугуны. Она позволяет определить равновесный фазовый состав железоуглеродистых сплавов в зависимости от содержания углерода и температуры.

Стали и чугуны имеют в своем составе кроме железа и углерода и другие элементы – примеси, которые практически мало влияют на диаграмму состояния, поэтому для понимания процессов происходящих при нагреве и охлаждении сталей и чугунов, используется двойная диаграмма состояния Fe-C (железо – углерод). Полностью (до 100 % углерода) диаграмма Fe-C не имеет практического применения, поэтому используется только часть диаграммы – до химического соединения Fe₃C (цементит) (рис. 5.1.)

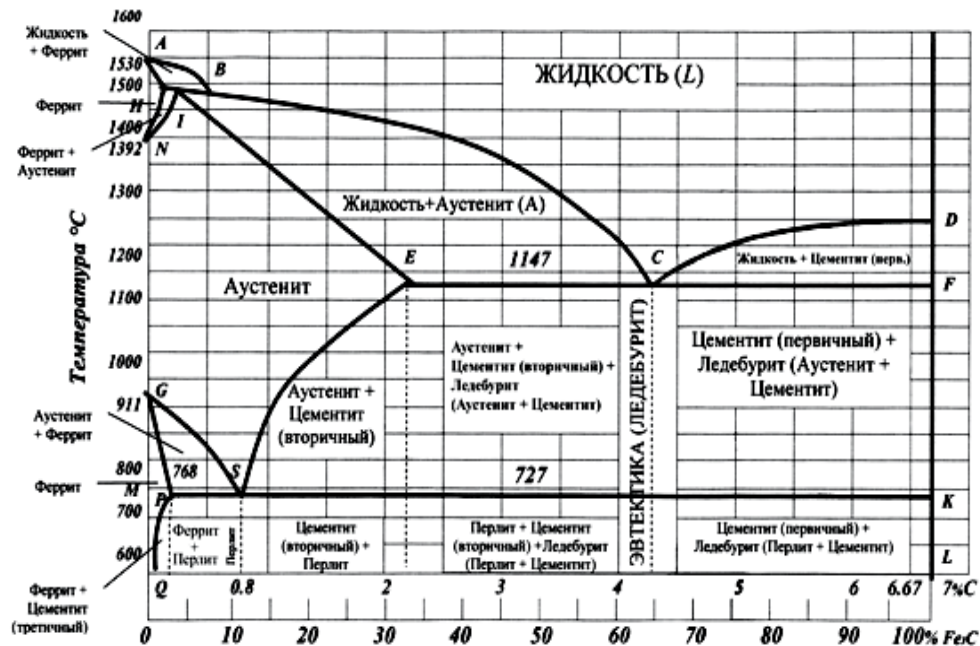


Рис. 5.1. Диаграмма состояния железо – углерод (Fe-C) или железо – цементит(Fe-Fe₃C)

Компоненты

Основными компонентами являются железо Fe и углерод C и оба являются полиморфными.

Железо – серебристо-светлый, мягкий металл с плотностью $\rho = 7,86 \text{ г/см}^3$. Технически чистое железо (0,1–0,2 % примесей) имеет следующие механические свойства:

Предел временного сопротивления		
При растяжении	σ_B , МПа	250–350
Предел текучести	σ_T , МПа	120–150
Относительное удлинение	δ , %	40–50
Относительное сужение	ψ , %	80–85
Твердость	<i>HV</i>	75–90

Чем чище железо, тем меньше прочностные показатели и выше показатели пластичности.

Железо плавится при температуре 1539 °С и имеет две модификации: Fe_a и Fe_γ. Fe_a существует при температурах до 911 °С и в интервале от 1392 до 1539 °С, имеет ОЦК решетку с периодом 0,286 нм (при температуре 20–25 °С). Важной особенностью Fe_a является его ферромагнетизм ниже температуры 768 °С, называемой точкой Кюри.

Модификация Fe_γ существует в интервале температур от 911 до 1392 °С, имеет ГЦК решетку, период которой при 911 °С равен 0,364 нм. ГЦК решетка более компактна, чем ОЦК решетка, и поэтому при переходе Fe_α в Fe_γ объем железа уменьшается приблизительно на 1 %. Fe_γ парамагнитно.

Углерод – неметаллический элемент ($T_{пл} = 3500$ °С). В свободном состоянии встречается в виде алмаза и графита.

В сплавах с железом встречается либо в виде графита (серый, ковкий и высокопрочный чугуны), либо в виде химического соединения с железом Fe_3C – цементита (стали и белые чугуны).

Структурные составляющие железоуглеродистых сплавов

Структуры могут быть однофазные, двухфазные и многофазные. К однофазным структурам относят феррит, аустенит, цементит.

Феррит – твердый раствор внедрения углерода в Fe_α . В низкотемпературной модификации Fe_α максимальная растворимость углерода равна 0,02 % при температуре 727 °С (т. Р), в высокотемпературной модификации Fe_α – 0,1 % при температуре 1499 °С (т. Н). При комнатной температуре в феррите содержится 0,01 % С. Характеризуется низкой прочностью ($\sigma_B = 250$ МПа) и твердостью 63–130 НВ, высокой пластичностью (относительное удлинение $\delta = 40$ %). На диаграмме состояния феррит занимает область GPQ. Образуется из аустенита (рис. 5.2).

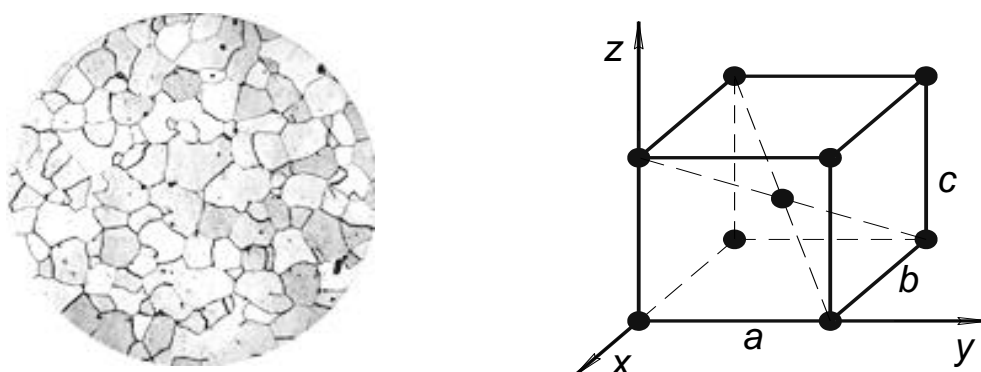


Рис. 5.2. Феррит

Аустенит – твердый раствор внедрения углерода в Fe_γ с ГЦК решеткой. Максимальная растворимость равна 2,14 % при температуре 1147 °С (т. E), что практически на два порядка выше, чем в феррите. Аустенит пластичен, но прочнее феррита (НВ 160–200). Аустенит

парамагнитен (рис. 5.3).

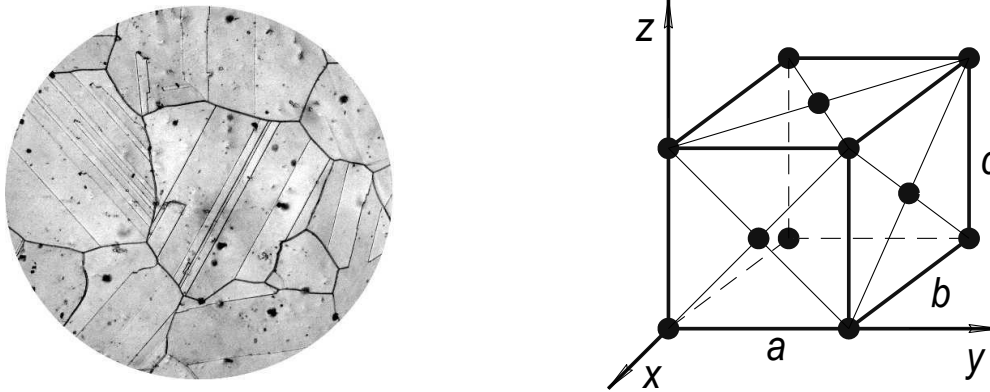


Рис. 5.3. Аустенит

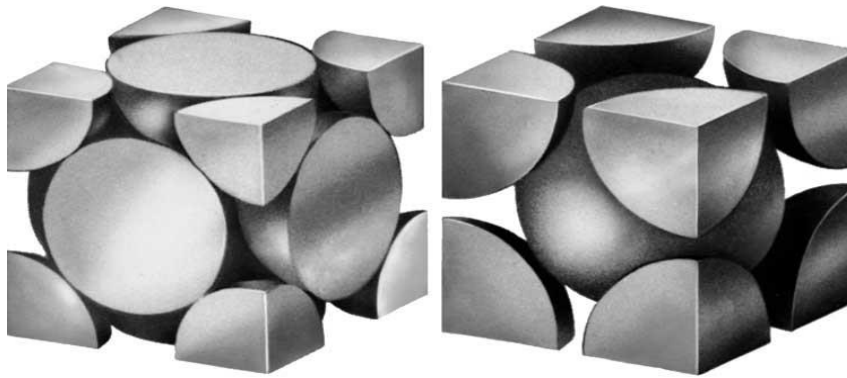


Рис. 5.4. Феррит и аустенит

Цементит – химическое соединение железа с углеродом. Стехиометрическая формула цементита – Fe_3C (карбид железа), содержит 6,67 % С. Цементит имеет сложную орторомбическую кристаллическую решётку (рис. 5.5), обладает высокой твердостью ($HB\ 800$) и большой хрупкостью. Чем больше цементита в сплавах, тем большей твердостью и меньшей пластичностью они обладают. По условиям образования различают: первичный цементит Ц_I (образуется при кристаллизации из жидкости в виде больших светлых кристаллов), вторичный цементит Ц_{II} (выделяется из аустенита в виде сетки по границам зерен), третичный цементит Ц_{III} (выделяется из графита в виде мелких зерен).

В зависимости от условий кристаллизации и последующей обработки цементит может иметь различную форму – равноосных зёрен, сетки по границам зёрен, пластин, а также видманштеттову структуру.

Цементит в разных количествах, в зависимости от концентрации,

присутствует в железоуглеродистых сплавах уже при малых содержаниях углерода. Формируется в процессе кристаллизации из расплава чугуна. Выделяется в сталях при охлаждении аустенита или при нагреве мартенсита. Цементит является фазовой и структурной составляющей железоуглеродистых сплавов, составной частью ледебурита, перлита, сорбита и троостита. Цементит – представитель так называемых фаз внедрения, соединений переходных металлов с легкими металлоидами. В фазах внедрения велики доля как ковалентной, так и металлической связи. Прочность 800 МПа.

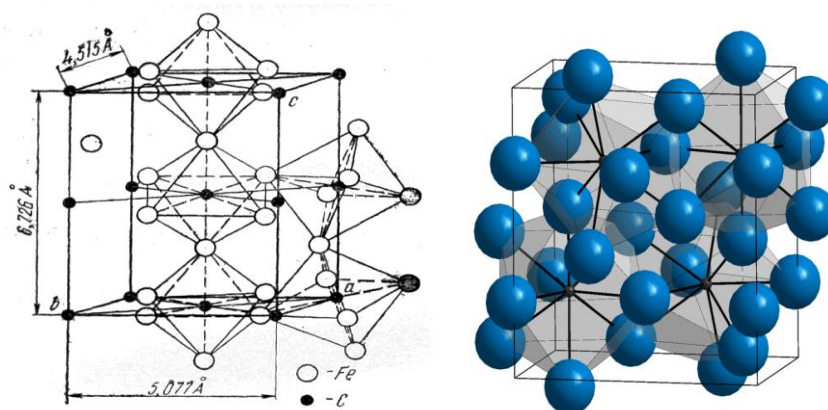


Рис. 5.5. Кристаллическое строение цементита

К двухфазным составляющим относят перлит и ледебурит.

Перлит – механическая смесь (эвтектоид) феррита и цементита (Ф + Ц). Существует ниже $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ и содержит 0,8 % С. Образуется в результате распада аустенита в процессе его охлаждения при температурах ниже $727\text{ }^{\circ}\text{C}$. Перлит в зависимости от формы частичек цементита бывает пластинчатым или зернистым, что определяет его механические свойства. Перлит чаще всего имеет пластинчатое строение и является прочной структурной составляющей ($\sigma_{\text{в}} = 800\text{--}900\text{ МПа}$, $\delta \leq 16\%$, $180\text{--}220\text{ НВ}$).

Ледебурит – механическая смесь (эвтектика) в области температур от 1147 до $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ состоит из аустенита и цементита (А + Ц), а ниже $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ состоит из перлита и цементита (П + Ц). Содержит 4,3 % С.

Критические точки сплавов

Критическая точка – температура, при которой в сплаве происходят фазовые превращения. Критические точки определяют по кривым охлаждения сплавов.

В зависимости от характера превращения критические точки имеют собственные имена: **ликвидус, солидус, сольвус** (табл. 5.1) и др.

Каждая точка диаграммы состояния характеризует строго определенный состав сплава при соответствующей температуре. Точка *A* (1539 °С) отвечает температуре плавления железа, точка *D* (≈ 1250 °С) – температуре плавления цементита, точки *N* (1392 °С) и *G* (910 °С) соответствуют полиморфному превращению $Fe\alpha \leftrightarrow Fe\gamma$.

Таблица 5.1

Виды критических точек сплавов

Название точки (обозначение)	Фазовое превращение при охлаждении (<i>нагревании</i>)	Примечания
Ликвидус	$L \leftrightarrow TV$ Начало выпадения твердой фазы в жидком расплаве (<i>конец расплавления твердой фазы</i>)	Для чистых компонентов и эвтектических сплавов точки ликвидус и солидус совпадают
Солидус	$L \leftrightarrow TV$ Конец выпадения твердой фазы в жидком расплаве (<i>начало расплавления твердой фазы</i>)	
Сольвус (точка вторичной кристаллизации)	$TV \leftrightarrow TV + TV_{II}$ Выпадение вторичной фазы в результате снижения растворимости компонентов сплава в твердом состоянии	Вторичная фаза представляет собой химическое соединение A_nB_m
Точка Кюри (точка магнитного превращения)	Приобретение ферромагнитных свойств твердым веществом	Не связано с перекристаллизацией Ni – 360 °С Fe – 768 °С Co – 1150 °С
Точка полиморфного превращения (точка перекристаллизации)	$TV_\alpha \leftrightarrow TV_\beta$ Переход высокотемпературной аллотропической формы в низкотемпературную (<i>переход низкотемпературной аллотропической формы в высокотемпературную</i>)	Для сплавов перекристаллизация проходит в интервале температур

Линия AB указывает температуру начала кристаллизации δ - феррита из жидкого сплава; линия BC – температуру начала кристаллизации аустенита; линия CD – температуру начала кристаллизации первичного цементита. При достижении температуры $1147\text{ }^{\circ}\text{C}$ ECF (эвтектики) состав жидкой фазы любого сплава, расположенного между точками E и F диаграммы, будет соответствовать точке C ($4,3\text{ \% C}$). При этой температуре оставшаяся часть жидкой фазы состава $4,3\text{ \%}$ углерода кристаллизуется с образованием эвтектики – механической смеси кристаллов аустенита и цементита, называемой ледебуритом.

Ниже линии GS происходит полиморфное превращение аустенита в феррит.

Линия SE является линией насыщения и показывает, как изменяется растворимость углерода Fe_{γ} с изменением температуры. Вследствие уменьшения растворимости углерода в Fe_{γ} при понижении температуры из пересыщенного аустенита будет выделяться вторичный цементит Ц_{II} .

Линия PSK $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ является линией эвтектоидного превращения. При этой температуре аустенит (A_s) состава точки S ($0,8\text{ \% C}$) распадается с образованием перлита (P_s): $A_s \rightarrow P_s \rightarrow (\Phi + \text{Ц})$.

Линия HJB характеризует *перитектическое* превращение, суть которого в том, что из жидкости концентрации т. B ($0,5\text{ \% C}$) и высоко-температурного феррита концентрации т. H ($0,1\text{ \% C}$) образуется одна фаза – аустенит концентрации т. J ($0,16\text{ \% C}$).

В сплавах с содержанием углерода менее $0,1\text{ \%}$ и более $0,5\text{ \%}$ перитектическое превращение не идет.

Линия ECF характеризует *эвтектическое* превращение, суть которого в том, что из жидкости концентрации т. C ($4,3\text{ \% C}$) кристаллизуется механическая смесь двух фаз – аустенита концентрации, т. E ($2,14\text{ \% C}$) и цементита: $J_c = A_E + \text{Ц}$.

Эвтектическая механическая смесь носит название «ледебурит» и имеет концентрацию т. C ($4,3\text{ \% C}$). Как и все превращения, эвтектическое идет при остановке температуры (т. 1–1) и заканчивается при кристаллизации всей жидкости.

Значения точек на диаграмме железо – цементит

Обозначение точки на диаграмме	Температура °С	Концентрация углерода %
<i>A</i> – температура плавления чистого железа	1539	0
<i>H</i> – предельная концентрация углерода в высокотемпературном феррите	1499	0.1
<i>N</i> – температура аллотропического превращения железа	1392	0
<i>D</i> – температура плавления цементита	1600	6.67
<i>E</i> – наибольшая концентрация углерода в аустените	1147	2.14
<i>C</i> – точка эвтектики	1147	4.3
<i>G</i> – температура аллотропического превращения железа	911	0
<i>P</i> – предельная концентрация углерода в низкотемпературном феррите	727	0.02
<i>S</i> – эвтектоидная точка	727	0.8

Изменение структуры в зависимости от содержания углерода

Увеличение содержания углерода вследствие его незначительной растворимости в феррите вызывает появление второй фазы – цементита третичного. При содержании углерода до 0,025 % структурно свободный цементит выделяется, главным образом, по границам зерен феррита. Это существенно понижает пластичность и вязкость стали, особенно, если цементит располагается цепочками или образует сетку вокруг зерен феррита.

При увеличении содержания углерода выше 0,025 % в структуре стали образуется перлит; одновременно еще до 0,10–0,15 % С в стали появляются включения структурно свободного (третичного) цементита. С дальнейшим повышением содержания углерода третичный цементит входит в состав перлита.

По структуре стали делятся на доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные.

Доэвтектоидные стали содержат более 0,02 %, но менее 0,8 % углерода. Структура доэвтектоидных сталей состоит из феррита и перлита

(выделением из феррита избыточного третичного цементита пренебрегаем). С увеличением содержания углерода количество феррита в доэвтектоидных сталях уменьшается, а перлита – увеличивается (рис. 5.6).

При содержании в стали 0,8 % углерода количество перлита равно 100 %.

На рис. 5.6 показана структура доэвтектоидной стали с различным содержанием углерода. Отчетливо видно, что содержание перлита (темная составляющая) увеличивается с повышением содержания углерода.

Структура эвтектоидной стали (0,8 % С) состоит из одного перлита, всё поле заполнено перлитом. Структура заэвтектоидных сталей при комнатной температуре состоит из перлита и вторичного цементита, причем цементит может располагаться в виде сетки, зёрен или игл. В структуре заэвтектоидных сталей вместо обычного перлита может быть зернистый перлит, который получают после специальной термообработки.

Максимальное количество структурно свободного цементита (~ 20 %) будет в сплаве с содержанием углерода 2,14 %.

Чугуны

К чугунам относят сплавы, содержащие более 2,14 % С. Они могут быть доэвтектическими и заэвтектическими, а разделяет их эвтектический чугун (4,31 % С). Структура доэвтектического чугуна – перлит, вторичный цементит и ледебурит, заэвтектического – первичный цементит с ледебуритом. Чугуны с такой структурой называют белыми. Они тверды, хрупки и очень трудно обрабатываются резанием. Поэтому производятся для последующей переделки.

В технике чугуны применяют широко, прежде всего, за их превосходные литейные свойства. Цементит легко диссоциирует с образованием графита. Присутствие в структуре графита делает чугун серым и, что крайне важно, технологичным при обработке резанием. Графит может быть пластичным, хлопьевидным и глобулярным. В определении прочностных свойств серого чугуна форма графитных включений и их размеры играют решающее значение. Так, пластинчатый графит, образуя надрезы в металлической основе, резко снижает прочность и пластичность. Только поэтому получаемый литьем обычный серый чугун с пластинчатым графитом очень хрупок.

Ковкий чугун, получаемый длительным отжигом отливок из белого чугуна, имеет хлопьевидный графит, обеспечивающий ему достаточно высокую пластичность (табл. 5.3).

В результате модифицирования удается получить отливки чугуна

с глобулярным графитом. Такой чугун называют высокопрочным. Он соединяет в себе присущую чугунам технологичность в литье и обработке резанием с прочностными свойствами стали, заменяя успешно стальные отливки, поковки и цветные сплавы.

Таблица 5.3

Марки и механические свойства некоторых чугунов

Марка чугуна	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0.2}$, кгс/мм ²	σ , %	$\sigma_{изг}$, кгс/мм ²	Стрела прогиба, мм	a_n , кгм/см ²	НВ
СЧ 12-28	12	–	–	28	2	–	143–229
СЧ 44-64	44	–	–	64	3	–	229–289
КЧ 37-12	37	–	12	–	–	–	163
КЧ 63-2	63	–	2	–	–	–	269
ВЧ 33-17	38	24	17	–	–	6	140–170
ВЧ 120-4	120	90	4	–	–	3	302–369

Механические свойства серого чугуна зависят от свойств металлической основы и ее количества, формы и размеров графитных включений (пустот).

Графит способствует измельчению стружки при обработке резанием и оказывает смазывающее действие, что повышает износостойкость чугуна.

Ферритные серые чугуны марки Сч10, Сч15 используются для слабо- и средненагруженных деталей: крышки, фланцы, маховики, суппорты, тормозные барабаны, диски сцепления и т.д.

Ферритно-перлитные серые чугуны марки Сч20, Сч25 применяются для деталей, работающих при повышенных статистических и динамических нагрузках: картеры двигателя, поршни цилиндров, барабаны сцепления, станины станков и другие отливки разного назначения.

Перлитный чугун применяют для отливки станин мощных станков и механизмов. Часто используют перлитные серые модифицированные чугуны. Такие чугуны получают при добавлении в жидкий чугун перед разливкой специальных добавок – ферросилиция (0,3–0,6 % от массы шихты). К таким чугунам относятся СЧ40 и СЧ45, которые обладают более высокими механическими свойствами из-за измельчения формы графитных включений. Эти марки чугунов применяются для корпусов насосов, компрессоров и гидроприводов.

Для деталей, работающих при повышенных температурах, применяют легированные серые чугуны, которые дополнительно содержат хром, никель, молибден и алюминий.

Механические свойства серых чугунов

Чугун		НВ	Структура металлической основы
Сч15	150	163–229	Феррит
Сч25	250	180–250	Феррит + перлит
Сч40	400	207–285	Перлит
Сч45	450	229–289	Перлит

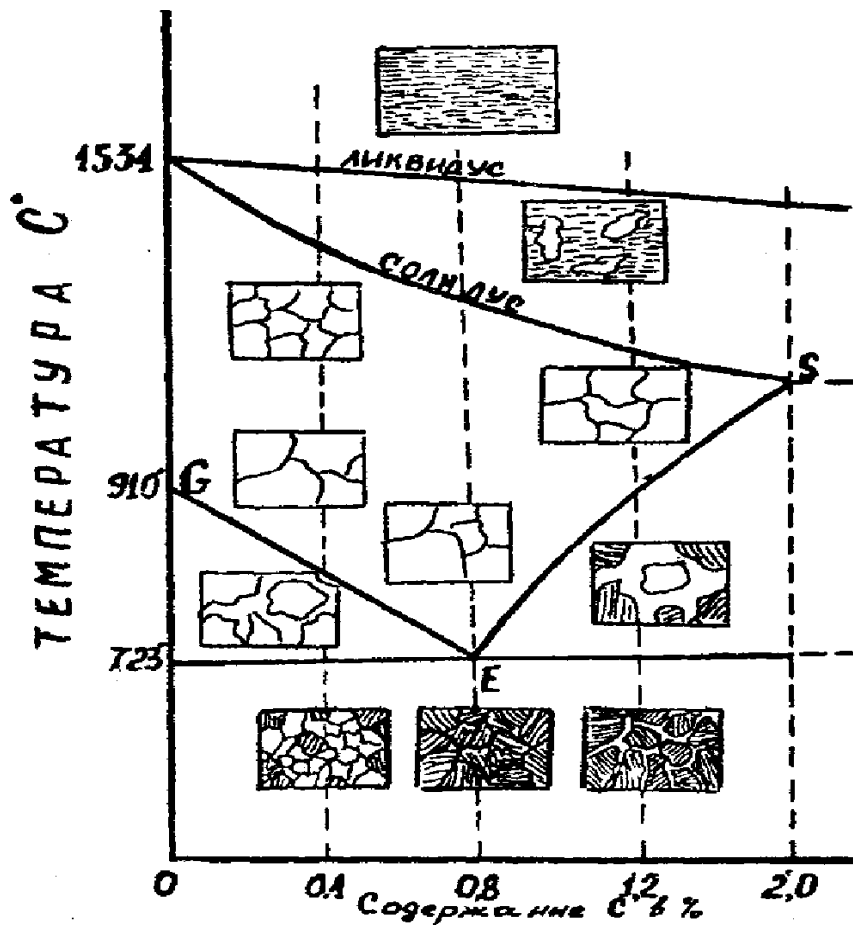


Рис. 5.6. Равновесная диаграмма

Последовательность образования равновесной структуры

На примере сплава, содержащего 0,5 % С, рассмотрим последовательность протекания фазовых превращений, образующих в конечном счете равновесную структуру, предполагая его охлаждение с температур жидкого состояния равновесным. Схема кривой охлаждения показана на рис. 5.7. Итак, до температуры 1 следует простое охлаждение жидкого сплава. От точки 1, лежащей на линии ликвидуса, начинается образование

кристаллов аустенита. Их количество растет и при температуре в точке 2 процесс кристаллизации заканчивается. Далее последует простое охлаждение зерен аустенита.

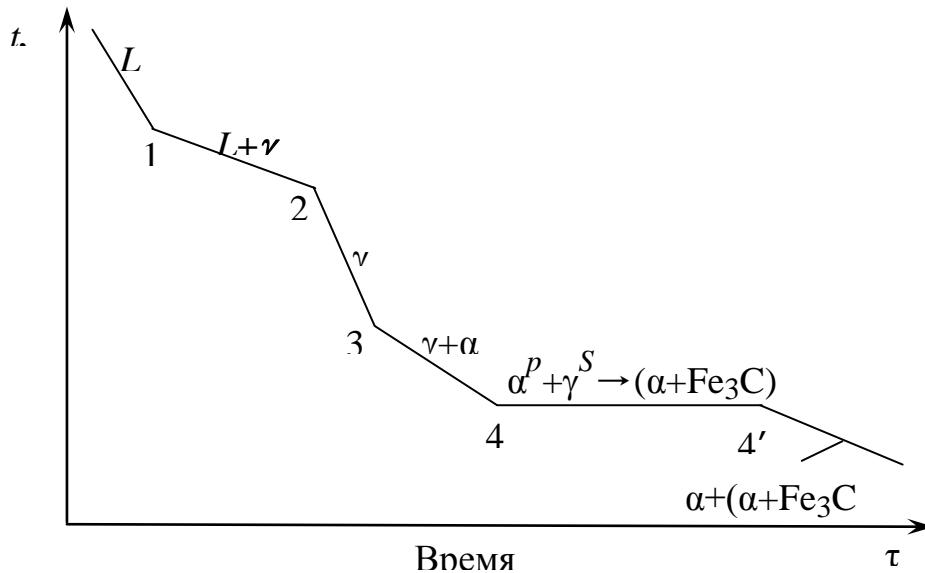
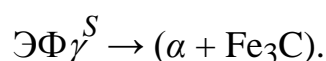


Рис. 5.7. Схема кривой охлаждения сплава (0,5% C) и образования его равновесной ферритно-перлитной структуры

По достижении температуры точки 3 (рис. 5.7) посредством перестройки ГЦК решетки в ОЦК решетку аустенит начинает превращаться в феррит. Это происходит практически одновременно в каждом зерне аустенита. Причем, концентрация углерода в образующемся феррите, в соответствии с его природой, определяется кривой PG диаграммы состояния. Поскольку в интервале температур 3–4 в аустените появляется и количественно растет ферритная составляющая с явно меньшим содержанием растворенного углерода, чем в анализируемом сплаве, концентрация углерода в убывающем количественно аустените увеличивается. Ее изменения описываются кривой GS диаграммы.

В итоге, при температуре точки 4 в пределах границ каждого первичного зерна аустенита в равновесии окажутся феррит состава точки P и остаток аустенита состава точки S.

Последующий отвод тепла нарушит устойчивость остатка аустенита и он претерпит диффузионное эвтектоидное превращение в перлит по схеме:



Процесс совершается с выделением тепловой энергии и поэтому протекает на отрезке изотермы 4–4'. Охлаждение ниже точки 4' практически не изменит образовавшейся структуры. Она состоит из феррита и перлита.

Подобная структура типична для любого доэвтектоидного сплава. Причем по мере увеличения концентрации углерода монотонно растет количество перлитной составляющей и убывает количество ферритной составляющей. При содержании углерода, равном 0,8 %, сплав имеет чисто перлитную структуру (рис. 5.8, в).

В заэвтектоидных сплавах их равновесное охлаждение ниже сольвуса ES сопровождается образованием вторичного цементита, образующего оболочку вокруг первичного аустенитного зерна. Затем аустенит превращается в перлит. Поэтому любой заэвтектоидный сплав со структурой из зерен перлита, окаймленных оболочкой вторичного цементита (рис. 5.8, г).

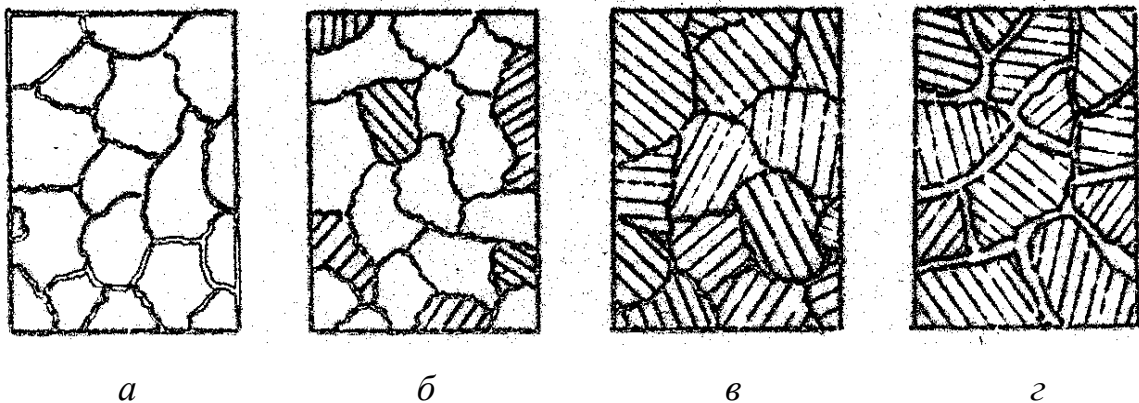


Рис. 5.8. Схемы структур чистого железа (а), доэвтектоидной (б), эвтектоидной (в) и заэвтектоидной (г) стали

К технически чистому железу относят сплавы, содержащие не более 0,02 % С. Под микроскопом структура технически чистого железа (рис. 5.8, а) состоит из однородных зерен феррита и возможно с отдельными частицами третичного цементита по их границам.

Постоянные примеси в углеродистой стали

Примесные элементы содержатся в стали всегда. Одни из них (фосфор, сера, кислород, азот и водород) попадают в сталь из пихтовых материалов, топлива, огнеупоров, газов и присутствуют там в малом количестве, поскольку избавиться от них окончательно не удастся. Другие (марганец, кремний) вводятся преднамеренно в процессе варки стали, как раскислители.

Фосфор попадает из руд. Он, растворяясь в железе в количестве до 0,1 %, резко ухудшает пластичность стали, вызывая хладноломкость, поскольку образует с железом очень хрупкий фосфид – Fe_3P . Даже при содержании всего 0,05 % в виду склонности ликвировать, образует участки высокой концентрации P, которые опасно охрупчивают сталь. При варке стали, фосфор стремятся возможно полнее отшлаковать известью, что осуществимо лишь при основной футеровке сталеплавильных печей.

Сера переходит в металл из минеральной составляющей топлива. Она почти не растворима в железе и образует с ним хрупкое химическое соединение – сульфид железа. Его частицы придают стали хладноломкость. Сульфид железа с железом способны образовать хрупкую и легкоплавкую сульфидную эвтектику ($\text{FeS} + \text{Fe}$) с точкой плавления 988 °С. В присутствии кислорода эвтектика становится еще более легкоплавкой. При температурах горячей обработки давлением эта эвтектика, располагающаяся по границам зерен, плавится, нарушая сплошность металла, вызывая появление трещин, что называют красноломкостью.

Серу отшлаковывают с помощью марганца. Его вводят в сталь перед разливкой в количестве, в пять раз большем предполагаемого содержания серы. По реакции замещения ($\text{FeS} + \text{Mn} = \text{Fe} + \text{MnS}$) марганец восстанавливает железо и образует сульфид марганца с точкой плавления 1610 °С. Его частички, обладая малым удельным весом, легко переходят в шлак. Избыток марганца при этом остается в стали в качестве постоянной примеси.

Кислород, азот и водород могут содержаться в стали в сравнительно малом количестве. Находясь в твердой стали, все они могут быть растворенными в феррите, присутствовать в виде частиц окислов, нитридов и гидридов или в свободном состоянии, заполняя микронесплошности. Все это сильно охрупчивает сталь.

От кислорода избавляются раскислением стали перед разливкой ее в изложницу кремнием, который образует при этом легко переходящую в шлак окись кремния – SiO_2 . А избыток кремния остается в стали, как постоянная примесь.

Содержание серы и фосфора, как вредных примесей, ухудшающих качество стали, ГОСТ оговаривает:

- а) в стали обыкновенного качества $S \leq 0,05 \%$, $P \leq 0,05 \%$;
- б) в качественной стали $S \leq 0,04 \%$, $P \leq 0,04 \%$;
- в) в высококачественной стали $S \leq 0,03 \%$, $P \leq 0,025 \%$.

Конструкционные стали

В производстве машин, станков и предметов широкого потребления в энергетике, на транспорте и в строительной индустрии широко используется горячий стальной прокат в виде прутков, полос, труб, уголков и других фасонных профилей.

Стали маркируются сочетанием букв Ст и цифрой (от 0 до 6), показывающей номер марки, а не среднее содержание углерода в ней, хотя с повышением номера содержание углерода в стали увеличивается. Стали групп Б и В имеют перед маркой буквы Б и В, указывающие на их принадлежность к этим группам. Группа А в обозначении марки стали не указывается. Степень раскисления обозначается добавлением индексов: в спокойных сталях – сп, в полуспокойных – пс, кипящих – кп, а категория нормируемых свойств (кроме категории 1) указывается последующей цифрой. В их составе разное содержание кремния: спокойные – 0,12–0,30, полуспокойные – 0,05–0,17, кипящие меньше 0,07, например Ст3сп, БСт3пс или ВСт3сп5 (в конце 5-я категория). Спокойными и полуспокойными производят стали Ст1–Ст6, кипящими – Ст1–Ст4 всех трех групп. Сталь Ст0 по степени раскисления не разделяют.

Стали группы А поставляются с гарантированными механическими свойствами (табл. 5.4), без указания химического состава.

Таблица 5.4

Механические свойства углеродистых сталей обыкновенного качества группы А (образцы толщиной до 20 мм)

Сталь	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	σ , %	Сталь	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	σ , %
		Не менее				Не менее	
Ст.0	>310	–	23	Ст.4	420–540	240–270	24
Ст.1	320–420	–	34	Ст.5	500–640	260–290	20
Ст.2	340–440	200–230	32	Ст.6	600	320	13
Ст.3	380–490	210–250	27				

Из табл. 5.4 следует, что с увеличением номера марки прочность увеличивается, а пластичность стали соответственно уменьшается.

Стали группы Б поставляют с гарантированным химическим составом, но механические свойства не гарантируются. Стали этой группы применяют для изделий, изготавливаемых с применением горячей обработки (ковка, сварка и в отдельных случаях термическая обработка), при которой исходная структура и механические свойства не сохраняются. Для таких сталей важны сведения о химическом составе, необходимые для определения режима горячей обработки.

Стали группы В поставляются с гарантированными механическими свойствами и химическим составом. Стали группы В дороже, чем стали групп А и Б, их применяют для ответственных деталей (для производства сварных конструкций).

Углеродистые стали обыкновенного качества (всех трех групп) предназначены для изготовления различных металлоконструкций, а также слабонагруженных деталей машин и приборов.

В машиностроении применяют углеродистые качественные стали (табл. 5.5). Маркируются эти стали двузначными цифрами 05, 08, 20, 75 обозначающими среднее содержание углерода в сотых долях процента.

Таблица 5.5

Химический состав и механические свойства
углеродистых качественных сталей

Марка стали	Содержание углерода, %	Хром, не более	Механические свойства, не менее					НВ после отжига или высокого отпуска, не более
			σ_B , Мпа	σ_T , Мпа	δ , %	Ψ , %	KCU^{+20} МДж/м ²	
08	0,05–0,01	0,10	330	200	33	60	–	131
10	0,07–0,14	0,15	340	210	31	55	–	143
15	0,12–0,19	0,25	380	230	27	55	–	149
20	0,17–0,24	0,25	420	250	25	55	–	163
30	0,27–0,35	0,25	500	300	21	50	0,8	179
40	0,37–0,45	0,25	580	340	19	45	0,6	217
50	0,47–0,55	0,25	640	380	14	40	0,4	241
60	0,57–0,65	0,25	690	410	12	35	–	255
70	0,67–0,75	0,25	730	430	9	30	–	269

Практическая часть

Порядок выполнения анализа диаграммы состояния «железо–цементит».

1. Вычертите диаграмму состояния Fe-Fe₃C с указанием температур превращений и концентраций углерода для характерных точек.

2. Укажите фазы и структурные составляющие в различных областях диаграммы.

3. Определите составы и весовое количество (%) фаз и структурных составляющих при температурах для варианта, указанного преподавателем. При выполнении расчётных задач в перитектической области диаграммы используйте данные по фрагменту этой диаграммы, представленные на рис. 5.9.

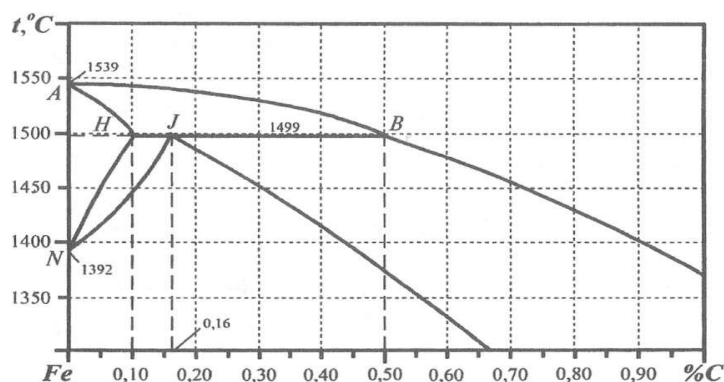


Рис. 5.9. Фрагмент диаграммы «железо-углерод»

Пример расчёта количества структурных составляющих и фаз

В качестве примера рассмотрим расчёт весового количества структурных составляющих и фаз с помощью правила отрезков в заэвтектоидной стали с 1,5 % углерода при 600 °C (рис. 5.10).

Содержания структурных составляющих определяются последовательно по мере их образования в процессе охлаждения сплава с применением правила отрезков для двух сосуществующих фаз или структурных составляющих по коноде *abcбdef*. Величину отрезков будем измерять в процентах углерода. Считаем, что концентрация в точке *a* 0,01 % углерода.

Определим фазовый состав в точке *б*:

$$\Phi \frac{6f}{af} \cdot 100\% = \frac{6,67 - 1,5}{6,67 - 0,01} \cdot 100\% = 77,6\%$$

$$\Pi = \frac{a6}{af} \cdot 100\% = 77,6\% = 22,4\%$$

Количество структурных составляющих в точке б:

$$\Pi_{II} = \frac{c6}{cf} \cdot 100\% = \frac{1,5 - 0,8}{6,67 - 0,8} \cdot 100\% = 11,9\%$$

$$\Pi = \frac{6f}{cf} \cdot 100\% = \frac{6,67 - 1,5}{6,67 - 0,8} \cdot 100\% = 88,1\%$$

Учитывая некоторые особенности в использовании коноды для области диаграммы, где находятся три структурные составляющие, рассмотрим расчёт для такого случая на примере точки 7 (содержание углерода 4 % при температуре 600 °С):

$$\Pi = \frac{d7}{de} \cdot 100\% = \frac{4,0 - 2,14}{4,3 - 2,14} \cdot 100\% = 86,11\%$$

$$\Pi_{II} = \frac{cd}{cf} \cdot \frac{7e}{de} \cdot 100\% = \frac{2,14 - 0,8}{6,67 - 0,8} \cdot \frac{4,3 - 4,0}{4,3 - 2,14} \cdot 100\% = 3,17\%$$

$$\Pi = \frac{df}{cf} \cdot \frac{7e}{de} \cdot 100\% = \frac{6,67 - 2,14}{6,67 - 0,8} \cdot \frac{4,3 - 4,0}{4,3 - 2,14} \cdot 100\% = 10,72\%$$

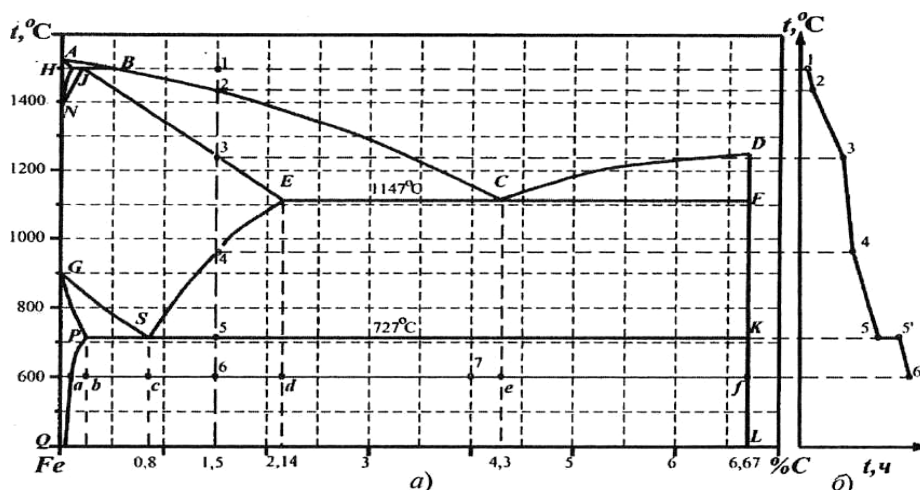


Рис. 5.10. Схема для изучения превращений, происходящих в стали с содержанием углерода 1,5 % при медленном охлаждении: а – диаграмма состояния; б – кривая кристаллизации сплава

Примерный перечень вариантов индивидуальных заданий

Номер варианта	Содержание углерода, %	Температура, °С	Номер варианта	Содержание углерода, %	Температура, °С
1	0,05	820	13	1,6	900
		700			600
2	0,12	1480	14	2,3	1200
		650			800
3	0,16	1520	15	2,5	1300
		600			600
4	0,20	1470	16	2,8	1250
		650			800
5	0,35	1520	17	3,0	1200
		700			1000
6	0,40	750	18	3,5	1200
		600			600
7	0,50	1470	19	3,8	1170
		650			850
8	0,60	750	20	4,2	1150
		600			800
9	0,80	1450	21	4,5	1150
		650			700
10	1,0	1400	22	5,0	1200
		600			1000
11	1,2	760	23	5,5	1300
		700			600
12	1,4	800	24	6,0	1400
		650			800

Контрольные задания

1. Зарисуйте и опишите структуру стали марки У12 (1,2 % С). Определите количественное соотношение и состав фаз при нормальной температуре.

2. Структура стали состоит из 30 % перлита, остальное – феррит. Зарисуйте микроструктуру стали. Определите содержание углерода в ней.

3. Зарисуйте и опишите мезоструктуру технического железа с содержанием 0,01 % С. Определите количественное соотношение и состав фаз при нормальной температуре.

4. Зарисуйте и опишите мезоструктуру стали с содержанием углерода 0,02 %. Определите количественное соотношение и состав фаз при температуре 727 °С.

1. Структура стали состоит из 70 % перлита, остальное – феррит.

Зарисуйте структуру стали, определите содержание углерода в ней.

5. Структура стали состоит из одного перлита. Зарисуйте микроструктуру стали. Определите количество цементита.

6. Сталь марки У10 (1,0 % С) медленно охлаждалась с температуры на 50 °С выше линии SE диаграммы Fe-Fe₃C. Зарисуйте и опишите микроструктуру стали. Определите количество цементита в стали при комнатной температуре.

7. Зарисуйте и опишите структуру стали марки 70 (0,7 % С). Определите количество перлита, феррита и цементита в стали.

8. Структура стали состоит из 90 % перлита, остальное – вторичный цементит. Зарисуйте указанную структуру, определите содержание углерода в стали.

9. Структура заэвтектоидной стали марки У13 (1,3 % С) состоит из перлита и вторичного цементита. Зарисуйте указанную структуру. Определите количество цементита в ней.

10. В структуре стали содержится 12 % цементита. Определите содержание углерода, зарисуйте структуру стали.

11. В структуре стали содержится 5,25 % цементита. Определите содержание углерода, зарисуйте структуру стали.

Контрольные вопросы

1. Какие зерна имеют металлические сплавы?
2. Что такое диаграмма состояния железо-углерод и где она используется?
3. Общая характеристика диаграммы состояния Fe-C сплавов.
4. До каких концентраций углерода распространяется каждая группа?
5. Что такое температурный гистерезис сплавов Fe-C?
6. Какие структурные составляющие образуются в сталях?
7. Чем чугун отличается от сталей по микроструктуре?

Вопросы для повторения

1. Что такое феррит, аустенит, цементит, перлит?
2. Сколько углерода может раствориться в феррите?
3. В структуре каких сталей присутствует вторичный цементит?
4. При каких условиях вторичный цементит в заэвтектоидных сталях образует сплошную прослойку (сетку) по границам зерен перлита, и как это отражается на свойствах стали?

5. Какие структурные составляющие содержатся в структуре железоуглеродистых сплавов с содержанием углерода до 0,02 %?

6. Как изменяется структура доэвтектоидных сталей с увеличением содержания углерода?

7. Как по количеству перлита определить приближенно содержание углерода в стали?

8. Как и почему изменяются свойства углеродистых сталей в равновесном состоянии с увеличением содержания углерода?

Лабораторная работа № 6

ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ

Цель работы

Изучение методики определения основных механических характеристик металлических материалов.

Рабочее задание

Измерьте ударную вязкость металла при испытании не менее 4-х стандартных образцов на маятниковом копре.

Оборудование и материалы

Виртуальный лабораторный комплекс, маятниковый копёр МК-30А.

Порядок выполнения работы

1. Разрушение образцов осуществляется на маятниковом копре (рис. 4). Один из испытуемых образцов, предварительно его замерив, установите на опоры (10) надрезом в противоположную сторону от ножа маятника.

2. При каждом испытании стрелку шкалы (13) устанавливайте в положение шкалы 0 (другая стрелка будет автоматически соответствовать уровню подъема маятника с грузом).

3. Освобождение маятника производится с помощью рукоятки защелки (14). Маятник, пройдя нижнее положение и разрушив образец, поворачивает стрелку шкалы на угол, который соответствует энергии, сохранившейся в маятнике после разрушения образца.

Работа, затраченная на разрушение образца, будет равна разности энергии маятника до удара и после удара.

Основные термины и понятия, необходимые для освоения лабораторной работы

Галтели, динамическое испытание, концентратор, канавка, маятниковый копер, работа удара, статическое испытание, ударная вязкость, усталостная трещина.

Теоретические основы испытания материалов на ударную вязкость

Для оценки свойств материала при динамических нагрузках недостаточно механических характеристик, определяемых при статических испытаниях. При больших скоростях нагружения, например, при ударе, увеличивается опасность хрупкого разрушения. Эта опасность особенно возрастает при наличии в детали различного рода надрезов (отверстия, галтели, канавки и пр.), которые вызывают концентрацию напряжений (неравномерное распределение напряжений). Надрез позволяет сосредоточить всю деформацию, поглощающую удар, в одном месте. Кроме того, наличие надреза ставит материал в более тяжёлые условия работы, поскольку надрез значительно ослабляет сечение и вызывает повышение напряжений от изгиба.

В настоящее время применяют испытания на ударный изгиб образцов с концентраторами. Образцы устанавливаются на двух опорах и подвергаются воздействию ударной нагрузки падающего маятника. Разрушение происходит в плоскости надреза, и поэтому форма надреза и его размеры влияют на склонность материала к хрупкому разрушению.

Тип Т соответствует концентратору, содержащему усталостную трещину, которую получают в вершине начального надреза при циклическом изгибе образца в одной плоскости.

Работа удара

Работу удара обозначают буквами (KU, KV или KT) и цифрами. Первая буква (K) – обозначает символ работы удара; вторая буква (U, V или T) – вид концентратора. Последующие цифры обозначают максимальную энергию удара маятника, глубину концентратора и ширину образца. Например: KCT + 100 150/3/7,5 – ударная вязкость, определённая на образце с концентратором вида Т, при температуре плюс 100 °С, максимальная энергия удара маятника 150 Дж, глубина концентратора 3 мм, ширина образца 7,5 мм.

Образцы с концентраторами представлены на рис. 6.1.

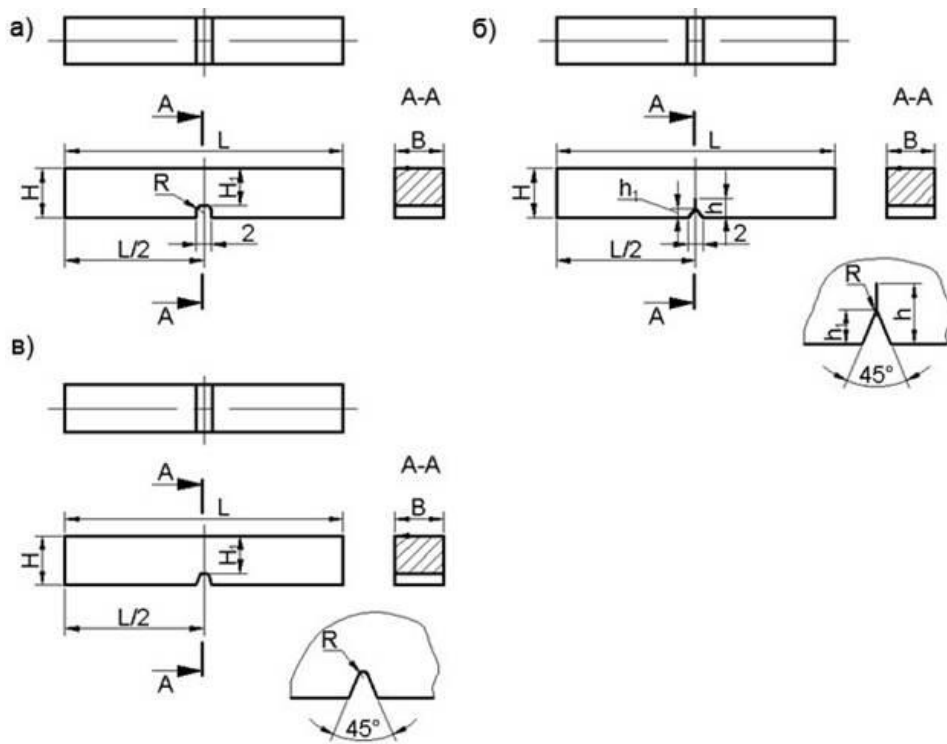


Рис. 6.1. Образцы с концентраторами: а) концентратор вида U; б) концентратор вида T (усталостная трещина); в) концентратор вида V

Маятниковый копер МК-30А

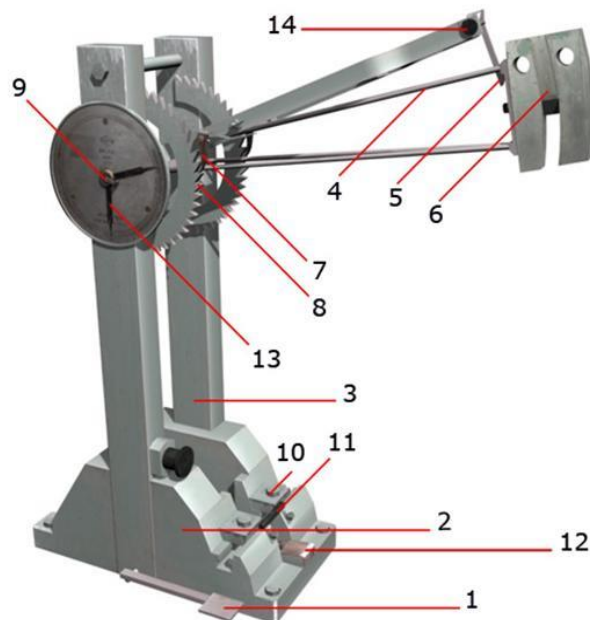


Рис. 6.2. Маятниковый копер МК-30А

Маятниковый копер (рис.6.2) состоит из чугунной станины в

виде массивной плиты (2) с двумя вертикальными колоннами (3). В верхней части колонн на горизонтальной оси подвешен укрепленный в шарикоподшипниках маятник с грузом в виде стального плоского диска с вырезом (5), в котором закреплен стальной закаленный нож, служащий бойком при испытании. Внизу на уровне вертикально висящего маятника к колоннам станины прикреплены две стальные закаленные опоры (10), на которые помещают испытываемый образец (11). Под опорами между колоннами проходит тормозной ремень (12), который, прижимаясь к маятнику, качающемуся после удара, вызывает его торможение. Тормозной ремень приводится в действие при помощи педали (1).

Перед испытанием маятник поднимают на исходную высоту и удерживают его в этом положении защелкой (6). В копре МК-30А эта высота зависит от того, в каком положении установлена защелка подъемной рамы (7) в храповике.

При испытании образца маятник освобождается от защелки (6), падая, ударяет образец, разрушает его и взлетает на некоторый угол, которым и определяется работа, затраченная на разрушение образца. В копре на оси маятника жестко закреплен поводок (9). При прямом и обратном движении маятника поводок увлекает за собой соответственно одну или другую стрелку шкалы (13) и оставляет их в положении, фиксирующем нож, служащий бойком при испытании (рис. 5). При записи значения максимальной энергии удара маятника в джоулях следует округлять соответственно до 5; 10; 50; 100; 150 и 300 Дж.

Максимальная энергия удара маятника должна быть такой, чтобы значение работы удара составляло не менее 10 % от максимальной энергии удара применяемого маятника.

Ударная вязкость

Ударной вязкостью (KC) называется отношение работы (K), необходимой для разрушения образца, к площади поперечного сечения A_0 в месте надреза. Ударную вязкость (KC) в Дж/м² (кгс·м/см²) оценивают по формуле:

$$KC = K / S_0,$$

где K – работа разрушения образца, Дж (кгс·м²).

Работу разрушения образца определяют на маятниковом копре и рассчитывают по формуле:

$$KC = P(h_1 - h_2),$$

где P – вес груза маятника, h_1, h_2 – высоты подъема груза до и после разрушения образца.

$$S_0 = B(H - h),$$

где S_0 – начальная площадь поперечного сечения образца в месте концентратора, $\text{м}^2(\text{см}^2)$; H – начальная высота рабочей части образца, $\text{м}(\text{см})$; B – начальная ширина образца, $\text{м}(\text{см})$; h – глубина концентратора. H и B измеряют с абсолютной погрешностью не более $\pm 0,05$ мм.

$$1 \text{ кгм} = 9,80665 \text{ Дж.}$$

Виртуальный лабораторный комплекс Активные клавиши

Для работы в этой лабораторной работе применяются следующие клавиши:

W, S, A, D – для перемещения в пространстве;

F2, E – аналоги средней клавиши манипулятора, при первом нажатии берется объект, при последующем – ставится;

F10 – выход из программы.

Левая клавиша мыши – при нажатии и удерживании обрабатывается (поворачивается, переключается) тот или иной объект.

Средняя клавиша – при первом нажатии (прокрутка не используется) берется объект, при последующем – ставится.

Правая клавиша – появляется курсор-указатель (при повторном нажатии исчезает).

Обработка результатов, их обобщение и выводы

Полученные результаты следует обрабатывать следующим образом:

1. Зарисовать исследуемые образцы до и после механических испытаний, показывая изменение соответствующих параметров надлежащими формулами.

2. Заполнить протокол испытаний на ударный изгиб, в котором отразить параметры: марка копра, максимальная энергия удара маятника при испытании, скорость маятника в момент удара, испытываемый материал.

3. Заполнить табл. 6.1.

Результаты испытания материалов

№	Материал образца	Тип образца	Температура испытания, °С	Ширина образца, B	Высота образца, H	Глубина концентратора, h	Площадь поперечного сечения S_0 , см ²	Работа удара K , Дж	Ударная вязкость KC , Дж/см ²
				см					
	Ст.3	U	20						

Контрольные вопросы

1. Что такое работа удара?
2. Что такое ударная вязкость?
3. Чем вызвана необходимость проведения испытаний на ударный изгиб?
4. Какую роль играет надрез в образцах при испытаниях на ударный изгиб?
5. Какие виды надрезов в образцах предусматривает ГОСТ?
6. Приведите пример обозначения работы удара.
7. Как обозначается ударная вязкость?
8. В каких случаях не указываются цифры в обозначении ударной вязкости?

Лабораторная работа № 7

ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА СЖАТИЕ

Цель работы

Определение основных механических характеристик различных материалов.

Рабочее задание

1. Определить ударную вязкость материала при сжатии
2. Определить предел прочности.

Оборудование и материалы

Виртуальный лабораторный комплекс, пресс гидравлический (ПСУ-10).

Порядок выполнения работы

Последовательность действий следующая:

1. Взять образец со стола.
2. Установить образец между плитами.
3. При помощи тумблера сети (рис. 7.1) включить пресс в сеть (загорится лампочка «СЕТЬ» на пульте управления прессом).



Рис. 7.1. Тумблер включения сети

4. Установите режим работы на пульте управления «НАГРУЖЕНИЕ», что будет соответствовать ходу пресса вверх. Режим «0» – работа вхолостую и передвижения пресса не будет. Режим «СБРОС» используется при разгрузке образца (обратный ход плиты пресса).

5. Включите прибор СИ-2.

6. На СИ-2 с помощью кнопок выставите уровень защиты. Уровень защиты выставляется в кН. Если уровень защиты ниже усилия пресса, то пресс автоматически выключается. Если такое произошло, то для включения пресса нажмите на кнопку «НАСОС».

7. На СИ-2 выставите скорость нагружения – разница между нагрузкой в данный момент и предыдущей. Если скорость нагружения больше установленной, то пресс автоматически выключается.

8. При включении СИ-2 горит лампочка «ПУСК», что соответствует отображению данных в реальном времени. При нажатии на кнопку произойдет переключение режимов отображения – загорится лампочка «МАКС» и на панели будет отображаться последнее максимальное значение напряжения. При повторном нажатии на кнопку режим вернется в «ПУСК» (режим реального времени).

9. Установите скорость нагружения прессом (от 0 до 5 передач). Нажать кнопку «НАСОС». Нижняя плита пресса начнет подниматься. Доведя образец до верхней плиты, пресс начнет раздавливать образец. Из отверстия динамографа начнет выходить динамограмма и на шкалах СИ-2 появляются данные испытания.

10. По завершению опыта пресс автоматически выключится, СИ-2 продолжает работать.

11. Установите режим работы на «СБРОС». Дождитесь, пока нижняя плита придет в исходное положение, – образец можно извлекать. Положите образец на стол.

12. Снимите диаграмму и положите ее на стол. После того как динамограмма оказалась на столе, внимательно рассмотрите ее (щелчок на диаграмму поднимает ее перпендикулярно перед пользователем, повторный щелчок убирает ее обратно на стол).

13. Возьмите новый образец и провести испытания дальше.

14. Вычислите предел прочности дерева вдоль волокон по формуле:

$$\sigma_{\text{вс}} = F_{\text{вс}}/A_0,$$

где $F_{\text{вс}}$ – наибольшая нагрузка, предшествующая разрушению образца; A_0 – площадь поперечного сечения образца до начала испытания.

15. Заполните табл. 7.1.

Результаты испытания материалов

Наименование образца	Площадь сечения, см ²	Максимальная нагрузка, Н	Предел прочности, МПа

Теоретические основы испытания материалов на сжатие

При испытании на сжатие (рис. 7.2) пластических материалов (мягкой стали, меди и др.) из-за сильной деформации (сплющивания) не удастся довести образец до разрушения. Опыт приходится остановить, не определив величины наибольшей разрушающей нагрузки. Следовательно, для пластических материалов предел прочности при сжатии не может быть определен. В этом случае обычно устанавливается только предел пропорциональности:

$$\sigma_{\text{пц}} = P_{\text{пц}} / A_0$$

Следует отметить, что при сжатии стали предел пропорциональности, предел текучести, модуль упругости E приблизительно имеют такие же значения, как и при растяжении. Хрупкие материалы (чугун, камень, бетон и др.) разрушаются при сжатии (рис. 7.3), выдерживая при этом значительно большее напряжение, чем при растяжении. Для этих материалов предел прочности при испытании на сжатие имеет большое практическое значение, так как обычно детали из хрупких материалов в реальных конструкциях работают на сжатие.



Рис. 7.2. Деформация стального образца при сжатии

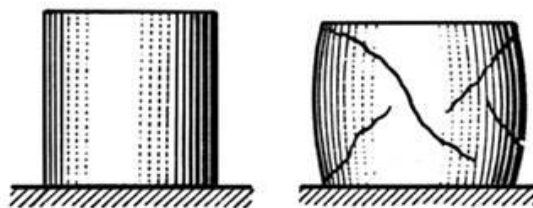


Рис. 7.3. Деформация чугунного образца при сжатии

Испытание деревянных образцов представляют собой интерес вследствие того, что прочность этого материала, имеющего волокнистую структуру, неодинакова вдоль и поперек волокон (анизотропный материал).

Для испытаний применяют деревянные кубики (рис. 7.4). Прочность дерева на сжатие вдоль волокон обычно в 8–10 раз больше, чем поперек волокон (рис. 7.5).

Образцы до и после сжатия выглядят следующим образом.

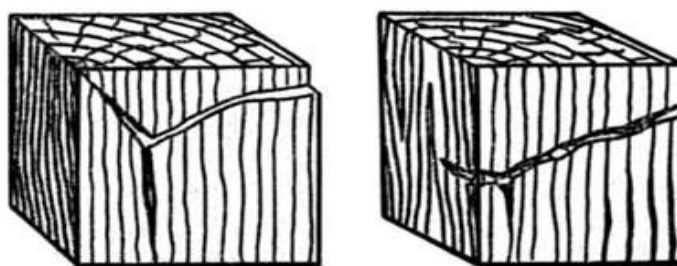


Рис. 7.4. Деревянные образцы, разрушенные при сжатии волокон

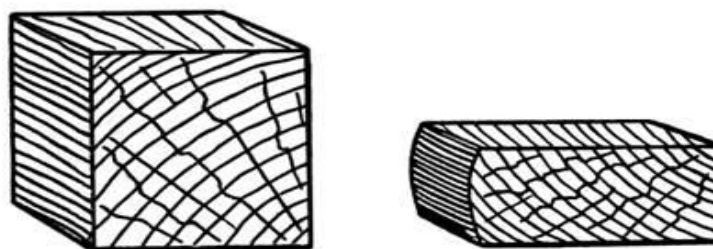


Рис. 7.5. Деревянный образец до и после сжатия поперек волокон

Размерность

1 кгс = 9,8 Дж;

1 кгс = 9,80665 ньютонов точно $1 \text{ Н} \approx 0,10197162 \text{ кгс}$;

$1 \text{ кгс/см}^2 = 0,1 \text{ Мпа}$; $1 \text{ кгс/мм}^2 = 9,81 \text{ МПа}$.

Пресс гидравлический (ПСУ-10)

Гидравлический пресс ПСУ-10 предназначен для испытания стандартных образцов строительных материалов на сжатие, а также поперечного изгиба кирпича согласно ГОСТ 530-54 на ПСУ-10.

По конструкции силовозбуждающего устройства пресс относится к типу гидравлических и включает в себя три отдельных агрегата: собственно пресс (рис. 7.8), пульт управления (рис. 7.9), силоизмеритель СИ-2 (рис. 7.10).

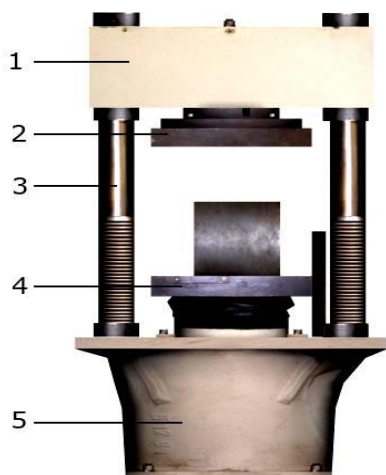


Рис. 7.8. Общий вид гидравлического пресса ПСУ-10

Собственно пресс представляет собой неподвижную раму, состоящую из станины (5) и поперечины (1), соединенных между собой двумя колоннами (3). В центральном гнезде поперечины смонтирована винтовая пара, на которую закреплена плита опорная верхняя (2).

В центральной части станины расположен рабочий цилиндр пресса, в котором помещается плунжер. К плунжеру прикреплена плита нижняя (4). Под действием давления масла в цилиндре плунжер перемещается вверх. Максимальное передвижение его вверх должно быть в пределах 50 мм. Подвижные части машины опускаются вниз под действием собственного веса.

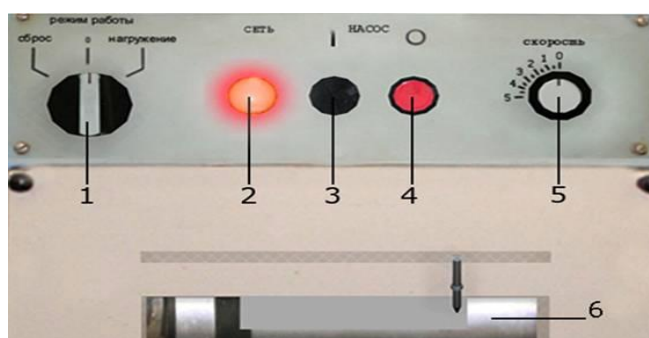


Рис. 7.9. Панель управления прессом

На пульте управления прессом расположены следующие элементы:

(1) – переключатель режимов работы пресса, где «0» – нерабочее состояние, «СБРОС» – состояние сброса нагрузки пресса и возврата нижней плиты в нижнее положение, «НАГРУЖЕНИЕ» – состояние нагрузки пресса (нижняя плита перемещается вверх);

(2) – лампочка индикации сети;

(3) – кнопка включения насоса, подающего жидкость в гидро-

цилиндр пресса;

- (4) – кнопка выключения насоса;
- (5) – переключатель скорости нагружения пресса;
- (6) – динамограф.

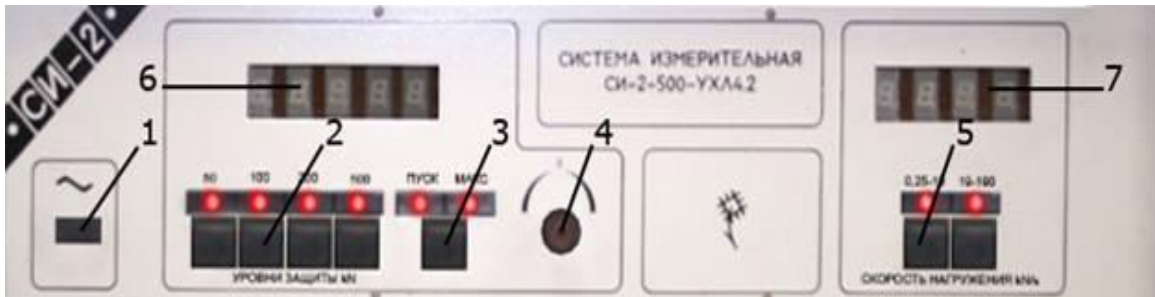


Рис. 7.10. Панель силоизмерителя СИ-2

Силоизмеритель предназначен для отображения нагрузки и скорости нагружения пресса. На пульте силоизмерителя СИ-2 расположены следующие элементы:

- (1) – кнопка включения прибора (вкл/выкл);
- (2) – кнопки включения уровня защиты напряжения. Включение уровня защиты напряжения обеспечивает автоматическое выключение пресса, при достижении напряжения выше указанного;

(3) – кнопка режимов отображения напряжения. При включении режима I загорится индикатор «ПУСК» и числовое табло (6) будет отображать напряжение пресса в реальном времени. При включении режима II загорится индикатор «МАКС» и числовое табло (6) будет отображать последнее максимальное напряжение пресса;

- (4) – ручка ручной настройки СИ-2;
- (5) – кнопки включения уровней защиты скорости нагружения;

Включение уровня защиты скорости нагружения обеспечивает автоматическое выключение пресса, при скорости нагружения выше указанной.

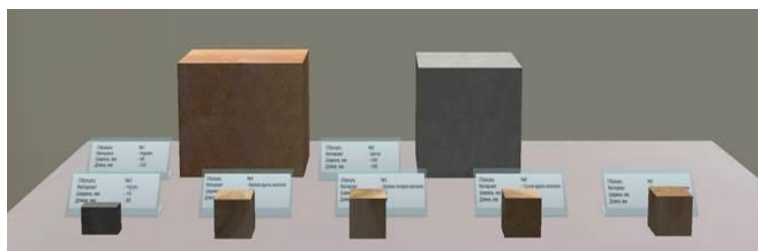


Рис. 7.11. Стол с образцами

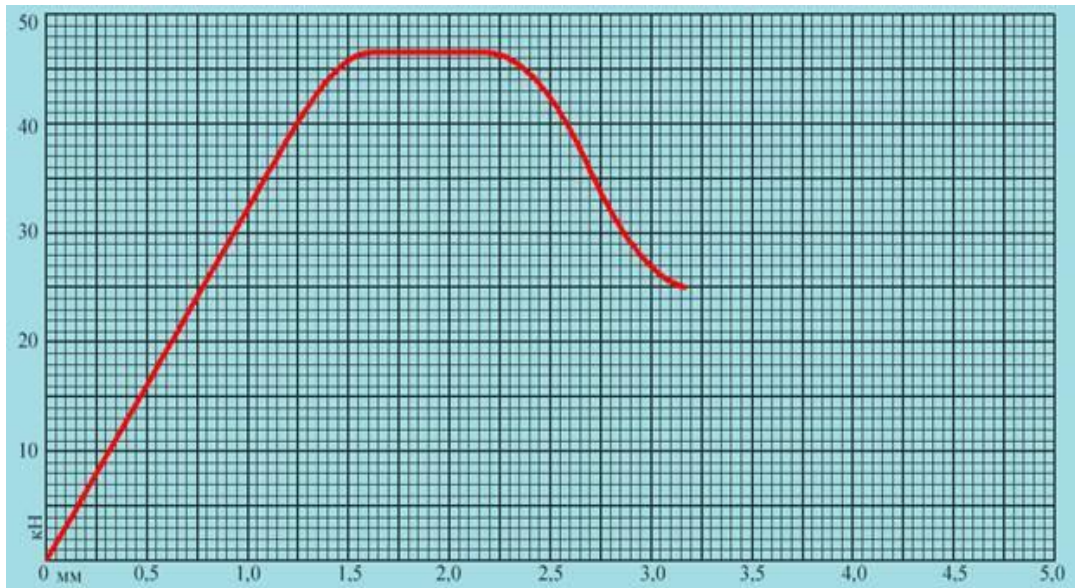


Рис. 7.12. Пример диаграммы

Обработка результатов, их обобщение и выводы

Зарисуйте исследуемые образцы до и после механических испытаний, показывая изменение соответствующих параметров надлежащими формулами.

Контрольные вопросы

1. Какие механические характеристики можно определить при испытании пластичных материалов на сжатие?
2. Какие механические характеристики можно определить при испытании хрупких материалов на сжатие?
3. Для каких материалов испытание на сжатие имеет большое практическое значение?
4. Чем объясняется разрушение чугуновых образцов по плоскости, проходящей под углом 45° к оси образца?
5. В каком направлении дерево прочнее при сжатии?
6. Можно ли довести до разрушения деревянный образец нагрузкой, направленной поперёк волокон?

Лабораторная работа № 8

ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Цель работы

Изучить методику проведения испытаний на растяжение для определения механических свойств различных материалов.

Рабочее задание

Проведите испытания на растяжение различных материалов и определить показатели прочности и пластичности.

Оборудование и материалы

Виртуальный лабораторный комплекс, испытательная машина УММ-5, штангенциркуль, образцы различных металлических материалов.

Порядок выполнения работы

Последовательность действий следующая:

1. Возьмите образец со стола (рис. 8.1);
2. Установите образец между кулачками (рис. 8.2);
3. Включите УММ-5 (кнопка внизу «красная» – включить, «белая» – выключить);
4. Установите передачу (рис. 8.3);



Рис. 8.1. Стол с образцами



Рис. 8.2. Зажатый образец

5. Нажмите кнопку «ВНИЗ». Образец начнет растягиваться.

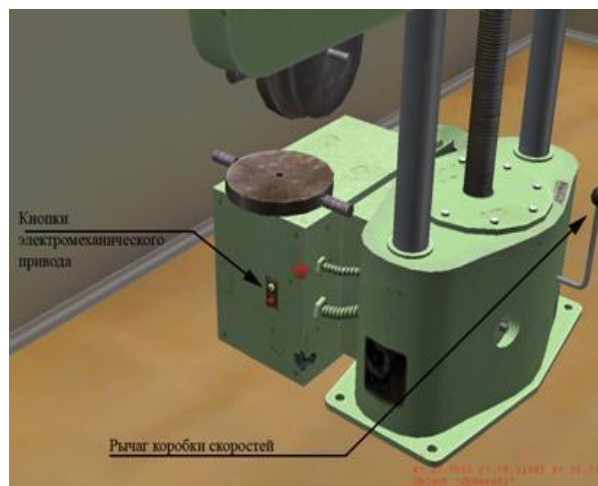


Рис. 8.3. Кнопки электромеханического привода и рычаг коробки скоростей

При растягивании шкала показывает данные (рис. 8.4). Управление пассивной стрелкой происходит от рукоятки посередине шкалы (вращая рукоятку, можно вращать стрелку). Во время работы из диаграммного аппарата «выезжает» лист с диаграммой (рис. 8.5).

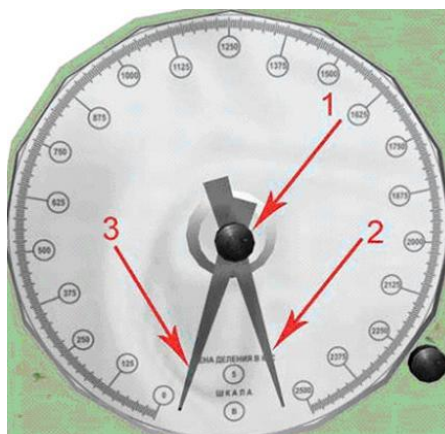


Рис. 4. Шкала динамографа: 1 – рукоятка управления пассивной стрелкой; 2 – активная стрелка (связана с замером); 3 – пассивная стрелка

6. Постепенно образец в середине становится тоньше и длиннее за счет растяжения. В конце испытания образец рвется.

7. Затем выключите УММ–5 (кнопка «СТОП»), либо машина выключится сама.

8. Вытащите образец, и положите его на стол для замера.

9. Возьмите со стола штангенциркуль и укажите на образец. Одной губкой штангенциркуль встанет к месту замера на образце, а вторую можно двигать, тем самым производя замер в месте обрыва.

10. Снимите динамограмму с УММ-5 и положите ее на стол. После того, как динамограмма оказалась на столе, имеется возможность растянуть ее на весь экран (щелчок на динамограмму растягивает ее на весь экран, повторный щелчок убирает ее обратно на стол).

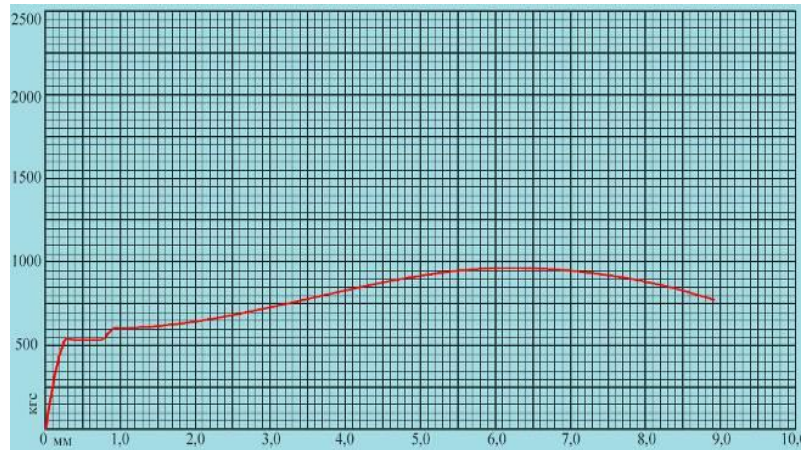


Рис. 8.5. Пример диаграммы разрыва образца

11. Сломанный образец нужно выкинуть в урну.
12. Далее нижний кулачок поднять (кнопка «ВВЕРХ») до положения, чтобы поместить новый образец.
13. Пассивную стрелку (3) динамографа установите в нулевое положение.

Можно проводить дальнейшие испытания.

Теоретические основы испытания материалов на растяжение

Действие силы вызывает деформацию твердого тела, и в нем возникают напряжения. Напряжение является удельной величиной и определяется как отношение силы, действующей на тело, к площади его сечения:

$$\sigma = F/A_0, \text{ (Па, МПа),}$$

где F – сила, A_0 – площадь поперечного сечения образца, м^2 (рис. 8.6); $A_0 = \pi d_0^2/4$, d_0 – начальный диаметр образца, м.

Деформацией в механике называется процесс изменения взаимного расположения каких-либо точек твердого тела. Деформация может быть обратимой (упругой), исчезающей после снятия нагрузки, и необратимой –

остающейся после снятия деформирующего усилия. Необратимую деформацию называют пластической или остаточной. При определенных условиях нагружения деформация может закончиться разрушением.

Процесс деформации под действием постепенно возрастающей нагрузки складывается из трех последовательно накладывающихся одна на другую стадий.

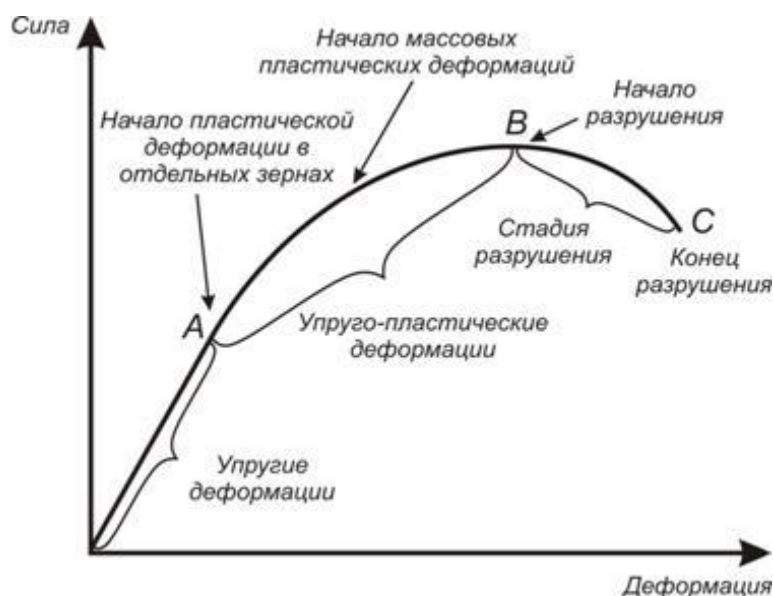


Рис. 8.6. Схема процесса деформации

Даже незначительное усилие вызывает упругую деформацию, которая в чистом виде наблюдается только при нагрузках до точки А. Упругая деформация характеризуется прямо пропорциональной зависимостью от нагрузки и упругим изменением межатомных расстояний. При нагрузках выше точки А в отдельных зернах металла, ориентированных наиболее благоприятно относительно направления деформации, начинается пластическая деформация. Дальнейшее увеличение нагрузки вызывает и увеличение упругой, и пластической деформации (участок АВ). При нагрузках точки В возрастание упругой деформации прекращается. Начинается процесс разрушения, который завершается в точке С.

Диаграмма растяжения

Вид диаграммы растяжения зависит от природы материала и от его структурного состояния (рис. 8.7).

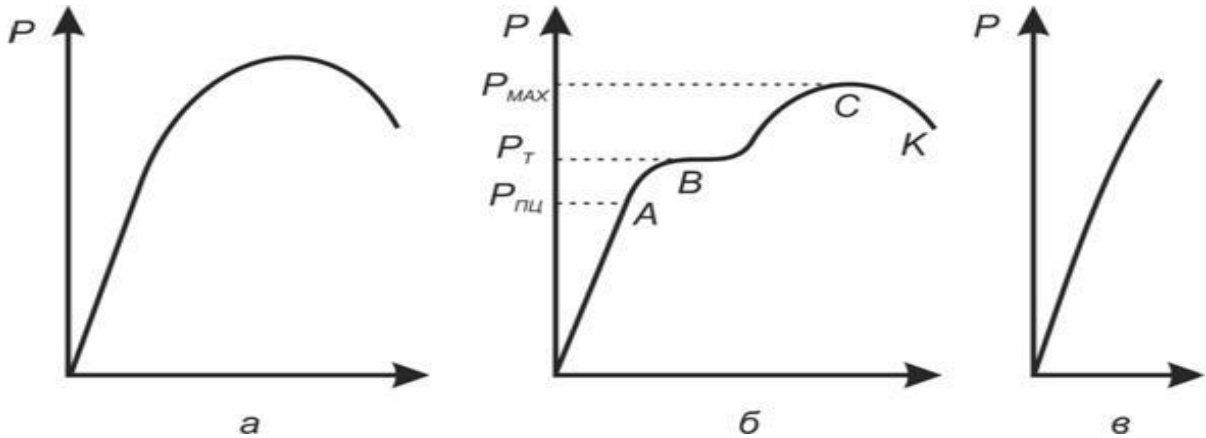


Рис. 8.7. Виды диаграмм растяжения различных материалов: *a* – для большинства металлов в пластичном состоянии с постепенным переходом из упругой области в пластическую (медь, бронза, легированные стали); *б* – для некоторых металлов в пластичном состоянии со скачкообразным переходом в пластическую область (малоуглеродистая сталь, некоторые отожженные бронзы); *в* – для хрупких материалов (чугун, стекло, закаленная и неотпущенная сталь, силумин)

Рассмотрим стадии растяжения малоуглеродистой стали (рис. 8.7, *б*).

Вначале до точки А зависимость между нагрузкой и удлинением изображается прямой линией, т.е. наблюдается прямая пропорциональность между удлинением и нагрузкой. Интенсивность возрастания нагрузки с ростом удлинения характеризует жесткость материала.

Ордината точки А соответствует нагрузке при пределе пропорциональности $P_{пц}$. До предела пропорциональности в образце возникают только упругие деформации. При дальнейшем растяжении образца начинается заметное отклонение линии от первоначального направления, приводящее в случае малоуглеродистой стали к появлению на диаграмме горизонтального или почти горизонтального участка. Это означает, что образец удлиняется без заметного возрастания растягивающей нагрузки. Материал как бы течет, поэтому нагрузка P_T , соответствующая горизонтальному участку (точка В), называется нагрузкой при пределе текучести.

В период течения в образце происходит пластическая деформация, возрастает количество дислокации и других дефектов. В результате этого металл упрочняется. Поэтому при дальнейшем растяжении нагрузка вновь начинает увеличиваться и достигает значения P_{max} , соответствующего ординате максимально удаленной точки С на кривой растяжения. При нагрузке P_{max} деформация образца локализуется, начинает образовываться шейка – местное уменьшение сечения. Нагрузку P_{max} называют нагрузкой на пределе прочности, или нагрузкой временного сопротивления. При нагрузке, соответствующей точке К, происходит разрыв образца.

Нагрузки $P_{\text{пц}}$, P_{T} , P_{max} и т.п. являются характеристиками данного образца. Свойства же материала характеризуют другими показателями.

Показатели прочности

Сопротивление малым пластическим деформациям характеризуют предел пропорциональности, предел упругости и предел текучести.

Предел пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$ – напряжение, до которого материал деформируется строго упруго, то есть соблюдается закон Гука $\sigma = E\varepsilon$, где E – модуль упругости (модуль Юнга. Это структурно нечувствительная величина).

$$\sigma_{\text{пц}} = F_{\text{пц}}/A_0,$$

где $F_{\text{пц}}$ – нагрузка, при пределе пропорциональности.

Предел упругости σ_{y} – наибольшее напряжение, до которого в материале не обнаруживаются признаков пластической деформации;

$$\sigma_{\text{y}} = F_{\text{y}}/A_0.$$

Физический предел текучести σ_{T} – это наименьшее напряжение, при котором образец деформируется без увеличения растягивающей нагрузки:

$$\sigma_{\text{T}} = F_{\text{T}}/A_0.$$

Если на кривой деформации отсутствует четко выраженная площадка текучести (рис. 8.7, а), то определяют условный предел текучести.

Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ – это напряжение, при котором остаточное удлинение (необратимая пластическая деформация) составляет 0,2 % длины участка образца на его рабочей части, удлинение которого принимается в расчет при определении указанной характеристики.

Сопротивление значительным пластическим деформациям (для пластичных материалов) характеризуется пределом прочности.

Предел прочности (временное сопротивление) $\sigma_{\text{в}}$ – это условное напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествовавшей разрыву образца:

$$\sigma_{\text{в}} = F_{\text{в}}/A_0,$$

где F_B – нагрузка, соответствующая точке В.

Показатели пластичности

Относительное удлинение после разрыва δ – это отношение приращения расчетной длины образца ($l_k - l_0$) после разрушения (рис. 8.) к начальной расчетной длине l_0 , выраженное в процентах:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\%.$$

Для определения длины расчетной части l_k после разрыва части образца плотно прикладывают друг к другу и измеряют расстояние между метками, которые ограничивали начальную расчетную длину.

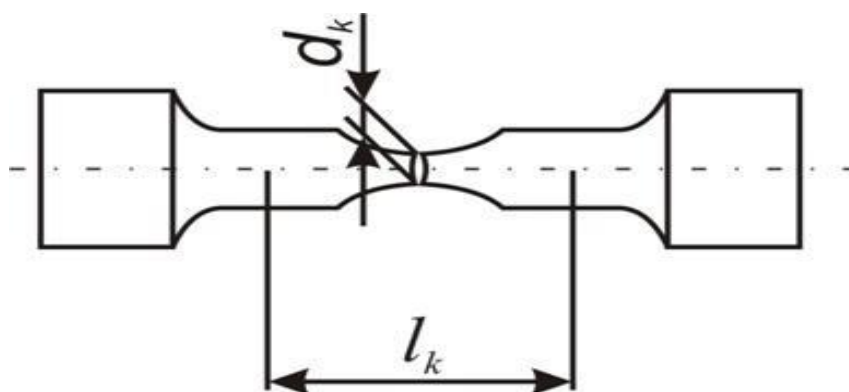


Рис. 8.8. Круглый образец после испытания на растяжение

Относительное сужение ψ – это отношение абсолютного уменьшения площади поперечного сечения в шейке образца ($F_0 - F_k$) к начальной площади сечения F_0 , выраженное в процентах:

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\%,$$

где F_0 и F_k – площади поперечного сечения образца до и после испытания, соответственно.

Для проведения испытаний используются следующие образцы (рис. 8.9):

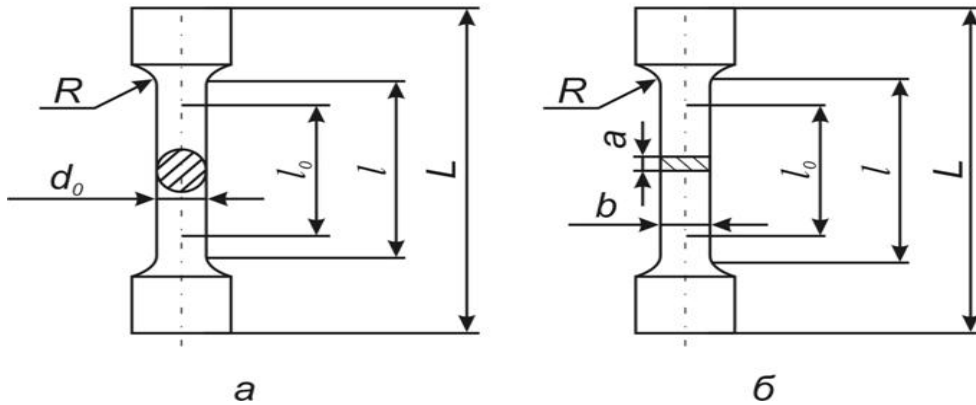


Рис. 8.9. Образцы для испытаний: *a* – круглый образец; *б* – плоский образец; *L* – общая длина; *l* – рабочая длина; *l₀* – начальная расчетная длина; *d₀* – диаметр образца до испытания; *a* – толщина; *b* – ширина; *R* – радиус скругления

Испытательная машина на растяжение

Машина имеет диаграммный аппарат (рис. 8.10), позволяющий записывать при испытании кривую деформации в координатах «сила – деформация», электромеханический привод (1) подвижного захвата (2), скорость перемещения которого может быть установлена с помощью рычага коробки скоростей. С неподвижным захватом (3) связан рычажно-маятниковый силоизмеритель (4). Возрастание усилия в верхнем неподвижном захвате (3) вызывает соответствующее отклонение маятника (5), происходит уравнивание. Величина усилия показывается стрелкой на круговой шкале (6).

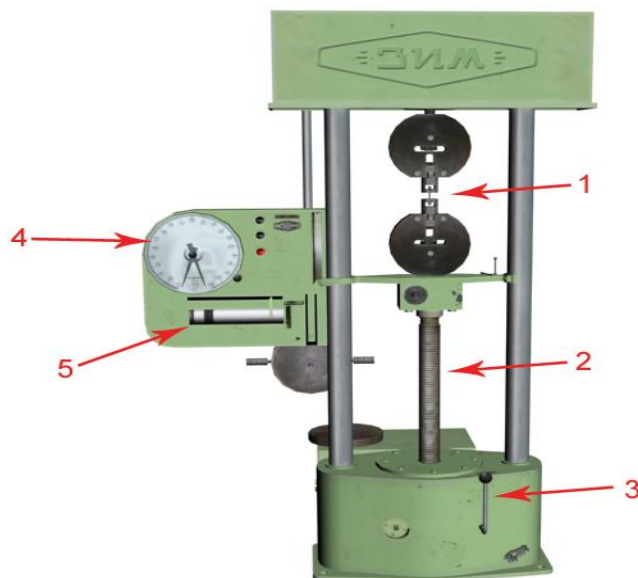


Рис. 8.10. Общий вид испытательной машины: 1 – место установки образца (кулачки); 2 – вращающийся винт; 3 – рукоятка переключения передач (используется 3 передачи); 4 – шкала динамометра; 5 – место выхода динамограмм

Обработка результатов, их обобщение и выводы

Полученные результаты следует обрабатывать следующим образом:

1. Зарисовать исследуемые образцы до и после механических испытаний, показывая изменение соответствующих параметров надлежащими формулами;
2. Занести результаты испытаний на растяжение различных материалов с записью диаграммы растяжения в протокол (табл. 1);
3. Определить механические свойства испытанных материалов и сравнить их с табличными значениями.

Таблица 1

Протокол испытаний на растяжение

Показатели		Образец		
		№ 1	№ 2	№ 3
Материал образца				
Диаметр образца	до испытания d_0	мм		
	после испытания d_k	мм		
Площадь поперечного сечения	до испытания F_0	мм		
	после испытания F_k	мм		
Длина расчетной части	до испытания l_0	мм		
	после испытания l_k	мм		
Нагрузки, соответствующие пределу текучести:	физическому P_T	кгс		
	условному $P_{0,2}$	кгс		
	пределу прочности P_{max}	кгс		
Предел текучести	Физический σ_T	МПа		
	условный $\sigma_{0,2}$	МПа		
Предел прочности σ_B		МПа		
Относительное удлинение δ		%		
Относительное сужение ψ		%		

Контрольные вопросы

1. Что называется пределом текучести и пределом прочности?
2. Какие механические свойства материала можно определить по диаграмме растяжения?
3. На какой испытательной машине выполняется работа?
4. Какой применяется образец?
5. Как проводится нулевая линия и оси координат на диаграмме растяжения?
6. Как определяют предел текучести, если на диаграмме растяжения имеется участок, параллельный оси удлинения?
7. По какой величине относительного остаточного удлинения определяют условный предел текучести?
8. Как определяют условный предел текучести по диаграмме растяжения?
9. На какую площадь сечения образца нужно делить максимальную нагрузку, которую выдержал образец до разрушения, при определении предела прочности?
10. Для какого участка диаграммы растяжения справедлив закон Гука?

Лабораторная работа № 9

ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА КРУЧЕНИЕ

Цель работы

Изучить методику определения предела прочности при кручении и исследовать характер разрушения образца.

Рабочее задание

1. Вычислите условный предел прочности при кручении.
2. Постройте диаграммы кручения образцов.
3. По характеру поломки образца определите причину разрушения (имел ли место при разрушении сдвиг или отрыв материала) т.е. выявите, какие напряжения для данного материала опасны.

Оборудование и материалы

Виртуальный лабораторный комплекс, испытательная машина КМ-50-1.

Проведение испытания

Последовательность действий следующая:

1. Возьмите образец со стола.
2. Установите образец в испытательную машину. Возьмите образец в руки, примените его к любому кулачку КМ-50-1, образец должен исчезнуть. Далее (рис. 9.1) нужно ручку захвата (1) повернуть по часовой стрелке на 30° , при этом вращении плашка (2) будет совершать движение от вас, а плашка (3) движение к вам. В результате этого движения расстояние между плашками (2) и (3) несколько увеличится. В таком положении захватов между кулачками появляется образец, и ручка (1) совершает движение против часовой стрелки. Плашки сходятся и образец зажимается.
3. Включите КМ-50-1. Поверните тумблер (2) (рис. 9.2) в положение «ВКЛ».

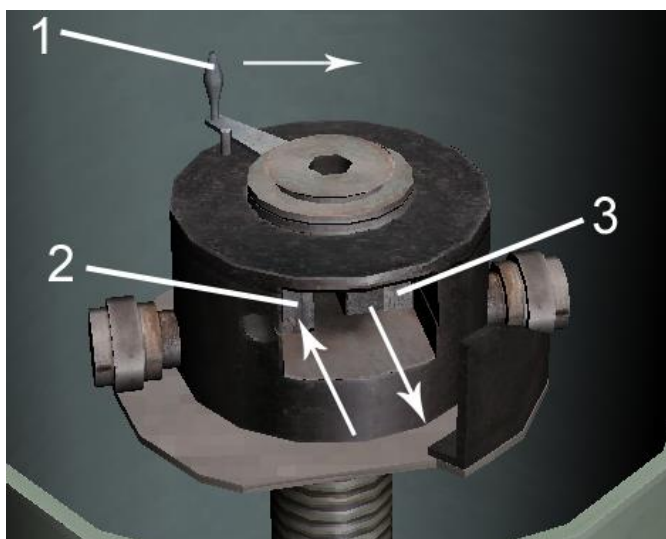


Рис. 9.1. Работа захвата

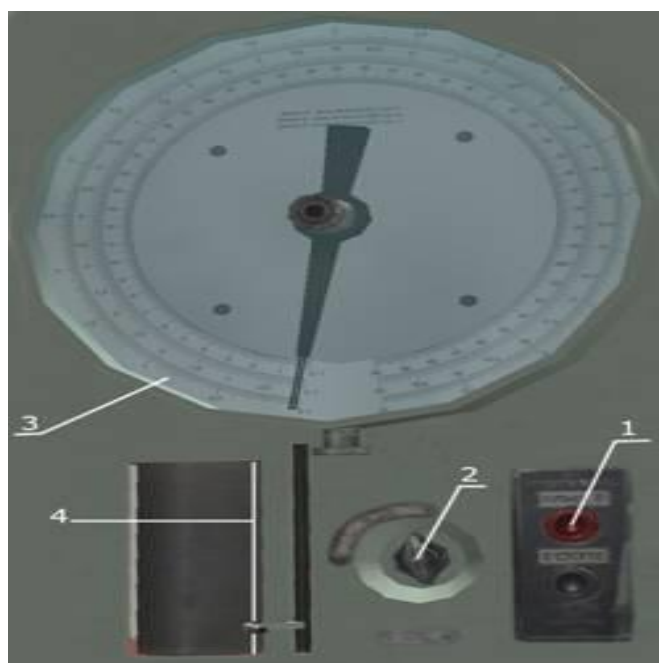


Рис. 9.2. Пульт управления и индикаторные приборы

4. Нажмите кнопку «ПУСК» (1). Образец начнет закручиваться. На шкале отобразится напряжение.

Одна стрелка связана с процессом и показывает данные процесса, а вторая стрелка приводится в движение первой. Смысл второй стрелки – показать максимальное зафиксированное значение, т.е. когда первая шкала укажет максимум, а потом пойдет на понижение, вторая шкала останется на максимуме. Ручное управление второй стрелкой осуществляется при помощи рукоятки в центре.

Из отверстия динамографа начнет выходить диаграмма (рис. 9.3).

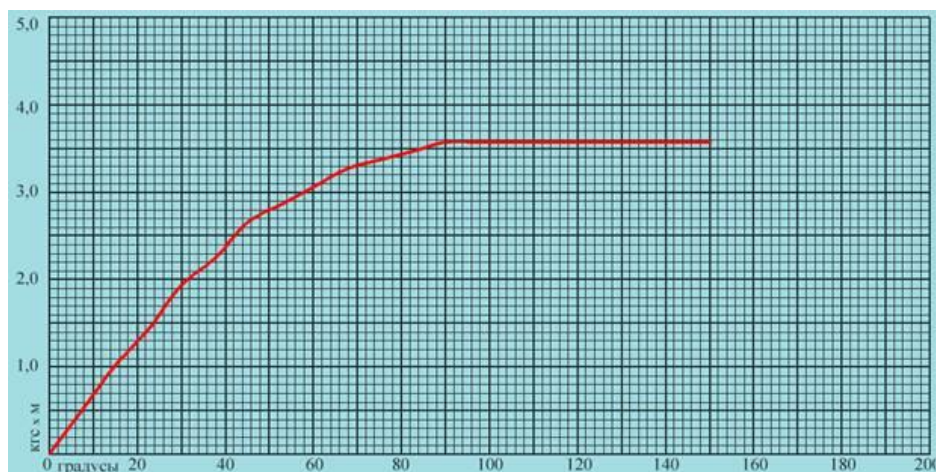


Рис. 9.3. Пример диаграммы зависимости угла закручивания от прилагаемого момента

5. После проведения опыта образец разрывается. КМ-50-1 автоматически выключается. Необходимо извлечь сломанный образец и положить его на стол.

6. Извлеките диаграмму процесса. Диаграмму положить на стол и увеличить (клик левой клавишей мыши).

7. Установите шкалы и пассивную стрелку на ноль;

8. По соответствующим шкалам последовательно зафиксируйте угол закручивания φ и соответствующее ему значение крутящего момента M_K вплоть до разрушения образца.

9. По полученным значениям постройте диаграмму кручения образца.

Обработка результатов, их обобщение и выводы

Полученные результаты следует обрабатывать следующим образом:

1. Зарисовать исследуемые образцы до и после механических испытаний, показывая изменение соответствующих параметров надлежащими формулами.

2. Вычислить условный предел прочности при кручении для чугунного и деревянного образцов по формуле:

$$\tau_B = \frac{M_{\max}}{W_p}$$

где τ_B – предел прочности при кручении; M_{\max} – разрушающий момент; W_p – полярный момент сопротивления, вычисленный по диаметру образца до испытания по формуле:

$$W_p = \frac{\pi \cdot d^3}{16}$$

Для стального образца применяется следующая формула:

$$\tau_b = \frac{M_{\max}}{W_{\text{пл}}}$$

где $W_{\text{пл}}$ – пластический момент сопротивления, вычисляемый по формуле:

$$W_{\text{пл}} = \frac{\pi \cdot d^3}{12}$$

Также для стального образца можно использовать формулу:

$$\tau_b = \frac{3}{4} \frac{M_{\max}}{W_p}$$

3. По величине угла закручивания, при котором произошло разрушение образца, определить *пластичность* материала.

Для вала круглого поперечного сечения угол закручивания определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{M_{\text{кр}} \cdot l}{G \cdot l_p}$$

где l – расчетная длина образца, G – модуль сдвига, $l_p = \pi d^4 / 32$ – полярный момент инерции поперечного сечения образца.

При кручении длина l и диаметр d образца в пределах упругих деформаций остаются неизменными. Величина модуля сдвига может быть определена из закона Гука, если в пределах пропорциональности для заданного приращения крутящего момента $\Delta M_{\text{кр}}$ на образце будут измерены приращения угла закручивания:

$$G = \frac{\Delta M_{\text{кр}} \cdot l}{\Delta \varphi \cdot l_p}$$

4. Заполнить журнал (таблица) испытаний:

Результаты испытаний образца

Крутящий момент $M_{кр}$ Н·м	Отсчет по индикатору A , мм	Разность отсчетов ΔA , мм	Деформация $\Delta \varphi_i$, мин	Деформация $\varphi_i = \sum \Delta \varphi_i + \Delta \varphi_i$

По значению величин нагрузки (из первой колонки таблицы) и соответствующему этой нагрузке значению суммы приращений угла закручивания строится график диаграммы кручения в координатах $M_{кр} - \varphi$, по которому просматривается линейность зависимости между $M_{кр}$ и φ .

Для среднего приращения момента (ступени нагружения) $\Delta M_{кр}$ определяется среднее приращение угла закручивания $\Delta \varphi_{ср}$ по формуле:

$$\Delta \varphi_{ср} = \frac{\sum \Delta \varphi_i}{n}$$

где n – число ступеней нагружения.

Для испытания на кручение в качестве основных применяют цилиндрические образцы с диаметром в рабочей части 10 мм и с расчетной длиной 100 и 50 мм, с головками на концах для закрепления в захватах испытательной машины.

Теоретические основы испытания материалов на кручение

При кручении бруса круглого поперечного сечения в плоскостях, перпендикулярных к его продольной оси, и в плоскостях совпадающей с этой осью, возникают только касательные напряжения, в плоскостях, расположенных под углом 45° к оси бруса, – только нормальные напряжения (главные). Напряженное состояние во всех точках – чистый сдвиг. Нормальные и касательные напряжения по величине равны между собой, поэтому разрушение образца при кручении может произойти от сдвига или отрыва. Так как сопротивление сдвигу или отрыву у различных материалов неодинаково, разрушение образцов при испытании на кручение будет происходить различно.

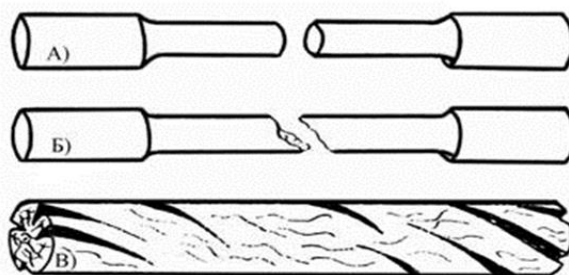


Рис. 9.4. Характер разрушения образцов при кручении: а) разрушение стального образца, вызванное сдвигом по поперечному сечению образца; б) разрушение чугунного образца от отрыва по винтовой поверхности с углом наклона 45° к оси образца; в) разрушение деревянного образца, вызванное сдвигом в продольном осевом сечении

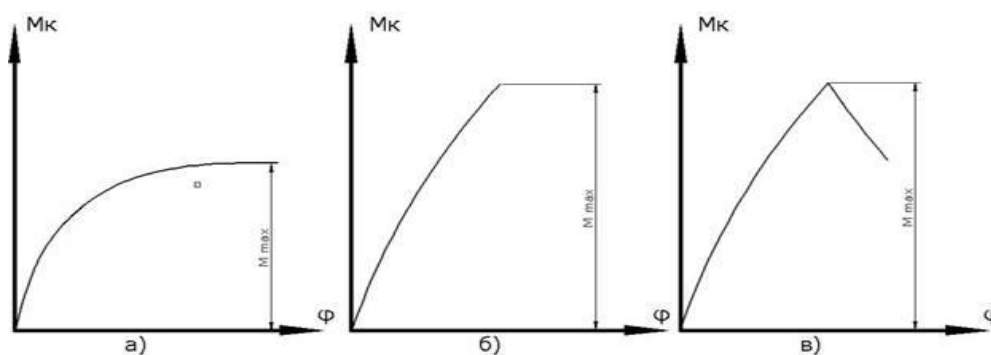


Рис. 9.5. Диаграмма кручения образцов: а) стального; б) чугунного; в) деревянного

Диаграмма зависимости угла закручивания φ от крутящего момента M_k наглядно отражает процесс деформации образца при кручении. Сначала деформация (угол закручивания) увеличивается пропорционально нагрузке (крутящему моменту) и на диаграмме – прямая (закон Гука) (рис. 9.5, а); затем деформация растет значительно быстрее нагрузки, и на диаграмме появляется криволинейный участок. Диаграмма обрывается при наибольшем значении крутящего момента, соответствующего разрушению образца.

Разрушение чугунного образца происходит внезапно по наклонному сечению. Зернистый характер излома является средством разрушения от отрыва. На диаграмме кручения чугунного образца (рис. 9.5, б) видно, что чугун не совсем строго подчиняется закону Гука (кривая имеет несколько выпуклый характер) и не получает при разрушении от кручения значительных остаточных деформаций.

На диаграмме кручения деревянного образца (рис. 9.5, в) вначале момент возрастает пропорционально углу закручивания, затем после достижения максимальной величины начинает заметно уменьшаться вследствие образования в образце продольной трещины.

Испытательная машина КМ-50-1

Испытательная машина КМ-50-1 (рис. 9.7) предназначена для испытания образцов из металлов на кручение с наибольшим крутящим моментом 50 кгс/м^2 в соответствии с методами, указанными в ГОСТе 3565-58.

Разрешается также проводить также на машине испытания образцов из других материалов.

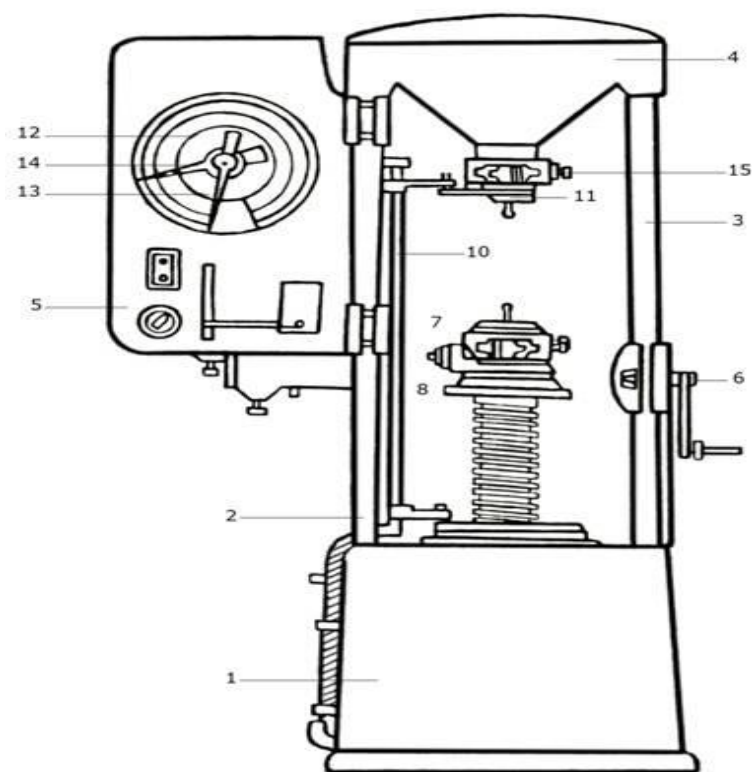


Рис. 9.6. Схема испытательной машины КМ-50-1

Машина состоит из следующих частей: остова, привода, механизма нагружения, моментоизмерителя, устройства записи, ручного привода, захватов и электроаппаратуры. Схема испытательной машины представлена на рис. 9.6.

При работе электродвигателя в зависимости от установки переключателей скоростей активный захват совершает 1 или 0,3 оборота в минуту. При работе ручным приводом (6) переключатель скоростей должен быть установлен в нейтральное положение, чтобы зубчатые передачи не работали, т.е. против отметки «0».

Угол образования описывается по шкале (9), установленной на ходовом винте. В шкале 360 делений, цена каждого из них



Рис. 9.7. Внешний вид
испытательной машины КМ-50-1

соответствует углу закручивания в 1° . Целые обороты ходового вала фиксирует специальный счетчик с пределом измерения в 10 оборотов.

Показания по шкале углов закручивания соответствуют относительному повороту захвата машины, т.к. поправка на поворот верхнего захвата вносится автоматически корректирующим приспособлением (10). Верхнюю направляющую корректирующего устройства перед испытанием образца необходимо подводить рукой до соприкосновения с верхним захватом (11).

Необходимо иметь в виду, что из-за инерционного пробега вала нижнего захвата после выключения механического привода в момент разрушения образца углы закручивания следует отсчитывать по шкале, если они не менее 200° , точно отсчитывать каждые углы можно, лишь при нагружении образца ручным приводом.

Для создания уравновешивающего момента привода служит механизм нагружения, в нижней части которого установлен верхний захват (11). Уравновешивающий момент создается с помощью сектора, связанного гибкой связью с маятником, имеющим съемные грузы, которые устанавливаются в зависимости от применяемой при испытании шкалы моментоизмерителя.

Моментоизмеритель предназначен для отсчета по шкале моментов (12) при помощи рабочей (13) и контрольной (14) стрелок момента, приложенного к образцу. Конструкция моментоизмерителя рассчитана так, что величина момента, приложенного к образцу, прямо пропорциональна углу отклонения рабочей стрелки по круговой шкале. Стрелка по круговой шкале показывает непосредственно действующий на образец момент.

Для закрепления образцов, испытываемых на кручение, машина имеет клиновые захваты. Верхний захват (11) установлен в шпинделе головки нагружения, нижний захват (7) – в ходовом винте. Клиновые захваты снабжены постоянными вкладышами, которые перемещаются пружиной, поджимаемой рукояткой. Вкладыши захватом снабжены комплектом сменных, термически обработанных губок, рассчитанных

на закрепление образцов различной толщины и диаметра. Верхний захват имеет фиксатор (15), удерживающий губки раскрытыми.

Контрольные вопросы

1. Объясните, какие напряжения возникают в точках образца при кручении: в плоскостях, перпендикулярных к оси; в плоскостях, расположенных под углом 45° к оси стержня.

2. Поясните как по характеру разрушения образца определить, какой вид напряжений наиболее опасен для данного материала.

3. Расскажите, что можно сказать о свойствах материала, если разрушение образца произошло по плоскости, расположенной под углом 45° к его оси.

4. Объясните, чем отличаются нормальные участки диаграмм кручения чугунного и стального образцов?

5. Поясните разницу в пластичности двух материалов, если при испытании было установлено, что один образец разрушается при угле закручивания 60° , а другой – при угле 500° .

Лабораторная работа № 10

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Цель работы

Изучить основы термической обработки углеродистых сталей.

Рабочее задание

1. Изучите теоретический материал, по описанию структурных превращений, происходящих при нагреве и охлаждении железо-углеродистых сплавов с различной скоростью.
2. Заполните табл. П1.
3. Начертите стальной угол диаграммы состояния Fe-C сплавов.
4. Проведите фигуративную прямую для марки стали, подлежащей термической обработке, и отметьте на ней температуры, до которых предстоит нагревать опытные образцы.
5. Заполните форму протокола термической обработки опытных образцов (табл. П2).

Оборудование и материалы

Электродуговая лабораторная печь, твердомер ТК-2, твердомер ТКМ-359, лабораторные образцы сталей, бачки с холодной и горячей водой и минеральным маслом.

Порядок выполнения работы

1. По диаграмме Fe-Fe₃C определите оптимальную температуру нагрева стали 45 для получения структуры мелкозернистого аустенита.
2. Нагрейте муфельную печь до этой температуры.
3. Загрузите 4 образца в нагретую печь и выдержите их в течение 15 мин.
4. Охладите один образец на спокойном воздухе, другой – в кипящей воде, третий – в минеральном масле и четвертый – в холодной воде.
5. Зачистите каждый образец с двух сторон для удаления окалины.
6. Измерьте их твердость на приборе Роквелла и среднее значение из трех испытаний записать в сводную таблицу.

7. Установите в муфельных печах заданные температуры отпуска (200; 300; 400; 500 и 600 °С).

8. Заложите в них по одному предварительно закаленному образцу, выдержать в течение 30 мин. и охладить на воздухе.

9. Зачистите образцы с двух сторон, измерить их твердость и среднее значение из трех измерений записать в сводную таблицу.

10. Перенесите данные сводной таблицы в таблицу п. 4 и п. 5 бланка отчета.

11. Постройте графики зависимости твердости от скорости охлаждения и температуры отпуска.

12. Идентифицируйте каждую операцию термической обработки и установите соответствующую ей микроструктуру.

13. Результаты замеров твердости по методу Роквелла запишите в соответствующую графу таблицы, затем переведите в значения твердости по Бриннелю по переводной таблице (табл. ПЗ) и записываются в графу «Твердость HV , кгс/мм²».

Обработка результатов, их обобщение и выводы

После заполнения всех граф протокола термообработки произвести обработку результатов эксперимента, т.е. построить графики зависимости твердости от скорости охлаждения $HV = f(U_{\text{охл}})$ и зависимости твердости от температуры отпуска $HV = f(T_{\text{отп}})$.

Проанализировав построенные графики, сделать выводы:

1. О характере изменения твердости стали в зависимости от скорости охлаждения в различных средах.

2. О характере изменения твердости стали в зависимости от температуры отпуска.

Основные термины и определения

Бейнит, внутренние напряжения, диффузионный отжиг, закалочные напряжения, закаливаемость, износостойкость, изотермическая закалка, коробление, критическая скорость закалки, ликвация, мартенсит, неполный отжиг, низкий отжиг, нормализация, одинарная термическая обработка, полный отжиг, перекристаллизация, пережог, поверхностная закалка, прокаливаемость, рекристаллизация, рессор, сорбит, степень переохлаждения, собирательная рекристаллизация, сфероидизация, термоулучшение, троостит, торсион, трещина, твердость, твердомер, твердый раствор

внедрения, улучшение.

Теоретические основы термической обработки сталей

Основными видами термической обработки (ТО) углеродистых сталей являются: 1) отжиг на мелкое зерно; 2) нормализация; 3) одинарная термическая обработка; 4) закалка; 5) отпуск (после закалки).

Первым этапом при проведении первых четырех видов ТО является нагрев сталей до оптимальных температур: доэвтектоидных – на 30–50 °С выше линии GS , т.е. $A_3 + 30–50$ °С, а эвтектоидной и заэвтектоидных – на 30–50 °С выше линии PSK т.е. $A_1 + 30–50$ °С (рис. 10.1). В результате фазовой перекристаллизации стали приобретают структуру мелкозернистого аустенита, причем в заэвтектоидных сталях сохраняются еще и включения вторичного цементита.

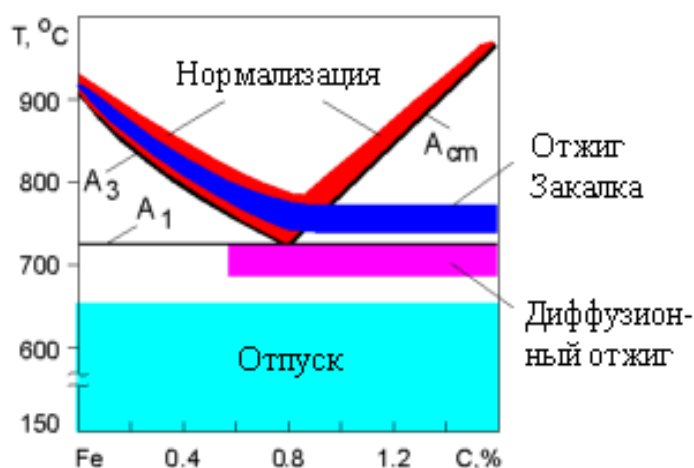


Рис. 10.1. Оптимальный интервал температур проведения ТО углеродистых сталей

Превышение оптимальной температуры уже на 60–70 °С неизбежно укрупняет зерно аустенита (перегрев), понижая пластичность стали, более значительное превышение приводит к выгоранию углерода из поверхностного слоя заготовки (пережог).

Перегрев еще удастся устранить повторной термической обработкой, если таковая допускается техническими условиями. Пережог же – брак неустранимый. В практике термической обработки и перегрев, и пережог недопустимы.

После нагрева до оптимальной температуры и соответствующего прогрева доэвтектоидная сталь, согласно диаграмме состояния имеет мелкозернистую аустенитную структуру, а заэвтектоидную дополняет

вторичный цементит.

Длительность выдержки для прогрева заготовки при той или иной температуре в общем случае определяется теплопроводностью материала, ее формой, габаритными размерами, а также количеством заготовок в данной садке.

В практике термической обработки длительность прогрева подбирается эмпирически. Расчет времени выдержки для технологических процессов производят исходя из максимальной толщины материала детали, подвергаемой термической обработке: на прогрев поверхности детали отводится 5 минут, к которым прибавляется по 1 минуте на каждый миллиметр толщины материала: $T_{\text{выд}} = 5 \text{ мин} + (1 \text{ мин} \cdot B)$, где $T_{\text{выд}}$ – время выдержки детали при температуре нагрева, мин, B – максимальная толщина металла детали, подвергаемой термообработке, мм, в случае цилиндрической детали $B = d_{\text{мм}}$ (диаметру). Для случаев штучной садки заготовок при термической обработке в лабораторных печах требуемую длительность прогрева можно рассчитать, пользуясь табл. 10.1.

Таблица 10.1

Нормы длительности прогрева штучных заготовок стали

Рабочая температура, °С	Форма заготовки		
	круг	квадрат	пластина
	продолжительность прогрева, мин		
	на 1 мм радиуса	на 1 мм толщины	на 1 мм толщины
600	2,0	3,0	4,0
800	1,0	1,0	2,0
900	0,8	1,2	1,6

После выдержки при этих температурах для полного завершения фазовой перекристаллизации и диффузионного выравнивания содержания углерода в мелкозернистом аустените следует охлаждение с заданной скоростью. При этом из мелкозернистого аустенита образуются и мелкозернистые структуры продуктов его превращения, что является необходимым условием достижения оптимальных механических свойств. Эти структуры определяются по соответствующим диаграммам превращения переохлажденного аустенита (рис. 10.2).

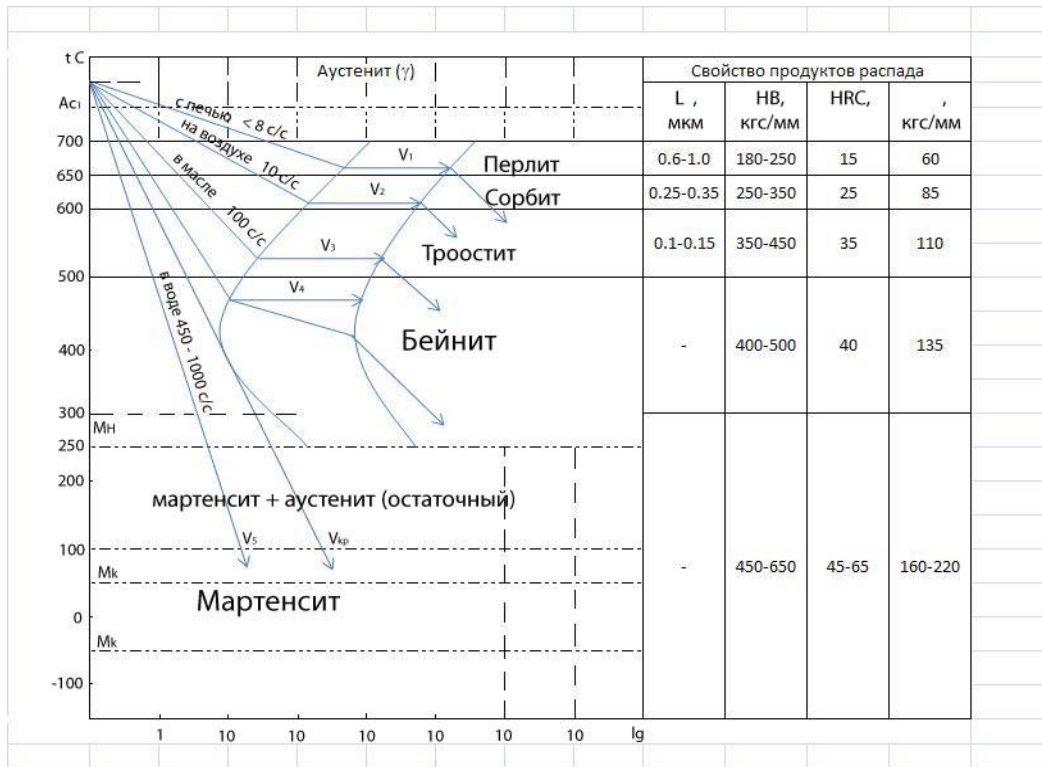


Рис. 10.2. Кривые распада аустенита и свойства продуктов этого распада, проявляющиеся при охлаждении стали

При относительно небольших скоростях охлаждения V_1 , V_2 , V_3 в верхнем районе температур (727–550 °С) происходит диффузионное перлитное превращение – распад аустенита на структуры перлитного типа: *перлит*, *сорбит* или *троостит*. Они представляют собой феррито-цементитные смеси разной степени дисперсности (измельченности) пластинчатого строения, т.е. в них частицы цементита имеют форму пластинок. Самой грубой смесью является перлит, а самой дисперсной (и потому самой твердой и прочной из них) – троостит, так как он образуется при большей степени переохлаждения.

В доэвтектоидных сталях перлитному превращению предшествует выделение из аустенита феррита, а в заэвтектоидных – цементита, количество которых с понижением температуры уменьшается до нуля в районе выступа левой С-образной кривой диаграммы превращения переохлажденного аустенита.

Охлаждение со скоростью V_4 приводит к образованию структуры *бейнита* (рис. 10.2).

При высоких скоростях охлаждения, равных или больших $V_{кр}$, например, V_5 , диффузионный распад аустенита подавляется и он переохлаждается до интервала температур M_H – M_K (M_H – температура

начала, а M_K – конца мартенситного превращения) (рис. 10.2). По мере охлаждения от M_H до M_K происходит бездиффузионное превращение аустенита в предельно неравновесную структуру – **мартенсит**. Он представляет собой пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в α -железе с тетрагональной кристаллической решеткой и обладает высокими твердостью и хрупкостью из-за сильного перенасыщения углеродом. Причем каждый мартенситный кристалл, ввиду особенностей условий его образования, имеет сложное блочное строение с высокой плотностью дислокаций и высоким уровнем внутренних напряжений. Поэтому мартенситная структура предельно прочна и чрезвычайно хрупка. Минимальная скорость охлаждения, необходимая для преобразования переохлажденного аустенита в мартенсит, называется *критической скоростью закали*

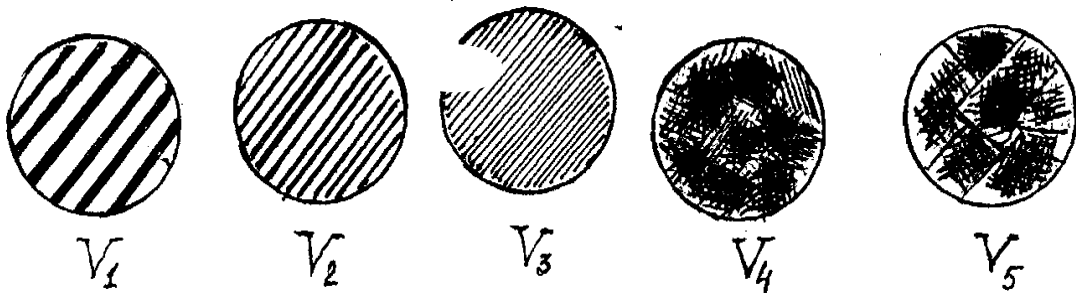


Рис. 10.3. Схемы структуры бывшего аустенитного зерна после непрерывного охлаждения с разной скоростью

Мартенситное превращение происходит в интервале температур M_H и M_K (начало и конец мартенситного превращения). Положение точек M_H и M_K зависит от содержания углерода в стали (в аустените). Чем больше углерода в аустените, тем ниже температура мартенситного превращения. При содержании углерода в стали, равном 0,6 % и более она достигает отрицательных значений ($M_K < 0$ °C). Поэтому в закаленной структуре высокоуглеродистой стали остается большое количество остаточного аустенита, для разложения которого применяется обработка холодом. В закаленной заэвтектоидной стали, нагреваемой при закалке до температур, на 30–50 °C превышающих критическую точку A_{c1} , после охлаждения в воде, наряду с мартенситом, в структуре будут присутствовать частицы вторичного цементита. Их присутствие увеличивает износостойкость, что чрезвычайно важно, прежде всего, для материала режущего инструмента.

Таким образом, по мере увеличения скорости непрерывного охлаждения (рис. 2) сужается интервал температур перлитного распада аустенита, а малая диффузионная подвижность атомов предопределяет большую степень дисперсности продуктов распада, т.е. уменьшает толщину пластинок феррита и цементита. Соответственно образуются структуры сорбита и троостита с большей прочностью, чем у перлита. А охлаждение с критической скоростью при закалке с охлаждением в воде превращает аустенит в прочный, очень хрупкий мартенсит.

Чрезмерно высокая хрупкость мартенсита приводит к необходимости отпуска закаленной на мартенсит стали. Он проводится для повышения пластичности стали посредством снятия внутренних напряжений. Нагрев стали при отпуске производят до температур, не превышающих A_{c1} .

Нагрев развязывает протекание диффузионных процессов, а они, наряду со снятием внутренних напряжений, вызывают и диффузионный распад мартенсита как пересыщенного твердого раствора, нарушают его тонкую блочную и дислокационную структуру, что, вполне естественно, сопровождается понижением прочности.

Назначение и условия проведения основных видов термической обработки

1. Отжиг на мелкое зерно – является разупрочняющей (смягчающей) ТО. Он заключается в нагреве сталей до оптимального интервала температур (рис. 10.1), выдержке и медленном охлаждении (обычно с печью; скорость охлаждения V_1 (рис. 10.3). После отжига получается равновесная мелкозернистая структура феррита и перлита в доэвтектоидных сталях, перлита в эвтектоидной стали и перлита с разрозненными включениями вторичного цементита в заэвтектоидных сталях. Отжиг на мелкое зерно, как правило, является предварительной ТО. Его цель – устранение структурной неоднородности и крупнозернистости, отрицательно влияющих на технологические свойства. Максимальное снижение твердости и повышение пластичности для улучшения обрабатываемости (резанием, давлением). При отжиге полностью снимаются внутренние напряжения. Отжиг бывает полный, неполный, низкий и диффузионный. При полном отжиге происходит полная перекристаллизация феррита в аустенит с растворением в нем цементита. При неполном отжиге сплав нагревается выше линии PSK (A_{c1}), но ниже GSE (A_{c3}) и полной перекристаллизации не происходит. Металл также охлаждается вместе с печью. При низком

отжиге сплав нагревается ниже $PSK (Ac_1)$ на 30–40 °С и охлаждается с печью. Перекристаллизация не происходит. Снимаются напряжения, уменьшается количество дислокаций. Низкий отжиг часто называется – рекристаллизационным отжигом. Диффузионный отжиг (гомогенизация) применяется для устранения ликвации, то есть разности химического состава стали по сечению слитка, литой заготовки. Металл длительно (20–24 часа) нагревают до 950–1100 °С, выдерживают. Для уменьшения зерна затем делают улучшение или закалку.

2. Нормализация доэвтектоидных сталей проводится так же, как отжиг на мелкое зерно, но сталь охлаждается ускоренно на спокойном воздухе (скорость V_2 на рис. 10.3). После данной ТО доэвтектоидные стали состоят из мелкозернистого феррита и сорбитообразного перлита, придающего стали повышенную твердость и прочность. Поэтому нормализация может использоваться либо вместо отжига на мелкое зерно (как более производительная обработка), если возрастание твердости и прочности находится в допустимых пределах, либо как слабая упрочняющая ТО для неответственных изделий.

Заэвтектоидные стали подвергают нормализации с целью устранения сплошной цементитной сетки по границам зерен перлита. Но в отличие от отжига процесс ведут от температуры $Ac_m + 30–50$ °С. При этой ТО зерна аустенита и соответственно зерна перлита оказываются крупными, поэтому после нее необходимо выполнить отжиг на мелкое зерно.

3. Одинарная термическая обработка применяется сравнительно редко, как более сильная, чем нормализация, упрочняющая ТО доэвтектоидных сталей. Она осуществляется так же, как отжиг на мелкое зерно, но сталь охлаждают быстро, например, в горячей воде или струей сжатого воздуха (скорость V_3 на рис. 10.3). Образующиеся пластинчатые структуры сорбита или троостита с небольшим количеством избыточного феррита или без него придают стали более высокую прочность, твердость и износостойкость по сравнению с этими свойствами в нормализованном состоянии.

4. Закалка. Процесс закалки необходим очень многим деталям, изделиям. Эта термообработка основана на перекристаллизации стали, нагретой до температуры выше критической; после достаточной выдержки – следует быстрое охлаждение. Таким путем предотвращают превращение аустенита до перлита. После закалки структура доэвтектоидных и эвтектоидной сталей состоит из мартенсита, а заэвтектоидных – из мартенсита и включений вторичного цементита. Мартенсит – основная структура закаленной стали, которая обуславливает максимальное

повышение ее твердости. Однако закаленная сталь практически неработоспособна из-за высокой хрупкости, присущей мартенситу, и высокого уровня закалочных напряжений, которые возникают из-за очень быстрого охлаждения и могут вызвать коробление детали или даже появление в ней трещин. Поэтому после закалки проводится заключительная операция термической обработки – отпуск.

Неполная закалка — закалка доэвтектоидной стали с нагревом до температур межкритического интервала A_1 – A_3 , не обеспечивающим полного превращения исходной структуры в аустенит, приводящая к формированию ферритно-мартенситной (дуальной) структуры, т.е. в структуре закаленной стали, кроме мартенсита, будет присутствовать феррит, что существенно ухудшает свойства.

Стали, подвергающиеся закалке, характеризуются закаливается и прокаливаемостью.

Закаливаемость – способность стали принимать закалку, т.е. приобретать при закалке детали высокую твердость.

Прокаливаемость – способность стали образовывать закаленный слой со структурой мартенсита и высокой твердостью. Прокаливаемость образца характеризуется максимально получаемой твердостью по сечению изделия. При неполной прокаливаемости конкретная величина определяет возможность получения при закалке материала с установленным значением твердости на определенной глубине. Полная прокаливаемость, то есть наличие мартенситной структуры по всему сечению изделия, называется сквозной. Стали с малым содержанием углерода закалить на мартенсит очень трудно, так как начало и конец процесса образования мартенсита происходит в области высоких температур, соответствующих образованию других, более устойчивых структур (троостит, сорбит). Прокаливаемость обыкновенной углеродистой стали распространяется на 5–7 мм.

Микроструктура закаленной стали зависит от ее химического состава и условий закалки (температуры нагрева и режима охлаждения). Закалка стали с содержанием углерода до 0,025...0,03 % задерживает выделение третичного цементита по границам зерен и не меняет структуру феррита. Такая закалка повышает пластичность и почти не изменяет прочностных характеристик.

Микроструктура стали с 0,08...0,15 % C (с нагревом выше верхних критических точек и охлаждением в воде) представляет собой низкоуглеродистый мартенсит с выделениями феррита. Дальнейшее увеличение содержания углерода (0,15–0,25 %) при тех же условиях

закалки приводит к повышению твердости с 110–130 НВ до 140–180 НВ, а предел текучести возрастает на 30–50 %. Наиболее значительное изменение свойств происходит при содержании углерода более 0,30–0,35 %.

Микроструктура доэвтектоидных сталей представляет собой мартенсит, кристаллы которого имеют характерную форму пластин (игл). При содержании углерода более 0,5–0,6 % в микроструктуре сталей наблюдается незначительное (2–3 %) количество аустенита.

Микроструктура заэвтектоидных сталей состоит из мартенсита, зерен вторичного цементита (не растворившегося при нагреве) и остаточного аустенита. Кристаллы (иглы) мартенсита очень небольших размеров.

Повышение температуры закалки вызывает растворение вторичного цементита и способствует росту зерна.

В тех случаях, когда требуются высокая твердость и повышенная износостойкость поверхности при сохранении вязкой и достаточно прочной сердцевины изделия, применяется *поверхностная закалка*, то есть закалка не на полную глубину. Поверхностной закалке подвергаются стали при содержании углерода более 0,3 %. В практике наиболее часто используют поверхностную закалку с индукционным нагревом током высокой частоты (ТВЧ).

Изотермическая закалка (закалка в горячих средах) основана на изотермическом распаде аустенита; охлаждение ведется не до комнатной температуры, а до температуры несколько выше начала мартенситного превращения (200–300 °С, зависит от марки стали). Как охладитель используют соляные расплавы или нагретое до 200–250 °С масло. При температуре горячей ванны деталь выдерживается продолжительное время, пока пойдут инкубационный период и распад аустенита. В результате получается структура игольчатого троостита, по твердости близкого к мартенситу, но более вязкого, прочного. Последующее охлаждение производится на воздухе, чтобы провести процесс изотермической закалки, вначале требуется быстрое охлаждение со скоростью не менее критической, чтобы избежать распада аустенита в условиях, отвечающих перегибу С-образной кривой. Следовательно, по этому методу можно закачивать только небольшие (примерно, диаметром до 8 мм) детали из углеродистой стали, так как запас энергии в более тяжелых деталях не позволит достаточно быстро их охладить. Это не относится, однако, к легированным сталям, большинство марок которых имеет значительно меньшие критические скорости закалки.

После изотермической закалки детали свободны от внутренних напряжений и не имеют трещин.

5. Отпуск. Цель отпуска – снизить уровень остаточных закалочных напряжений и получить работоспособные структуры и соответствующие им свойства – твердость, износостойкость, прочность, упругость, пластичность, ударную вязкость.

Отпуск заключается в нагреве закаленной стали ниже температуры A_1 , довольно продолжительной выдержке (в среднем от 0,5 до 2–3 часов) для завершения диффузионных процессов формирования той или иной окончательной структуры отпуска и последующем охлаждении (обычно на воздухе), скорость которого, в отличие от других операций ТО, не влияет на сформировавшуюся в процессе выдержки структуру.

Различают низкий (150–250 °С), средний (350–400 °С) и высокий (500–650 °С) отпуск.

При низком отпуске вследствие частичного выделения из кристаллической решетки мартенсита избыточного углерода в виде высоко-дисперсных карбидов и уменьшения внутренних напряжений, хрупкость стали несколько снижается, а ее твердость изменяется незначительно. Мартенсит, обедненный углеродом при отпуске, называется мартенситом отпуска и представляет собой уже достаточно работоспособную структуру. Низкому отпуску подвергаются изделия, которые должны быть твердыми и износостойкими: режущие инструменты, *цементованные, цианированные*, поверхностно-закаленные детали.

При среднем отпуске мартенсит распадается уже полностью на троостит отпуска зернистого строения (кристаллы цементита в нем имеют округлую форму), а внутренние напряжения значительно снижаются. Сталь с такой структурой характеризуется меньшей твердостью, высокой упругостью при повышенной пластичности и ударной вязкости. Поэтому средний отпуск применяют для получения упруго-вязких изделий – пружин, рессор, торсионов, мембран и др.

При высоком отпуске получается структура сорбита отпуска зернистого строения, а оставшиеся после закалки внутренние напряжения почти полностью снимаются. Твердость и прочность сорбита отпуска ниже, чем у троостита отпуска, но выше, чем у структур, получаемых после нормализации и тем более после отжига. В то же время сорбит отпуска имеет высокую пластичность и максимально возможную ударную вязкость. Поэтому высокий отпуск применяют для получения изделий с максимально высокой вязкостью и повышенной прочностью –

ответственных тяжело нагруженных деталей, работающих в условиях высоких статических, динамических и знакопеременных нагрузок.

Описание установок

1. Твердомер ТК-2 (рис. 10.4) – прибор для измерения твердости металлов по методу Роквелла, позволяет определить твердость металла вдавливанием в испытуемый материал алмазного (или твердосплавного) конуса с углом при вершине 120° или стального шарика диаметром 1,588 мм.

После установки на стол измеряемого образца 8 плавным вращением по часовой стрелке маховика приводят во вращение винт, поджимая стол вверх. После соприкосновения поверхности образца с индентором начинается вращение стрелки индикатора. Маховик плавно вращают до момента, когда конец малой стрелки окажется против красной точки, а большая займет верхнее вертикальное положение.

Затем барашком устанавливают шкалы индикатора до совпадения 0 (нулевого деления) черной шкалы *Cc* концом большой стрелки. В этом (исходном) положении поджатая пружина создает предварительную нагрузку индентору, равную 10 кгс. Основная нагрузка при этом выключена. Она за счет подвески 22 с грузом 4 составляет 50 кгс, а с добавлением грузов 5 и 6 будет соответственно 90 и 140 кгс.

На нижнем конце шпинделя с помощью винта закреплен индентор с алмазным конусом или стальным шариком.



Рис. 10.4. Прибор (твердомер) ТК-2 для измерения твердости по методу Роквелла

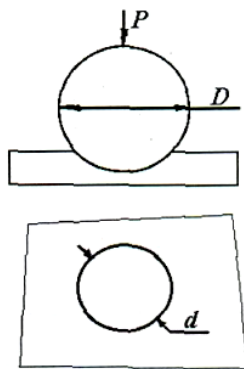
Приведение в действие прибора с установленной основной нагрузкой осуществляется нажатием на клавишу, которая приводит в действие кулачковый блок механизма. Начавшийся поворот кулачка опустит шток

на 4 секунды, обеспечив подвеске возможность с помощью рычага передать усилие на индентор. Общая нагрузка индентора на материал исследуемого образца в результате сложения предварительной и основной нагрузок может быть соответственно 60, 100 и 150 кгс. Через 4 секунды кулачковый блок, подняв шток, выключит основную нагрузку и отключится от привода сам. Тогда сила поджатия пружины будет прижимать индентор к поверхности сделанного им в материале образца отпечатка. Глубина этого отпечатка, указанная концом стрелки в делениях соответствующей шкалы индикатора, и представит собой величину искомой твердости.

Измерение твердости

Общая идея: в плоскую поверхность образца из исследуемого материала с заданным усилием специальный наконечник – *индентор*. О твердости судят либо по площади полученного отпечатка, либо по глубине вдавливания индентора.

Измерение твердости методом Бринеля



Индентор – шарик диаметра 2,5; 5 или 10 мм.

Твердость по шкале Бринеля:

$$HB = \frac{P}{\frac{D}{2} \sqrt{D-d}}$$

где P – усилие вдавливания, D – диаметр шарика, d – диаметр полученного отпечатка, измеряемый после удаления индентора.

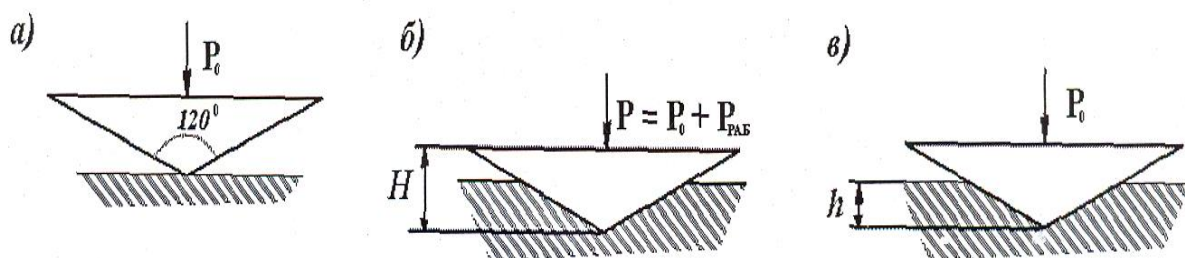
Достоинства метода: высокая универсальность, то есть способность к измерению материалов с разной структурой.

Недостатки метода: необходимость дополнительных измерений; необходимость дополнительных расчетов для получения *НВ* приводит к тому, что метод не оперативный.

Испытания проводят на специальных прессах – твердомерах, развивающих строго определенное усилие вдавливания, являющееся стандартным. За счет изменения диаметра индентора, можно измерять твердость материалов в широком диапазоне.

Измерение твердости методом Роквелла

В методе Роквелла твердость определяется глубиной вдавливания конуса с углом при вершине 120° .



Нагружение происходит в три этапа: а) предварительное малое усилие P_0 для обеспечения контакта с образцом; б) основное нагружение усилием $P = P_0 + P_{\text{раб}}$; в) снятие рабочего усилия $P_{\text{раб}}$. Остается P_0 для обеспечения контакта с образцом.

О твердости материала судят по глубине вдавливания h , измеряемого на 3-м этапе нагружения. Для повышения универсальности существуют три шкалы:

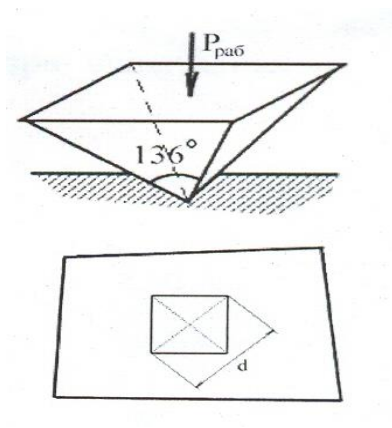
Шкала	Обозначения
<i>A</i>	<i>HRA</i>
<i>B</i>	<i>HRB</i>
<i>C</i>	<i>HRC</i>

Разным шкалам соответствуют разные рабочие усилия.

Измерение твердости методом Викерса

Методы Бринеля и Роквелла малоприспособны для измерения твердости тонких образцов из-за высоких усилий $9,8 \text{ Н} < P_{\text{раб}} < 1200 \text{ Н}$.

Индентор – четырехгранная пирамида; угол при вершине 136° .



$$HV = k \cdot \frac{P_{\text{раб}}}{D^2},$$

где D – диагональ отпечатка, k – размерный коэффициент.

Недостатки метода: дополнительные измерения и расчеты.

Достоинства метода: возможность измерять тонкие образцы.

Контрольные вопросы

1. Что такое термическая обработка?
2. Какие виды термической обработки вы знаете?
3. Что такое обработка холодом?
4. Что такое старение?
5. Как влияет скорость охлаждения на структуру стали?
6. Что такое время выдержки и как оно определяется?
7. Что такое закалка на сорбит, троостит, бейнит, мартенсит?
8. Как произвести отжиг на мелкое зерно?
9. Что такое нормализация?
10. Какие существуют виды отпуска и для чего они применяются?

Контрольные задания

1. Объясните, для чего применяется отжиг после холодной

пластической деформации? Как выбрать режима отжига?

2. Вычертите диаграмму состояния железо – карбид железа, укажите структурные составляющие во всех областях диаграммы, опишите превращения и постройте кривую охлаждения в интервале температур от 1600 до 0 °С (с применением правила фаз) для сплава, содержащего 2,7%С. Для заданного сплава определите процентное содержание углерода в фазах при температуре 950 °С.

3. Объясните, в чем заключаются энергетические условия процесса кристаллизации. Почему превращения происходят при строго определенных температурах?

4. Какую роль играют несовершенства структуры кристаллов. Какую роль играют дислокации в вопросах прочности и пластичности материала.

5. Вычертите диаграмму состояния железо – карбид железа, опишите превращения и постройте кривую нагревания в интервале температур от 0 до 1600 °С с применением правила фаз для сплава, содержащего 0,3%С.

6. Расскажите, в чем заключается отжиг. Каковы цель и назначение диффузионного, изотермического отжига?

7. Назовите режим термической обработки температуру закалки, охлаждающую среду и температуру отпуска фрез из стали У12. Опишите сущность проходящих превращений, структуру и твердость инструмента после термообработки.

8. Опишите, в каких отраслях промышленности особенно перспективно применение титана и сплава титана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арзамасов Б.И. Материаловедение технология конструкционных материалов. – М: Издательский центр «Академия», 2007.

2. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: Учеб. пособие / под ред. В.С. Чередниченко. – 3-е изд., стер. – М.: Омега-Л, 2007. – 752 с.

3. Материаловедение. Технология металлов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др.; под общ. ред. Г.П. Фетисова. – М: Высш. шк., 2006.

5. Ржевская С.В. Материаловедение: Учебник для вузов. – 4-е изд. – М.: Логос, 2004. – 424 с.

ЗАДАЧИ ПО РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ, ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ И СПЕЦИАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ

Методические указания к решению задач

Решение задач предусматривает обоснованный выбор сплава и его обработки, при использовании которых обеспечиваются надежность и стойкость деталей в условиях эксплуатации, указанных в каждой отдельной задаче. В задачах приведены более типичные условия использования изделий, имеющие место в разных отраслях промышленности. Кроме того, в задачах сформулированы характерные свойства, которые должен иметь сплав в соответствующем изделии.

Для решения задачи надо, прежде всего, определить группу сплавов (например, конструкционных сталей общего назначения, чугунов, жаропрочных сталей и сплавов, инструментальных материалов и т.д.)

Затем по литературным источникам определить наиболее пригодный сплав, из числа приведенных в выбранной группе, и режим его обработки. При этом необходимо рассмотреть возможность использования более дешевого материала (например, углеродистой стали обыкновенного качества или чугуна). Свойства основных материалов приведены в учебниках и в указанной ниже справочной литературе.

Для выбранного сплава необходимо выбрать термическую или химико-термическую обработку. При этом необходимо учитывать экономичность выбранного режима (например, для деталей, изготавливаемых в больших количествах, обработку с индукционным нагревом; газовую цементацию – при необходимости химико-термической обработки и др.).

При решении задач, при указании структуры и свойств выбранных сплавов рекомендуется использовать ГОСТы и следующие учебники и справочники:

1. Бутыгин В.Б. *Металловедение*. – Барнаул: АлтГТУ, 1998.
2. Гуляев Ю.М. *Металловедение*. – М.: *Металлургия*, 1989.
3. Геллер Ю.А. *Инструментальные стали*. – М.: *Металлургия*, 1983.
4. Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г. *Материаловедение*. – М.: *Металлургия*, 1989.
5. *Материалы в машиностроении*. Т. 1–5. – М.: *Машиностроение*, 1969–1970.
6. Сорокин В.Г. *Марочник сталей и сплавов*. – М.: *Машиностроение*, 1989.

Пример решения задачи

Заводу нужно изготовить вал диаметром 70 мм для работы с большими нагрузками. Сталь должна иметь предел текучести не ниже 750 МПа, предел выносливости не ниже 400 МПа и ударную вязкость не ниже 0,9 МДж/м².

Завод имеет сталь: Ст. 4, 45 и 20ХНЗА.

1. Расскажите какую из этих сталей следует применить для изготовления вала?

2. Объясните, нужна ли термическая обработка выбранной стали и если нужна, то какая?

3. Дайте характеристику микроструктуре и укажите механические свойства после окончательной обработки.

Решение задачи

Стали марок Ст.4, 45 и 20ХНЗА имеют следующий состав, %.

Сталь	С	Мп	Si	Cr	Ni	P	S
Ст.4	0,18–0,27	0,4–07	0,12–0,3	0,3	0,3	0,050	0,040
Сталь 45	0,42–0,50	025–036	0,17–0,37	0,8	0,3	0,050	0,040
20ХНЗА	0,17–0,23	0,3–0,6	0,17–0,37	0,9	2,9	0,025	0,025

Сталь марки Ст.4, согласно ГОСТ, имеет следующие свойства в состоянии поставки: $\sigma_B = 420–540$ МПа, $\sigma_{0,2} = 240–260$ МПа.

Сталь 45, согласно ГОСТ, в состоянии поставки имеет твердость не более НВ 207. При твердости НВ 190–200 сталь имеет предел прочности не выше 600–620 МПа, а при твердости ниже НВ 180 предел прочности не превышает 550–600 МПа. А предел текучести составляет 270–320 МПа.

Сталь 20ХНЗА, согласно ГОСТ, в состоянии поставки имеет твердость не более НВ 250. Предел прочности при твердости НВ 230–250 не превышает 670–750 МПа. Предел текучести составляет 350–400 МПа. Таким образом, для получения заданной величины предела текучести вал необходимо подвергнуть термической обработке.

Низкоуглеродистая сталь Ст.4, как сталь обыкновенного качества, имеет повышенное содержание серы и фосфора, которые понижают механические свойства, и особенно сопротивление ударным нагрузкам. Для такого ответственного изделия, как вал двигателя, поломка которого нарушает работу машины, применение более дешевой по составу стали

обыкновенного качества нерационально.

Сталь 45 относится к классу качественной углеродистой, а сталь 20ХНЗА – к классу высококачественной легированной стали. Эти стали содержат соответственно 0,42–0,5 и 0,17–0,23 % С и принимают закалку.

Для повышения прочности можно применять нормализацию или закалку с высоким отпуском.

Последний вариант обработки сложнее, но позволяет получить не только высокие характеристики, но и более высокую ударную вязкость. В стали 45 минимальные значения ударной вязкости после нормализации составляют 0,2–0,3 МДж/м², а после закалки и высокого отпуска (500 °С) достигают 0,6–0,7 МДж/м².

Так как вал двигателя в работе воспринимает динамические нагрузки, а также и вибрации, более целесообразно принимать закалку и высокий отпуск.

После закалки в воде углеродистая сталь 45 получает структуру мартенсита, однако, вследствие небольшой прокаливаемости углеродистой стали, эта структура в изделиях диаметром более 20–25 мм образуется только в сравнительно тонком и поверхностном слое толщиной до 2–4 мм.

Последующий отпуск вызывает превращение мартенсита в сорбит только в тонком поверхностном слое, но не влияет на структуру и свойства перлита и феррита в основной массе изделий.

Сорбит отпуска обладает более высокими механическими свойствами, чем феррит и перлит.

Наибольшие напряжения от изгиба, кручения и повторно переменных нагрузок воспринимают наружные слои, которые и должны обладать повышенными механическими свойствами. Однако в сопротивлении динамическим нагрузкам, которые воспринимает вал, участвуют не только поверхностные, но и нижележащие слои металла.

Таким образом, углеродистая сталь не будет иметь требуемых свойств по сечению вала диаметром 70 мм.

Сталь 20ХНЗА легирована никелем и хромом для повышения прокаливаемости и закаливается. Она получает после закалки достаточно однородные структуру и механические свойства в сечении диаметром до 75 мм.

Для стали 20ХНЗА рекомендуется термическая обработка:

1. Закалка с 820–835 °С в масле.

При закалке с охлаждением в масле (а не в воде как это требуется для стали 45) возникают меньшие напряжения, а, следовательно, и меньшая деформация. После закалки сталь имеет структуру мартенсит

и твердость не ниже HRC 50.

2. Отпуск 520-530 °С. Для предупреждения отпускной хрупкости, к которой чувствительны стали с хромом, вал после нагрева следует охлаждать в масле.

Механические свойства стали 20ХНЗА в изделии диаметром до 75 мм после термической обработки:

Предел прочности	$\sigma_B = 900-1000$ МПа
Предел текучести	$\sigma_T = 750-800$ МПа
Предел выносливости	$\sigma_{-1} = 400-430$ МПа
Относительное удлинение	$\delta = 8-10$ %
Относительное сужение	$\psi = 45-50$ %
Ударная вязкость	$KCU = 0,9$ МДж/м ²

Таким образом, эти свойства обеспечивают требования, указанные в задаче, для вала диаметром 70 мм.

Задача 1

Подберите марку стали для изготовления тяжело нагруженных коленчатых валов двигателей диаметром 60 мм; предел прочности стали должен быть не ниже 750 МПа.

Рекомендуйте химический состав стали, режим термической обработки; укажите структуру после каждой операции термической обработки и механические свойства в готовом изделии.

Задача 2

Завод должен изготовить три вала двигателей. Все они должны иметь предел прочности при растяжении не ниже 750 МПа.

Однако первый вал имеет диаметр 35 мм, второй вал – 50 мм и третий – 120 мм.

Выберите марки стали для изготовления валов, укажите химический состав и механические свойства; обоснуйте сделанный выбор марок стали, рекомендовать режим термической обработки и укажите структуру стали в готовом вале.

Задача 3

Зубчатые колеса в зависимости от условий работы и возникающих напряжений можно изготавливать из стали обыкновенного качества, качественной углеродистой и легированной с различным содержанием

легирующих элементов.

Выберите, руководствуясь техническими и экономическими соображениями, сталь для изготовления колес диаметром 50 мм и высотой 30 мм с пределом прочности не ниже 350–380 МПа.

Укажите термическую обработку колес, механические свойства и структуру выбранной стали в готовом изделии и для сравнения механические свойства и структуру сталей 45 и 40ХН после улучшающей термической обработки.

Задача 4

Многие зубчатые колеса двигателей должны обладать высокими характеристиками прочности и вязкости. В случае изготовления зубчатых колес путем нарезки из прутка ударная вязкость в поперечном направлении, т.е. в направлении изгиба зуба, будет относительно низкой.

Подберите марки стали для изготовления зубчатых колес диаметром 50 мм и высотой 40 мм, обеспечивающей получение после термической обработки предела текучести не ниже 500 МПа, твердости не ниже НВ 250–260 и ударной вязкости не ниже 0,4 МДж/м².

Укажите химический состав стали, режим термической обработки и микроструктуру стали в готовом изделии.

Задача 5

Цех изготавливает зубчатые колеса диаметром 50 мм из цементуемой стали. Подберите марки стали: а) для зубчатых колес, работающих в условиях обычного износа и удара; б) для зубчатых колес, работающих при повышенных удельных давлениях.

Укажите химический состав выбранных марок стали, рекомендовать режим термической обработки, объясните назначение каждой операции термообработки и ее влияние на структуру и свойства стали.

Сопоставьте механические свойства стали выбранных марок в готовом изделии и приведите механические свойства, которые можно получить при изготовлении подобных зубчатых колес из модифицированного чугуна, хорошо работающего на износ.

Задача 6

Станины станков изготавливают литьем. Предел прочности должен быть 200–250 МПа.

Выберите марку сплава, пригодного для изготовления станины, имеющей неодинаковую толщину в разных сечениях, и указать режим

термической обработки станины и структуру сплава.

При решении задачи учитывайте, что в литой детали необходимо иметь, возможно, меньше напряжений и термическая обработка должна предупредить деформацию (коробление) станины в процессе эксплуатации станка.

Задача 7

Блок цилиндров двигателей трактора изготавливают из чугуна с твердостью НВ 170–240 и повышенной прочностью и износостойчивостью.

Подберите марку чугуна, приведите его структуру и механические свойства и укажите, какой должен быть принят химический состав чугуна, для того чтобы обеспечить получение заданных свойств.

Укажите, каким требованиям должны отвечать химический состав и структура чугуна, если цилиндры нагреваются в работе до 500–600 °С.

Задача 8

Шатуны подвергаются действию знакопеременных и ударных нагрузок, поэтому они должны иметь максимально однородные свойства в продольном и поперечном направлениях. Шатуны двигателей изготавливают в зависимости от типа двигателей из стали с пределом прочности при растяжении: а) 700–750 МПа и б) 900–950 МПа. Ударная вязкость в обоих случаях должна быть не ниже 0,7–0,8 МДж/м².

Подберите марки стали для изготовления шатунов обоих типов, приведите химический состав, режим термической обработки, микроструктуру и механические свойства в готовом изделии.

Задача 9

Валы диаметром 70 мм для гидротурбин, испытывающие в работе значительные напряжения, часто изготавливают из хромоникелевой стали, обладающей после термической обработки высокими характеристиками прочности σ_B более 750–800 МПа, предел выносливости σ_{-1} ниже 300–350 МПа (при повышенной вязкости).

Выберите марку хромоникелевой стали, укажите ее химический состав, режим термической обработки, структуру и механические свойства после окончательной термической обработки.

Укажите, какие специфические дефекты встречаются в хромоникелевой стали в результате неправильного ведения процесса термической обработки (отпуска).

Задача 10

Рессоры грузового автомобиля изготавливают из качественной легированной стали; толщина рессоры до 10 мм.

Сталь в готовой рессоре должна обладать высокими пределами прочности, выносливости и упругости и не ломаться при эксплуатации.

Рекомендуйте режим термической обработки, структуру и механические свойства, которые можно получить при правильном выборе состава стали и обработки пружины.

Объясните, как влияет состояние поверхности на качество рессоры и укажите способ обработки поверхностного слоя, позволяющий повысить предел выносливости.

Задача 11

Цилиндрические пружины железнодорожных вагонов изготавливаются в массовых количествах. Пружины относительно больших размеров (например, с толщиной проволоки 10–15 мм и высотой пружины более 100 мм) удобно изготовить навивкой в горячем состоянии.

Подберите марку пружинной стали, не содержащей дорогих элементов и приведите ее химический состав. Укажите механические свойства и микроструктуру после навивки и термической обработки.

Укажите, какое сочетание механических свойств необходимо иметь в пружинах и как влияет на повышение механических свойств применение термической обработки.

Задача 12

Поршневые пальцы диаметром 30 мм и длиной 50 мм должны иметь по условиям работы вязкую сердцевину и твердую поверхность, хорошо сопротивляющуюся износу (HRC 58–62).

Укажите режим обработки, обеспечивающий получение требуемых свойств, если пальцы изготовляют массовыми партиями: а) из стали 20, б) из стали 45. Приведите химический состав сталей 20 и 45 и сопоставить механические свойства в сердцевине изделия из стали 20 и 45.

Задача 13

Подберите марку стали для изготовления валов диаметром 50 мм для двух редукторов. По расчету сталь одного из валов должна иметь предел прочности не ниже 600 МПа, а для другого – не ниже 800 МПа.

Укажите: 1) химический состав стали выбранных марок,

2) рекомендуемый режим термической обработки для получения заданного предела прочности, 3) структуру стали после каждой операции термической обработки, 4) механические свойства в готовом изделии.

Задача 14

На заводе изготавливались валы для двигателей внутреннего сгорания диаметром 60 мм из стали, имеющей предел текучести 200–230 МПа и относительное удлинение 20–22%.

В дальнейшем был получен предел текучести:

а) в валах одного типа 600 МПа и ударную вязкость $0,6 \text{ МДж/м}^2$;

б) в валах другого типа 800 МПа и ударную вязкость $0,8 \text{ МДж/м}^2$.

Укажите марки, химический состав и микроструктуру стали, обеспечивающие получение заданного предела текучести и ударной вязкости.

Рекомендуйте режим термической обработки валов, приведите структуру и механические свойства после окончательной обработки.

Задача 15

Червяк редуктора диаметром 35 мм можно изготовить из цементуемой и нецементуемой стали. Обоснуйте, в каких случаях целесообразно применять цементуемую, а в каких нецементуемую сталь. Предел прочности в сердцевине детали должен быть 600–700 МПа.

Выберите марку цементуемой и марку нецементуемой качественной углеродистой стали. Укажите химический состав, рекомендовать режим химико-термической и термической обработки и сопоставьте механические свойства стали обоих типов в готовом изделии.

Задача 16

Заводу поручено изготовить зубчатые колеса сложной формы диаметром 50 мм и высотой 100 мм, которые должны обладать твердостью на поверхности не ниже HRC 58–60, а в сердцевине прочности не ниже 400 МПа и ударной вязкостью не ниже $0,5–0,6 \text{ МДж/м}^2$.

Завод изготовил первую партию зубчатых колес из углеродистой цементуемой стали, однако некоторые зубчатые колеса получили деформацию при закалке.

Подберите марку стали и рекомендуйте режим термической обработки после цементации, чтобы обеспечить получение заданных механических свойств и устранить брак по деформации.

Укажите микроструктуру стали в сердцевине и поверхностном слое после окончательной обработки и причины, вызывающие деформацию при закалке.

Задача 17

Стаканы цилиндров мощных моторов должны обладать особо повышенной износоустойчивостью на рабочей поверхности и поэтому высокой твердостью (HRC 62–64). Одновременно требуются высокие механические свойства в сердцевине (предел текучести должен быть не менее 750 МПа).

Укажите марку и состав стали, применяемой для этой цели, и рекомендуйте режим термической и химико-термической обработки.

Сопоставьте последовательность применяемых при этом термических операций, продолжительность химико-термической обработки, толщину, структуру и твердость поверхностного твердого слоя и сравните выбранный состав стали и режим обработки с составом стали и обработкой, применяемой при цементации.

Задача 18

Стаканы цилиндров двигателей внутреннего сгорания с толщиной стенки 40 мм должны обладать высоким сопротивлением износу на поверхности. На заводе эти детали изготавливаются из стали 20 с последующей цементацией и термической обработкой.

В дальнейшем завод начал изготавливать цилиндры более ответственного назначения с повышенной износоустойчивостью и твердостью на поверхности не ниже HRC 62–64. Эту твердость сталь должна сохранить при нагреве до 300–400 °С.

Укажите, какие изменения необходимо было внести в технологический процесс термической и химико-термической обработки, выберите и укажите марку стали для изготовления цилиндров.

Задача 19

Цементированный слой в деталях, изготовленных из хромоникелевой стали, может получить после закалки пониженную твердость (HRC 52–56) вследствие сохранения в структуре значительного количества остаточного аустенита.

Укажите марку и химический состав цементуемой стали, в которой можно получить для сердцевины детали диаметром 80 мм, предел прочности 800–900 МПа при ударной вязкости $0,8 \text{ МДж/м}^2$, а для поверхностного слоя.

Объясните, можно ли при нагреве для отпуска превратить остаточный аустенит в мартенсит и получить при этом указанную высокую твердость.

Укажите и обоснуйте режим дополнительной термической обработки, позволяющей получить в детали необходимые твердость и структуру.

Приведите последовательность и режим всех операций термической обработки, а также структуру в поверхностном слое и в сердцевине детали после закалки и после окончательной обработки.

Задача 20

Завод изготавливает два типа зубчатых колес. Размеры колес одинаковы (диаметр 50 мм и высота 70 мм), работают колёса в равных условиях. Предел текучести должен быть не ниже 540–550 МПа.

Выберите сталь для зубчатых колёс с учётом, что второй тип имеет более сложную форму. Приведите состав и марку стали, учитывая технологические особенности термической обработки и необходимость предотвратить деформацию и образование трещин при закалке.

Обоснуйте сделанный выбор материала, рекомендовать режим термической обработки и укажите механические свойства в готовом изделии.

Задача 21

Известно, что многие крупные детали для железнодорожного транспорта, изготавливают литыми, затем подвергают термической обработке для повышения механических свойств. Выберите марку стали и обоснуйте режим термической обработки, если предел прочности должен быть не ниже 300 МПа.

Задача 22

Изготовление червячных колес диаметром 140 мм и толщиной 30 мм производилось заводом из серого чугуна. В дальнейшем потребовалось увеличить стойкость колёс. Серый чугун в этом случае должен обладать пределом прочности в 1,5 раза выше и относительным удлинением не менее 2–3%.

Укажите структуру и предел прочности серого чугуна, обладающего наиболее высокими механическими свойствами, которые можно получить в отливке указанной толщины.

Приведите способ получения чугуна, имеющего прочность в 1,5 раза больше прочности указанного серого чугуна.

Задача 23

При реконструкции крана, предпринятой для увеличения его грузоподъёмности, конструктор не изменил диаметр ведущей оси крановой тележки, а заменил материал оси другой сталью с пределом текучести в 1,5 раза более высоким.

Укажите марку углеродистой качественной и легированной стали, из которой можно изготовить ось тележки, рекомендуйте режим термической обработки и сопоставьте механические свойства выбранных марок со Ст. 5, из которой ранее изготавливалась ведущая ось диаметром 70 мм.

Задача 24

Выберите стали для шпинделей токарных и шлифовальных станков с учетом того, что шпиндели работают в условиях износа, которые, кроме того, должны обеспечить высокую точность обработки. Деформация шпинделей шлифовальных станков при окончательной термической обработке должна быть минимальной. Оба шпинделя должны иметь повышенную износостойкость.

Укажите структуру выбранной стали и твердость поверхностного слоя и сердцевины после окончательной обработки.

Задача 25

В целях экономии коленчатые валы легкового автомобиля изготавливают не из стали, а из чугуна – материала, мало чувствительного к надрезу.

Выберите класс и марку чугуна с пределом прочности не ниже 400 МПа и относительным удлинением 2–3%.

Укажите структуру выбранного чугуна и форму выделения графита и объясните, какие изменения в этом случае надо внести в условия выплавки.

Задача 26

Щёки и шары машин для дробления руды и камней работают в условиях повышенного износа, сопровождаемого ударами.

Выберите сталь для изготовления щёк и шаров, укажите её химический состав и свойства, в том числе обрабатываемость резанием на

станках.

Рекомендуйте наиболее эффективный технологический процесс изготовления и режим термической обработки щёк и шаров. Укажите структуру стали в готовом изделии.

Задача 27

Многие детали установок расщепления нефти, в частности трубы печей, подвержены действию высоких температур.

Выберите состав стали для труб, не испытывающих больших нагрузок, но нагреваемых в работе от 450–500 до 600 °С.

Укажите режим термической обработки и микроструктуру стали, а так же объяснить роль легирующих элементов, позволяющих использовать эти стали для длительной работы при высоких температурах.

Задача 28

Лопатки и другие детали особо мощных реактивных двигателей кратковременного действия работают в сильной окислительной среде при высоких температурах (1000–1500 °С). Металл, из которого изготавливают эти детали, должен обладать повышенной коррозионной стойкостью высокими характеристиками кратковременной прочности при указанной температуре.

Выберите металл или сплав для названных изделий, указать его состав и свойства, а также приведите метод защиты изделий от окисления.

Задача 29

Нержавеющая хромоникелевая сталь некоторых составов обладает хорошей стойкостью против действия ряда химических сред, но после сварки становится чувствительной к интеркристаллитной коррозии в зоне, прилегающей к сварному шву.

Укажите химический состав, режим термической обработки и микроструктуру нержавеющей стали, стойкой против действия органических кислот и укажите, какой компонент должна содержать эта сталь для сохранения стойкости против интеркристаллической коррозии.

Задача 30

Лопатки реактивных и турбореактивных двигателей работают в окислительной среде при температурах 600–900 °С. К этим сплавам предъявляются следующие требования: высокая окалиностойкость, сопротивление ползучести, высокая длительная прочность при

температурах до 800–900 °С.

Выберите состав сплава указать методы термической обработки и приведите структуру и свойства после окончательных операций этой обработки.

Задача 31

На заводе изготавливали кольца для шарикоподшипников диаметром 20 мм из стали ШХ15. Появилась необходимость увеличения диаметра, шарикоподшипников до 50 мм.

Подберите марку стали для изготовления колец шарикоподшипников увеличенных размеров. Укажите режим термической обработки и структуру в готовом изделии.

Задача 32

При сборке строительных конструкций потребовалось большое количество болтов.

Подберите марку стали для изготовления болтов, обеспечивающую изготовление болтов на быстроходных станках-автоматах.

Укажите химический состав, режим термической обработки, механические свойства выбранной стали.

Объясните роль элементов присутствующих в стали на её технологичность.

Задача 33

Выберите марку быстрорежущей стали, наиболее пригодной для изготовления долбяков с наружным диаметром 50 мм.

При выборе марки стали для долбяка учесть, что обрабатываемый материал имеет твердость НВ 200–220. Долбяк при работе испытывает динамические нагрузки.

Рекомендуйте режим термической обработки выбранной стали и указать структуру и механические свойства.

Задача 34

Выберите марку стали для изготовления топоров. В целях предотвращения смятия и выкрашивания в процессе работы, лезвие топора должно иметь твердость HRC 50–55 на высоту 30–40 мм. Остальная часть не подвергается термической обработке.

Укажите химический состав стали, режим термической обработки, обеспечивающий указанные требования, а так же способ закалки,

позволяющий получить необходимую твердость только в лезвии топора.

Задача 35

На завод поступило несколько партий прутков из стали 45Х, поставляемых с твердостью НВ 160-180. Однако одна из поступивших партий имела твердость НВ 200-250.

Укажите способ и режим термической обработки, позволяющий снизить твердость этой партии прутков. Подберите быстрорежущую сталь для изготовления фрез, пригодных для обработки стали 45Х.

Термины основных свойств металлов и сплавов

Прочность	– способность металлов выдерживать напряжения, не разрушаясь под действием приложенных сил
Предел прочности при растяжении	– напряжение, равное отношению наибольшей нагрузки, предшествовавшей разрушению образца, к первоначальной площади сечения образца
Предел текучести (физический) при растяжении	– напряжение, при котором образец деформируется (течет) без заметного увеличения нагрузки
Предел текучести (условный) при растяжении	– напряжение, при котором образец получает остаточное удлинение, равное 0,2% первоначальной расчетной длины
Пластичность	– свойство металлов менять свою форму и размеры без разрушения под действием внешних сил.
Относительное удлинение	– отношение абсолютного удлинения, т.е. приращения расчетной длины образца после разрыва к его первоначальной расчетной длине, выраженное в процентах.
Относительное сужение	– отношение абсолютного сужения, т.е. уменьшения площади поперечного сечения образца после разрыва к первоначальной площади его поперечного сечения, выраженное в процентах.
Твердость	– способность металла противодействовать вдавливанию в него более твердого металлического или алмазного наконечника.
Ударная вязкость	– способность металла оказывать сопротивление действию ударных нагрузок. Хрупкое разрушение - разрушение металла, происходящее без заметной пластической деформации.
Вязкое разрушение	– разрушение металла, происходящее после значительной предварительной пластической деформации.

Хладноломкость	– склонность некоторых металлов и сплавов при понижении температуры переходить от вязкого разрушения к хрупкому.
Критическая температура хрупкости	– температура перехода металла от вязкого разрушения к хрупкому и наоборот
Усталость	– разрушение металла под действием повторно-переменных напряжений (циклов).
Предел выносливости	– наибольшая величина максимального напряжения цикла, не вызывающего разрушения практически при очень большом числе циклов (10 ⁷ и более)
Термическая усталость	– склонность стали к образованию поверхностной сетки трещин при многократном нагреве и охлаждении.
Разгаростойкость	– сопротивление стали термической усталости
Жаростойкость (окалиностойкость)	– способность металлов и сплавов противостоять окислению (окалинно образованию) при нагреве до высоких температур.
Жаропрочность	– способность металлов и сплавов сохранять при повышенных температурах прочность, т.е. противостоять механическим нагрузкам.
Износостойкость	– свойство металла оказывать сопротивление поверхностному износу.
Наклеп	– поверхностное упрочнение металла при пластической деформации в холодном состоянии
Теплостойкость	– способность рабочей кромки стального инструмента сохранять в эксплуатации (при нагреве) структуру и свойства, необходимые для резания или деформирования.
Закаливаемость	– способность стали к повышению твердости при закалке
Прокаливаемость	– способность стали воспринимать закалку на определенную глубину.

Синеломкость	– хрупкость, возникающая при нагреве стали в интервале температур синего цвета побежалости (300 °С)
Отпускная хрупкость необратимая	– снижение ударной вязкости стали при отпуске в интервале 250–400 °С.
Отпускная хрупкость обратимая	– снижение ударной вязкости некоторых легированных сталей после медленного охлаждения с температуры отпуска в интервале 450–650 °С.
Ползучесть	– свойство металлов медленно и непрерывно деформироваться (ползти) в течение длительного времени при постоянной нагрузке и повышенных температурах
Предел ползучести	– напряжение, вызывающее деформацию заданной величины за определенный промежуток времени при заданной температуре.
Предел длительной прочности	– напряжение, вызывающее разрушение при данной температуре за данный интервал времени.

Для деталей сложной формы, длинномерных деталей из высокопрочных среднелегированных сталей 30X2ГСН2А, 40ХН2СМА, 30X2ГСН2ВМ, 25X2ГНТА и 26ХНВМБР, на которых невозможен замер твердости по Роквеллу и Виккерсу, допускается замер твердости по Бринеллю до 500 единиц НВ. Значения соответствия σ_B НВ приведены в табл. П4 и П5.

Таблица П4

Зависимость временного сопротивления разрыву σ_B от твердости НВ,
кгс/мм²

Число твердости НВ, кгс/мм ² 10/3000	Временное сопротивление разрыву σ_B кгс/мм ²
468	175
474	180
487	185
500	190
513	195
520	200

Перевод чисел твердости HRC шкалы С Роквелла, воспроизводимой государственным специальным эталоном в числа твердости HRC шкалы С Роквелла с округлением $\pm 0,5$ единиц.

Перевод чисел твердости по Роквеллу HRC_9 в числа твердости HRC

HRC	HRC	HRC	HRC	HRC	HRC
20,0	18,0	35,5	34,0	52,5	51,5
20,5	18,5	36,0	34,5	53,0	52,0
21,0	19,0	36,5	35,0	53,5	52,5
21,5	19,5	37,0	35,5	54,0	53,0
22,0	20,0	37,5	36,0	54,5	53,5
22,5	20,5	38,0	36,5	55,0	54,0
23,0	21,0	38,5	37,0	55,5	54,5
23,5	21,5	39,0	37,5	56,0	55,0
24,0	22,0	39,5	38,0	56,5	55,5
24,5	22,5	40,0	38,5	57,0	56,0
25,0	23,0	40,5	39,0	57,5	56,5
25,5	23,5	41,0	39,5	58,0	57,0
26,0	24,0	41,5	40,0	58,5	57,5
26,5	24,5	42,0	40,5	59,0	58,0
27,0	25,0	42,5	41,0	59,5	58,5
27,5	25,5	43,0	41,5	60,0	59,0
28,5	26,5	44,0	42,5	61,0	60,0
29,0	27,0	44,5	43,0	61,5	60,5
29,5	27,5	45,0	43,5	62,0	61,0
30,0	28,0	45,5	44,0	62,5	61,5
30,5	28,5	46,0	44,5	63,0	62,0
31,0	29,0	46,5	45,0	63,5	62,5
31,5	29,5	47,0	45,5	64,0	63,0
32,0	30,0	47,5	46,0	64,5	63,5
32,5	30,5	48,0	46,5	65,0	64,0
33,0	31,0	48,5	47,0	65,5	64,5
33,5	31,5	49,0	47,5	66,0	65,0
34,0	32,0	49,5	48,0	66,5	65,5
34,5	32,5	50,0	48,5	67,0	66,0
35,0	33,0	50,5	49,0	67,5	66,5
—	—	51,0	49,5	—	—
—	—	51,5	50,0	—	—
—	—	52,0	50,5	—	—

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Общая характеристика уровней структурной организации материалов ..	8
Общие указания к выполнению лабораторных работ	12
Техника безопасности	12
Лабораторная работа № 1. Кристаллизация металлов и солей	14
Лабораторная работа № 2. Металлографический метод исследования	29
Лабораторная работа № 3. Структура, маркировка и классификация легированных сталей	47
Лабораторная работа № 4. Структура, свойства цветных металлов и сплавов на их основе	54
Лабораторная работа № 5. Диаграмма Fe–C и структура железоуглеродистых сплавов	63
Лабораторная работа № 6. Испытание материалов на ударную вязкость	86
Лабораторная работа № 7. Испытание материалов на сжатие	92
Лабораторная работа № 8. Испытание материалов на растяжение	99
Лабораторная работа № 9. Испытание материалов на кручение.....	109
Лабораторная работа № 10. Основные виды термической обработки углеродистых сталей	118
Литература	133
Задачи по разработке технологического процесса термической обработки конструкционных, инструментальных и специальных сталей и чугунов	134
Термины основных свойств металлов и сплавов	148
Приложение	151

Учебное издание

**Сироткин Олег Семенович,
Бунтин Артем Евгеньевич,
Сироткин Ростислав Олегович**

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.
ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Практикум
по дисциплине
«Материаловедение. Технология конструкционных материалов»**

2-е изд. перераб., доп. и испр.

Кафедра материаловедения и технологии материалов КГЭУ

**Авторская редакция
Компьютерная верстка *Т.И. Лунченкова***

**Подписано в печать
Формат 60x84x16. Бумага «Business». Гарнитура «Times». Вид печати РОМ.
Усл. печ. 9,06. Уч.изд л. 5,65. Тираж 500 Заказ №**

**Редакционно-издательский отдел КГЭУ,
420066, Казань, ул. Красносельская, 51**